

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА»

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Алнаері Фрхат Алі



УДК 621.39:004.052-021.412.1(043.3)

ДИСЕРТАЦІЯ

**МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ РЕКОНФІГУРАЦІЇ САМОВІДНОВЛЮВАЛЬНОГО
СЕГМЕНТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ**

05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

17 – електроніка та телекомунікації

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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

_____ Алнаері Фрхат Алі

Науковий керівник

Шефер Олександр Віталійович

доктор технічних наук, доцент

Харків 2021

АНОТАЦІЯ

Алнаєрі Фрхат Алі. Моделі та методи реконфігурації самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі. –

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі (172 – телекомунікації та радіотехніка). – Український державний університет залізничного транспорту, Міністерство освіти і науки України, Харків, 2021.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуального науково-прикладного завдання розробки моделей та методів реконфігурації самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі з метою підвищення ефективності розподілу обчислювальних ресурсів для виконання вимог щодо якості обслуговування. Наукова новизна отриманих результатів обумовлена розробленими моделями та методами реконфігурації самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі, та в межах яких отримані такі нові наукові результати:

вперше розроблений комплекс моделей топологічної структури самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі, який враховує особливості самовідновлювальних мережних компонент і базується на використанні модифікованого метода Туєга-Стейгліца, що дозволяє виконати вимоги QoS щодо надійності та реалізувати процес нарощування структури при нестачі обчислювальних ресурсів;

удосконалений комплекс методів реконфігурації сегмента телекомунікаційної мережі, який відрізняється від відомих сумісним використанням властивостей локальної самовідновлюваності та горизонтальної масштабованості, що дозволяє виконати вимоги QoS щодо середнього часу затримки повідомлень;

отримав подальший розвиток метод перерозподілу ресурсів автономного самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі при пульсуючому

характері трафіка за рахунок використання спектральних властивостей процесу передачі даних, що дозволяє уникнути втрат пакетів при перевантаженні каналів зв'язку.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному: розроблені у роботі моделі, а також розроблені й удосконалені методи є науково-практичною основою для подальшого удосконалення програмного забезпечення телекомунікаційних мереж із можливістю самовідновлення. Представлені на їх основі інженерні методи та алгоритми дають змогу:

- при розробці проектної документації самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі враховувати вимоги до його ступеню надійності за рахунок використання математичної моделі топологічної структури;

- проводити розрахунок характеристик апаратних складових автономного самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі при проведенні реконфігурації та горизонтального масштабування з використанням запропонованого комплексу методів, що дозволяє виконати вимоги QoS щодо середнього часу затримки повідомлень та зменшити його у порівнянні з існуючими методами у середньому до 8%.

- уникнути втрат пакетів при перевантаженні каналів зв'язку та зменшити ймовірність спотворення повідомлень при перерозподілі ресурсів самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі на 5%;

- визначити ширину смуги пропускання самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі та отримати відносне зниження вартості реконфігурації (до 3%) за рахунок використання процесів обміну обсягу буферної пам'яті на каналну ємність мережі.

Результати наукових досліджень відображено у 9 друкованих працях, зокрема 4 статті – у наукових фахових виданнях України, 1 стаття – у періодичному науковому виданні Європейського Союзу, 4 публікації – в матеріалах міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференцій.

Вступ дисертаційної роботи містить: обґрунтування актуальності теми дослідження, інформацію про зв'язок дисертаційної роботи з науковими

програмами, мету роботи та задачі досліджень, формулювання об'єкта, предмета та методів дослідження. Подано перелік результатів дисертаційного дослідження, які становлять наукову новизну, зазначено практичне значення отриманих результатів, а також особистий внесок здобувача. Наведено дані щодо реалізації, апробації та публікації наукових і практичних результатів дисертації та їх впровадження.

В першому розділі проведений аналіз сучасного стану і тенденцій розвитку методів розподілу обчислювальних ресурсів та вибраний і обґрунтований критерію оцінки якості розподілу для самовідновлювальних мереж та їх компонентів. Також визначені особливості функціонування та низка властивостей, якими можуть володіти самовідновлювальні системи, розглянуті питання підвищення ефективності використання обчислювальних ресурсів телекомунікаційних мереж та виділені принципи реконфігурації автономних самовідновлювальних сегментів телекомунікаційних мереж. Все це надало можливість сформулювати постановку завдання стосовно оптимізації процесу реконфігурації автономних самовідновлювальних сегментів телекомунікаційних мереж.

В другому розділі розроблений та досліджений комплекс моделей топологічної структури самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі та наведені результати моделювання процесу нарощування структури сегмента при нестачі обчислювальних ресурсів. Моделювання здійснюється в три етапи, на заключному етапі топологічна структура сегмента оптимізується за критерієм мінімізації середнього часу затримки та враховує всі існуючі фрагменти сегмента, що розглядається. Реконфігурований сегмент відповідає вимогам горизонтальної та вертикальної масштабованості. Завдяки цьому можна, виходячи із конкретних умов, стискати або нарощувати структуру сегмента або його окремих фрагментів в будь-якому напрямку.

Запропонована математична модель розподілу подорожніх потоків між виділеною парою взаємодіючих абонентів в мережі, граф топологічної структури якої є повним, що базується на модифікованому симплекс-методі з обмеженням

на максимальну кількість транзитних вузлів у кожній складовій поточного потоку. Завершенням першого етапу моделювання є сформована топологічна структура сегмента з розрахованими пропускними здатностями каналів зв'язку при припущенні повності сегмента, що розглядається. На другому етапі здійснюється перехід до регулярної структури графа сегмента мережі, у якого зв'язність не менше заданої та враховується умова, що для кожного подорожнього потоку існує альтернативний маршрут передачі даних. При цьому серед можливих структур обирається менш затратна за допомогою методу виключення гілок, яка використовується в якості початкової для третього етапу, на якому запропонована математична модель оптимальної топологічної структури.

В третьому розділі удосконалений та досліджений комплекс методів реконфігурації самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі, а також набув подальшого розвитку метод перерозподілу ресурсів самовідновлювального сегмента при пульсуючому характері трафіка. Для реконфігурації сегмента використані такі методи, що удосконалені за рахунок сумісного використання властивостей локальної самовідновлюваності та горизонтальної масштабованості: метод розрахунку мінімальної середньої затримки повідомлень; метод визначення ширини смуги пропускання; метод визначення сгладжуючого впливу кількості буферних елементів черг на завантаження каналів. Метод розрахунку мінімальної середньої затримки повідомлень при реконфігурації самовідновлювального сегмента дозволив при заданій вартості для передачі умовної одиниці інформації обрати необхідну кількість буферних елементів черги і оптимальне значення для щільності інформаційного потоку, які забезпечують мінімальну усереднену затримку передачі повідомлень. Метод визначення ширини смуги пропускання при проведенні реконфігурації орієнтований на врахування специфічних властивостей самовідновлювальних систем і надає можливість розрахувати ширину смуги пропускання і необхідний обсяг буферної пам'яті при відомій топології мережі і заданій матриці тяжіння, що забезпечують необхідні значення

ймовірності відмови і гарантують мінімальний час доставки повідомлень. Метод визначення сгладжуючого впливу кількості буферних елементів черги на завантаження каналів дозволяє компенсувати недостатню ширину смуги бітових швидкостей передачі за умови дотримання вимог часової прозорості мережі, які можуть порушуватися через затримки в буфері. Також набув подальшого розвитку метод перерозподілу ресурсів автономного самовідновлювального сегмента при пульсуючому характері трафіка, який є необхідним для виконання умови щодо прийнятної ймовірності втрат пакетів. Метод базується на теорії викидів стохастичних процесів та дозволяє визначити наявні пікові викиди трафікового процесу. Пакети, обробка яких затримується, при зменшенні інтенсивності трафіка нижче фіксованого рівня вертаються із черги для подальшої обробки, при цьому значення допустимого часу затримки визначається із вимог часової прозорості самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі, що є гарантією встановлення необхідних значень якості обслуговування користувача. Дані методи дозволили виконати вимоги QoS щодо часу середньої затримки повідомлень та уникнути втрат пакетів при перевантаженні каналів зв'язку.

В четвертому розділі проведена порівняльна оцінка розроблених та існуючих моделей і методів реконфігурації самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі. Запропонований алгоритм розрахунку значень основних показників реконфігурованого самовідновлювального сегмента. Згідно з даним алгоритмом розглянуті такі приклади на основі сегмента, що має шість вузлів комутації: проведення реконфігурації самовідновлювального сегмента з повною топологією зв'язків між комутаційними вузлами; проведення реконфігурації самовідновлювального сегмента з топологією, що має регулярну структуру заданої зв'язності; сформовані найкоротші маршрути передачі даних між комутаційними вузлами та відповідно до кожного з них альтернативний маршрут, котрий не має з основним загальних подорожніх вузлів. Розраховуються значення основних показників, що характеризують QoS для реконфігурованого самовідновлювального сегмента. Розрахунки

використовують результати попередніх підрозділів. Показано, що при високошвидкісному трафіку запропоновані методи реконфігурації надають більш суттєві переваги. Проведено оцінку вартості засобів зв'язку при реконфігурації і отримано відносне зниження вартості мережі (біля 3%) за рахунок використання процесів обміну обсягу буферної пам'яті на каналну ємність засобів зв'язку реконфігурованого сегмента.

Пропонується та обґрунтовується підхід до використання гібридної комутації у сегменті, що розглядається, який поєднує декілька різних режимів комутації з адаптивною границею між цими режимами в залежності від стану системи зв'язку реконфігурованого самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі. Проведено порівняння різних методів за критерієм завантаження магістральних каналів сегмента. Результати моделювання показали перевагу запропонованого підходу за критерієм завантаження магістральних каналів, котра зростає при збільшенні кількості комутаційних вузлів.

Ключові слова: телекомунікаційна система, самовідновлення, автономний сегмент, якість обслуговування (QoS), перерозподіл ресурсів, пульсуючий трафік.

Список публікацій здобувача

1. Frhat Ali Alnaeri, Shefer O. V. Optimum flow distribution in the network with adaptive data transfer. *Electronics and Control Systems*. 2020. No. 4(66). P. 45-50.
2. Алнаері Фрхат Алі, Срібна І. М, Кучук Г. А., Лебедев О. Г. Синтез топологічної структури самовідновлюваного та масштабованого сегмента мережі передачі даних. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2020. № 4 (69). С. 95-106.
3. Алнаері Фрхат Алі, Кучук Н. Г., Шефер О. В., Чернева Г. П. Визначення пропускних здатностей самовідновлювального сегмента мережі. *Сучасні інформаційні системи*. 2021. Т. 5, № 2. С. 114-119.

4. Алнаері Фрхат Алі, Коломійцев О. В., Петровська І. Ю. Метод розрахунку розміру буферної пам'яті самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава: НУ «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2021. Випуск 2(64). С. 144-147.

5. AlnaeriFrhat Ali, Oleksandr Shefer, Galina Cherneva, Self-recovering telecommunication network element topological structure optimization by cost criterion. *Mechanics, Transport, Communications*. The republic of bulgaria, Sofia: Todor Kableshkov University of Transport, article № 2071.

6. Alnaeri Frhat Ali. Analytical solution of the problem of optimal distribution of flows. *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління: Тези доповідей шостої міжнародної науково-технічної конференції, 9 – 10 квітня 2016 р.* С. 46.

7. Алнаері Фрхат Алі, Шефер О. В. Метод побудови регулярної структури з заданою зв'язністю. *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління: Тези доповідей сьомої міжнародної науково-технічної конференції, 14 – 15 квітня 2017 р.* С. 51.

8. Алнаері Фрхат Алі, Шефер О. В., Головка Г. В., Лучко М. О., Чайка Є. А. Особливості початкової інформації для роботи з комп'ютерними мережами. *Електронні та мехатронні системи: теорія інновації, практика: Зб. наук. праць за матеріалами VI Всеукраїнської науково-практ. конф., 6 листопада 2020 р., Полтава: НУПП, 2020.* С. 221-223.

9. Alnaeri Frhat Ali, Shefer O. Noise-immunity of the system with the non-stability of the frequency with the action of gausis noises. *Proceeding of the XVI International Scientific and Technical Conference, 11-12.12.2020, Kyiv: NAU, 2020.* P. 80.

Alnaeri Frhat Ali. Reconfiguration self-healing system segment of the telecommunication network. – Qualification scientific work as manuscript.

Sciences in the specialty of 05.12.02 – Telecommunication systems and networks (172 – telecommunications and radio engineering). – Ukrainian State University of Railway Transport of Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2021.

The thesis is devoted to solving the actual scientific and applied problem of developing models and methods of reconfiguring a self-healing segment of a telecommunication network in order to increase the efficiency of computing resources distribution to meet the requirements for service quality. The scientific novelty of the results obtained is due to the developed models and methods for reconfiguring a self-healing segment of a telecommunications network, and within which the following new scientific results were obtained:

for the first time, a complex of models of the topological structure of a self-recovering segment of a telecommunication network was developed, taking into account the features of a self-healing network component and is based on modified Tueg-Steiglitz method usage, which enables meeting the QoS requirements for reliability and implementing the process of building up the structure with a lack of computing resources;

an improved set of methods for reconfiguring a segment of a telecommunications network, differs from the known ones by the joint use of the properties of local self-image and horizontal scalability, which enables meeting the QoS requirements regarding the average message delay time;

the method of redistribution resources of an autonomous self-healing segment of a telecommunication network with a pulsating nature of traffic was developed due to the use of the spectral properties of the data transmission process, which enables avoiding packet loss when overloading communication channels.

The practical significance of the results obtained is as follows: the models have been developed in the paper, as well as the methods have been developed and improved; they are the scientific and practical basis for further improving the software

of telecommunication networks with the possibility of self-healing. Engineering methods and algorithms presented on their basis enable:

- when developing design documentation for a self-healing segment of a telecommunications network, take into account the requirements for its degree of reliability through the use of a mathematical model of the topological structure;

- to calculate the characteristics of the hardware components of an autonomous self-healing segment of a telecommunications network during reconfiguration and horizontal scaling using the proposed set of methods, enables to fulfill the QoS requirements regarding the average message delay time and reduce it in comparison with existing methods by an average of 8%.

- to avoid packet loss during congestion of communication channels and to reduce the probability of messages distortion during the redistribution of resources of a self-healing segment of a telecommunications network by 5%;

- to determine the bandwidth of the self-healing segment of the telecommunications network and to obtain a relative reduction in the cost of reconfiguration (up to 3%) due to the use of exchanging processes of the buffer memory volume for the channel capacity of the network.

The results of scientific research are reflected in 9 printed papers, including 4 articles in scientific professional publications of Ukraine, 1 article in a scientific periodical of the European Union, 4 publications in materials of international and all-Ukrainian scientific and technical conferences.

The introduction of the dissertation work contains a justification of the research topic relevance, information on the relationship of the dissertation work with scientific programs, the purpose of the work and research tasks, the formulation of the object, subject and research methods. The results of the dissertation research, representing scientific novelty, are listed, the practical significance of the results obtained, as well as the personal contribution of the applicant, are indicated. The data on the implementation, approbation and publication of scientific and practical results of the dissertation and their implementation are presented.

In the first chapter, the analysis of the current state and development trends of methods for the distribution of computing resources is carried out, and the criterion for assessing the quality of distribution for self-healing networks and their components is selected and substantiated. Also, the features of functioning and a number of properties that self-healing systems can have are determined,

the issues of increasing the efficiency of using computing resources of telecommunication networks are considered and the principles of reconfiguration of autonomous self-healing segments of telecommunication networks are highlighted. All that made it possible to formulate a task for optimizing the process of reconfiguration of autonomous self-healing segments of telecommunications networks.

A set of models of the topological structure of the self-healing segment of the telecommunications network are developed and investigated and the results of modeling the process of increasing the structure of the segment in the absence of computing resources are presented in the second chapter. The simulation is carried out in three stages, at the final stage the topological structure of the segment is optimized by the criterion of minimizing the average delay time and takes into account all existing fragments of the segment under consideration. The reconfigured segment meets the requirements of horizontal and vertical scalability. Due to that, it is possible based on specific conditions, compress or increase the structure of the segment or its individual fragments in any direction.

A mathematical model of travel flows distribution between a selected pair of interacting subscribers in the network, the graph of the topological structure which is complete, based on a modified simplex method with a limit on the maximum number of transit nodes in each component of the current flow. The completion of the first stage of modeling is the formed topological structure of the segment with the calculated bandwidths of the communication channels, assuming the completeness of the segment under consideration. In the second stage, the transition is made to the regular structure of the graph of the network segment, where the connectivity is not less than the specified and takes into account the condition that for each traffic flow there is an alternative data transmission route. Among the possible structures is chosen less

expensive using the method of excluding branches, which is used as a starting point for the third stage, which proposed a mathematical model of the optimal topological structure.

In the third chapter the complex of methods of reconfiguration of the self-healing segment of the telecommunication network is improved and investigated, and also the method of redistribution of resources of the self-healing segment at pulsating character of traffic has got further development. The following methods have been used to reconfigure the segment, which have been improved due to the combined use of the properties of local self-healing and horizontal scalability: the method of calculating the minimum average message delay; the method of determining the bandwidth; a method for determining the smoothing effect of the number of buffer elements of queues on channel loading. The method of calculating the minimum average message delay during reconfiguration of the self-healing segment allowed at a given cost to transmit a conditional unit of information to select the required number of buffer elements of the queue and the optimal value for information flow density, which provide minimum average message delay. The method of determining the bandwidth during reconfiguration is focused on taking into account the specific properties of self-healing systems and provides the ability to calculate the bandwidth and the required amount of buffer memory with a known network topology and a given matrix of gravity. The method of determining the smoothing effect of the number of buffer elements of the queue on channel loading allows to compensate for the insufficient bandwidth of the bit rates provided that the requirements of time transparency of the network, which may be violated due to delays in the buffer. Also, the method of redistribution of resources of the autonomous self-healing segment with the pulsating nature of traffic, which is necessary to meet the condition of an acceptable probability of packet loss, has been further developed. The method is based on the theory of emissions of stochastic processes and enables to determine the available peak emissions of the traffic process.

Delayed packets return from the queue for further processing when the traffic intensity decreases below the fixed level, and the value of the allowable delay time is

determined from the time transparency requirements of the self-healing segment of the telecommunications network. These methods enable to meet the QoS requirements for the average delay time of messages and avoid packet loss when overloading communication channels.

In the fourth chapter the comparative estimation of the developed and existing models and methods of reconfiguration of a self-healing segment of a telecommunication network is carried out. An algorithm for calculating the values of the main indicators of the reconfigured self-healing segment is proposed. According to this algorithm, the following examples are considered based on a segment having six switching nodes: reconfiguration of a self-healing segment with a complete topology of connections between switching nodes; reconfiguration of the self-healing segment with a topology that has a regular structure of a given connectivity; the shortest data transmission routes between switching nodes are formed and according to each of them an alternative route, which has no common travel nodes with the main one. The values of the main indicators characterizing QoS for the reconfigured self-healing segment are calculated. The results of previous chapters are used while calculating. It is shown that the proposed reconfiguration methods provide more significant advantages for high-speed traffic. The cost of communication means during reconfiguration was estimated and the relative reduction of network cost (about 3%) was obtained due to the use of processes of exchange of buffer memory for communication means channel capacity of reconfigured segment.

An approach to the use of hybrid switching in the considered segment is proposed and substantiated, which combines several different switching modes with an adaptive boundary between these modes depending on the state of the communication system of the reconfigured self-healing segment of the telecommunications network. A comparison of different methods according to the criterion of loading the main channels of the segment. The simulation results showed the advantage of the proposed approach on the criterion of loading of trunk channels, which increases with increasing number of switching nodes.

Keywords: telecommunication system, self-healing, autonomous segment, quality of service (QoS), resources redistribution, ripple traffic.

List of publications of the applicant

1. Frhat Ali Alnaeri, Shefer O. V. Optimum flow distribution in the network with adaptive data transfer. *Electronics and Control Systems*. 2020. No. 4(66). P. 45-50.

2. Алнаері Фрхат Алі, Срібна І. М., Кучук Г. А., Лебедєв О. Г. Синтез топологічної структури самовідновлюваного та масштабованого сегмента мережі передачі даних. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2020. № 4 (69). С. 95-106.

3. Алнаері Фрхат Алі, Кучук Н. Г., Шефер О. В., Чернева Г. П. Визначення пропускних здатностей самовідновлювального сегмента мережі. *Сучасні інформаційні системи*. 2021. Т. 5, № 2. С. 114-119.

4. Алнаері Фрхат Алі, Коломійцев О. В., Петровська І. Ю. Метод розрахунку розміру буферної пам'яті самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава: НУ «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2021. Випуск 2(64). С. 144-147.

5. AlnaeriFrhat Ali, Oleksandr Shefer, Galina Cherneva, Self-recovering telecommunication network element topological structure optimization by cost criterion. *Mechanics, Transport, Communications*. The republic of bulgaria, Sofia: Todor Kableshkov University of Transport, article № 2071.

6. Alnaeri Frhat Ali. Analytical solution of the problem of optimal distribution of flows. *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління: Тези доповідей шостої міжнародної науково-технічної конференції, 9 – 10 квітня 2016 р.* С. 46.

7. Алнаері Фрхат Алі, Шефер О. В. Метод побудови регулярної структури з заданою зв'язністю. *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління: Тези доповідей сьомої міжнародної науково-технічної конференції, 14 – 15 квітня 2017 р.* С. 51.

8. Алнаері Фрхат Алі, Шефер О. В., Головка Г. В., Лучко М. О., Чайка Є. А. Особливості початкової інформації для роботи з комп'ютерними мережами. *Електронні та мехатронні системи: теорія інновації, практика*: Зб. наук. праць за матеріалами VI Всеукраїнської науково-практ. конф., 6 листопада 2020 р., Полтава: НУПП, 2020. С. 221-223.

9. Alnaeri Frhat Ali, Shefer O. Noise-immunity of the system with the non-stability of the frequency with the action of gaussian noises. Proceeding of the XVI International Scientific and Technical Conference, 11-12.12.2020, Kyiv: NAU, 2020. P. 80.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ РЕСУРСІВ САМОВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ СКЛАДОВИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ	
	14
1.1 Особливості функціонування самовідновлювальних систем	14
1.2 Аналіз методів підвищення ефективності використання обчислювальних ресурсів телекомунікаційних мереж	20
1.3 Принципи реконфігурації автономних самовідновлювальних сегментів телекомунікаційних мереж та постановка завдання	27
Висновки за розділом 1	30
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ТОПОЛОГІЧНОЇ СТРУКТУРИ САМОВІДНОВЛЮВАЛЬНОГО СЕГМЕНТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ	
	32
2.1 Загальна постановка завдання моделювання автономного самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі	32
2.2 Моделювання розподілу подорожніх потоків між кореспондуючими вузлами повного сегмента	34
2.3 Формування регулярної структури, що має задану зв'язність	38
2.4 Моделювання оптимальної топологічної структури	40
2.5 Моделювання процесу нарощування структури самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі	44
Висновки за розділом 2	49

РОЗДІЛ 3 МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ РЕСУРСІВ САМОВІДНОВЛЮВАЛЬНОГО СЕКМЕНТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ	52
3.1 Метод розрахунку мінімальної середньої затримки повідомлень при реконфігурації самовідновлювального секмента	52
3.2 Метод визначення ширини смуги пропускання при реконфігурації самовідновлювального секмента	62
3.3 Метод визначення сгладжуючого впливу кількості буферних елементів черги на завантаження каналів самовідновлювального секмента	71
3.4 Метод перерозподілу ресурсів автономного самовідновлювального секмента при пульсуючому характері трафіка	83
Висновки за розділом 3	93
РОЗДІЛ 4 ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РЕСУРСІВ У РЕКОНФІГУРОВАНОМУ САМОВІДНОВЛЮВАЛЬНОМУ СЕКМЕНТІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ	95
4.1 Алгоритм розрахунку значень основних показників реконфігурованого самовідновлювального секмента	95
4.2 Реконфігурація самовідновлювального секмента з повною топологією зв'язків між комутаційними вузлами	97
4.3 Реконфігурація самовідновлювального секмента з топологією, що має регулярну структуру заданої зв'язності	104
4.4 Розрахунок значень основних показників реконфігурованого самовідновлювального секмента	113
4.5 Оцінка ефективності гібридної комутації у реконфігурованому самовідновлювальному секменту	116
Висновки за розділом 4	120

ВИСНОВКИ	122
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	125
ДОДАТОК А АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ	138
ДОДАТОК Б СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ	142
ДОДАТОК В ПОСЛІДОВНІСТЬ ДІЙ ПРИ РЕАЛІЗАЦІЇ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ РЕСУРСІВ	143
ДОДАТОК Г РОЗРАХУНОК ЗАВАНТАЖЕННЯ ЗАСОБІВ ЗВ'ЯЗКУ САМОВІДНОВЛЮВАЛЬНОГО СЕГМЕНТА	146

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ**

БМ	–	базова мережа
КЗ	–	канал зв'язку
КВ	–	комутаційний вузол
КМ	–	комп'ютерна мережа
КС	–	комп'ютерна система
ЛОМ	–	локальна обчислювальна мережа
ЛС	–	логічна структура
МК	–	магістральний канал
ММО	–	мережа масового обслуговування
МПП	–	модуль проміжної пам'яті
ОР	–	обчислювальний ресурс
СвС	–	самовідновлювальна система
СвСм	–	самовідновлювальний сегмент
ССД	–	сховище даних
СЗД	–	система зберігання даних
СМПД	–	сегмент мережі передачі даних
СМО	–	системи масового обслуговування
ТМ	–	телекомунікаційна мережа
ХК	–	хмарна компонента
API	–	Application Programming Interface
IT	–	information technologies
QoS	–	якість обслуговування
QS	–	Queuing System,
ShS	–	Self-healing Systems
VLAN	–	Virtual Local Area Network
VPN	–	Virtual Private Network
WMI	–	Windows Management Instrumentation

ВСТУП

Актуальність теми. Один з основних трендів сучасного світу – бурхливий розвиток інфокомунікаційних технологій [74]. На сьогодні кількість інформації, яка передається усіма засобами зв'язку, подвоюється кожні 2-3 роки [125]. Головні драйвери цього процесу – стрімкий технологічний прорив та попит користувачів на інфокомунікаційні послуги. По мірі того, як сучасні програмні системи і застосунки набувають універсальності і функціональності, стає все більш необхідною можливість управляти несумісними ресурсами і обслуговувати різноманітні вимоги користувача [128]. Крім того, у міру ускладнення систем виправлення системних збоїв і відновлення після шкідливих атак стають більш складними, трудомісткими, дорогими і схильними до помилок. Ці чинники активізували дослідження, що стосуються концепції систем самовідновлення (ShS) [106].

Забезпечуючи раннє виявлення системних збоїв і відновлення системи або її складових, системи самовідновлення можуть значно знизити середній час відновлення. На додаток до відчутних переваг, впровадження систем самовідновлення може позитивно вплинути на багато нематеріальних аспектів, таких як задоволеність клієнтів і співробітників. Скорочення часу простою системи означає, що підприємства можуть більше зосередитися на своєму реальному бізнесі, ніж на управлінні IT-завданнями, що підвищує узгодженість надання їх послуг. Це також є суттєвим у сучасному технологічно орієнтованому світі.

Однак при всіх позитивних тенденціях ShS припускають надмірність Software and Hardware [89]. Крім того, система моніторингу вимагає незначних, але постійних витрат обчислювального ресурсу. Це призводить до зниження показників QoS. Тому необхідні нові моделі і методи обробки даних, орієнтовані на специфіку ShS [92].

Питаннями підвищення показників QoS, в останні десятиліття активно займалося багато як вітчизняних, так і зарубіжних вчених. Важливі результати в

цьому напрямі отримали Dustdar, P.S. [82], Fiems D. [86], Honnappa H. [94], Gomez-Corral A. [91], Liang L. [107], Peterson L. [113], Sánchez, J. [115], Schneider, C. [117], Tanenbaum A. [120], Аветісян А. І. [1], Беркман Л. Н. [51], Коваленко А. А. [23], Лемешко О. В. [34], Лосєв Ю. І. [35] та інші, але в більшості робіт не враховуються особливості систем самовідновлення, зокрема, особливості щодо як виявлення системних збоїв, так і оперативного відновлення нормального функціонування системи без втручання людини. Також практично не приділено уваги питанням, пов'язаним із дотриманням вимог QoS у автономних сегментах телекомунікаційних мереж, котрі мають властивість самовідновлення. Серед багатьох завдань, що при цьому виникають, є і актуальне **науково-прикладне завдання** розробки моделей та методів реконфігурації самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі з метою підвищення ефективності розподілу обчислювальних ресурсів для виконання вимог щодо якості обслуговування, тобто тема дисертаційної роботи є актуальною.

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

Дослідження в дисертаційній роботі проводились згідно з такими нормативними актами:

1. Концепція Національної програми інформатизації, схвалена Законом України «Про Концепцію Національної програми інформатизації» від 4 лютого 1998 р., №75/98-ВР (із змінами, внесеними згідно із Законом N406-VII(406-18) від 04.07.2013).
2. Концепція розвитку телекомунікацій в Україні, схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 7 червня 2006 р., № 316-р (із змінами, внесеними згідно з Розпорядженням КМ № 1612-р (1612-2008-р) від 27.12.2008 р.).
3. Постанова про затвердження Правил надання та отримання телекомунікаційних сервісів від 11 квітня 2012 р. № 295 (із змінами, внесеними згідно з Постановою КМ № 14 від 15.01.2020 р.).
4. Стратегія сталого розвитку «Україна–2020», схвалена Указом Президента України від 12 січня 2015 р. № 5/2015.226.

Тема дисертаційної роботи пов'язана з пріоритетними напрямками розвитку

науки і техніки, наведеними в «Переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2020 року», затвердженому Постановою Кабінету міністрів України № 942 від 7 вересня 2011 р. (із змінами, внесеними згідно з Постановою КМ № 556 від 23 серпня 2016р.).

Дослідження, результати яких викладені в дисертації, проводились згідно з планами НДР, які виконувалися на кафедрі автоматики, електроніки та телекомунікацій Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». Автор був безпосереднім виконавцем НДР «Розробка та дослідження моделей, методів, комп'ютерних систем і компонентів швидкої обробки даних на основі застосування непозиційної системи числення у системі залишкових класів» (ДР № 0115U00241917-11-229; 2018 р.).

Об'єктом дослідження є процес розподілу обчислювальних ресурсів сегмента телекомунікаційної мережі, що самовідновлюється.

Предмет дослідження – моделі і методи реконфігурації автономних сегментів телекомунікаційних мереж.

Мета досліджень – підвищення ефективності використання обчислювальних ресурсів самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі для виконання вимог щодо якості обслуговування.

Відповідно до поставленої мети повинні бути вирішені **задачі**:

- 1) аналіз сучасного стану і тенденцій розвитку методів розподілу обчислювальних ресурсів у самовідновлювальних мережах та їх компонентах;
- 2) вибір і обґрунтування критерію оцінки якості розподілу ресурсів у самовідновлювальних мережах та їх компонентах;
- 3) розроблення комплексу моделей топологічної структури самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі;
- 4) удосконалення комплексу методів реконфігурації самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі;
- 5) подальший розвиток методу перерозподілу ресурсів самовідновлювального сегмента при пульсуючому характері трафіка;

б) проведення порівняльної оцінки розроблених та існуючих моделей і методів реконфігурації самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі;

7) впровадження розроблених моделей та методів реконфігурації самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі.

Методи дослідження. При розв'язанні науково-прикладного завдання було використано широкий спектр методів. Так, при розробці математичної моделі топологічної структури самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі використовувався теоретико-множинний підхід, методи теорії масового обслуговування, дискретної оптимізації та дослідження операцій. При розробці методів реконфігурації структури та перерозподілу ресурсів використовувалися методи теорії складних систем, методи функціонального аналізу.

Оцінка даних, отриманих у ході комп'ютерного моделювання, проводилася на основі методів математичної статистики.

Вибір методів досліджень забезпечив достовірність отриманих результатів і висновків, що підтверджується збіжністю результатів експериментальних досліджень, отриманих при програмній реалізації відповідних алгоритмів, з теоретичними і практичними результатами, відображеними в публікаціях, і обумовлена їх відповідністю до положень теорії синтезу та реконфігурації телекомунікаційних систем.

Наукова новизна отриманих результатів обумовлена розробленими моделями та методами реконфігурації самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі, та в межах яких отримані такі нові наукові результати:

вперше розроблений комплекс моделей топологічної структури самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі, який враховує особливості самовідновлювальних мережних компонент і базується на використанні модифікованого метода Туега-Стейгліца, що дозволяє виконати вимоги QoS щодо надійності та реалізувати процес нарощування структури при нестачі обчислювальних ресурсів;

удосконалений комплекс методів реконфігурації сегмента телекомунікаційної мережі, який відрізняється від відомих сумісним використанням властивостей локальної самовідновлюваності та горизонтальної масштабованості, що дозволяє виконати вимоги QoS щодо середнього часу затримки повідомлень;

отримав подальший розвиток метод перерозподілу ресурсів автономного самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі при пульсуючому характері трафіка за рахунок використання спектральних властивостей процесу передачі даних, що дозволяє уникнути втрат пакетів при перевантаженні каналів зв'язку.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному: розроблені у роботі моделі, а також розроблені й удосконалені методи є науково-практичною основою для подальшого удосконалення програмного забезпечення телекомунікаційних мереж із можливістю самовідновлення. Представлені на їх основі інженерні методи та алгоритми дають змогу:

– при розробці проектної документації самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі враховувати вимоги до його ступеню надійності за рахунок використання математичної моделі топологічної структури;

– проводити розрахунок характеристик апаратних складових автономного самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі при проведенні реконфігурації та горизонтального масштабування з використанням запропонованого комплексу методів, що дозволяє виконати вимоги QoS щодо середнього часу затримки повідомлень та зменшити його у порівнянні з існуючими методами у середньому до 8%;

– уникнути втрат пакетів при перевантаженні каналів зв'язку та зменшити ймовірність спотворення повідомлень при перерозподілі ресурсів самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі на 5%;

– визначити ширину смуги пропускання самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі та отримати відносне зниження вартості

реконфігурації (до 3%) за рахунок використання процесів обміну обсягу буферної пам'яті на каналну ємність мережі.

Результати досліджень впроваджено (див. додаток Б):

– у Державному підприємстві «Південний державний проектно-конструкторський та науково-дослідний інститут авіаційної промисловості» (м. Харків);

– у Державному підприємстві «Український державний інститут по проектуванню заводів важкого машинобудування», (м. Харків);

- у навчальному процесі Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» при викладанні дисциплін «Телекомунікаційні та інформаційні мережі», «Системи передачі даних», «Автоматизовані системи управління телекомунікацій».

Достовірність нових наукових положень і висновків дисертаційної роботи підтверджується:

– збіжністю результатів моделювання, отриманих при програмній реалізації розроблених моделей та методів із теоретичними і практичними результатами, відображеними в публікаціях;

– зведенням розроблених моделей до відомих та апробованих моделей при граничних значеннях параметрів, які було враховано при їх розробленні;

– обґрунтованістю припущень, зроблених при розробленні моделей і методів, виходячи з досвіду експлуатації самовідновлювальних сегментів телекомунікаційної мережі;

– результатами практичного впровадження моделей та методів реконфігурації самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі.

Особистий внесок здобувача полягає в розробленні нових моделей, методів і проектних рішень, які забезпечують виконання поставлених в дисертаційній роботі завдань. Усі основні результати отримані автором особисто і опубліковані в роботах [3 – 7, 67 – 70].

Робота [69] опубліковані без співавторів. У роботах, виконаних у співавторстві, особисто здобувачеві належать такі наукові результати: у статті

[3] автором розроблена модель формування вторинної мережі зв'язку локального сегмента на основі існуючої первинної регулярної мережі; у статті [4] – удосконалений метод розрахунку ступеню завантаженості каналу; у статті [5] – удосконалений метод розрахунку кількості буферних елементів черги самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі при обмежених мережних ресурсах шляхом визначення мінімально необхідної кількості місць; у роботі [6] – метод формування із повнозв'язної структури регулярної структури з заданою зв'язністю; у роботі [7] – модель розподілу навантаження інформаційних вузлів математичного апарату; у статті [67] автором розроблена математична модель топологічної структури повнозв'язної мережі; у статті [68] автором розроблено метод оптимізації самовідновлювальної ланки телекомунікаційної мережі й забезпечена можливість отримання аналітичного рішення наукової задачі, котру можливо технічно реалізувати; у роботі [70] – структуру сегменту телекомунікаційної мережі в реальних умовах її експлуатації.

Зазначений особистий внесок здобувача в роботах, виконаних у співавторстві, відповідає темі та змісту дисертації.

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дослідження також наведені у Додатку А дисертаційної роботи.

Апробація результатів. Основні результати наукових досліджень доповідались, обговорювались та були схвалені на міжнародних науково-технічних конференціях (НТК): VI та VII Міжнародній НТК «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління» (м. Харків, Україна, м. Баку, Азербайджан, 2016р., 2017 р., відповідно); VI Всеукраїнській науково-практичній конференції «Електронні та мехатронні системи: теорія інновації, практика». (м. Полтава, 2020 р.); XVI Міжнародній НТК «Проблеми інформатизації» (м. Київ, 2020 р.)

Публікації. Результати наукових досліджень відображено в 9 друкованих працях, зокрема 5 статтях у наукових фахових виданнях (з них 4 – у наукових

фахових виданнях України, 1 стаття – у періодичному науковому виданні Європейського Союзу), 4 публікації – в матеріалах міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків по дисертації, списку використаної літератури та додатків. Повний обсяг дисертації складає 157 сторінок, у тому числі: 124 сторінки основного тексту, бібліографія із 129 найменувань на 13 сторінках, 4 додатки на 14 сторінках. Дисертація написана українською мовою.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ РЕСУРСІВ САМОВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ СКЛАДОВИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

В розділі розглянуті перше та друге завдання дослідження: проведений аналіз сучасного стану і тенденцій розвитку методів розподілу обчислювальних ресурсів та вибраний і обґрунтований критерію оцінки якості розподілу для самовідновлювальних мереж та їх компонентів. Також визначені особливості функціонування та низка властивостей, якими можуть володіти самовідновлювальні системи, розглянуті питання підвищення ефективності використання обчислювальних ресурсів телекомунікаційних мереж та виділені принципи реконфігурації автономних самовідновлювальних сегментів телекомунікаційних мереж. Все це надало можливість сформулювати постановку завдання стосовно оптимізації процесу реконфігурації автономних самовідновлювальних сегментів телекомунікаційних мереж.

1.1 Особливості функціонування самовідновлювальних систем

Самовідновлювальні системи (*Self-healing Systems, ShS*) характеризуються автоматичним виявленням збоїв системи і наявністю прийомів відновлення після таких ситуацій [60]. Самовідновлення – це вбудований механізм, який підтримує систему в порядку [76]. Самовідновлювальна система має такі три обов’язкові компоненти [123]:

1) система самовідновлення, яка завжди повинна бути в робочому стані, не виходить з ладу і поводить без будь-якої зовнішньої допомоги; це може бути що завгодно в ІТ-інфраструктурі, наприклад, застосунок, стороннє АРІ або апаратне забезпечення;

2) механізм моніторингу та виявлення, який постійно контролює систему, щоб переконатися, що вона працює нормально, і повідомляє про будь-які

відхилення від очікуваної поведінки, він включає моніторинг серверів, мережі, баз даних, журналів і продуктивності застосунків, а також інші інструменти.

3) протокол відновлення, який вживає необхідних заходів для відновлення нормальної роботи системи без допомоги ззовні, він може варіюватися від простих скриптів до складних ботів, тобто, це будь-яке програмне забезпечення, здатне відновлювати несправну систему.

Система самовідновлення повинна бути побудована з використанням інфраструктури, яка допускає адаптацію під час виконання [111], також повинен бути агент реконфігурації, який може виконати план відновлення системи після його завершення [110]. Є низка властивостей, якими можуть володіти самовідновлювальні системи:

– самоадаптація, тобто здатність системи або покращити свій статус, або підтримувати його роботу в різних ситуаціях, або дати оцінку його поточного стану та стану після відновлення системи [112];

– самооптимізація, тобто здатність системи знайти оптимальне рішення для досягнення конкретної мети самою системою, а також проводити коригування розподілу ресурсів після реконфігурації [101];

самоконтроль, тобто програмна система матиме можливості та функції, необхідні для контролю своїх внутрішніх функцій, а також її продуктивності, система також зможе генерувати звіти, що мають зворотній зв'язок та можливості навчання або адаптації [95, 98];

– самотестування, тобто процес, який відбувається на пристрої, коли він перевіряється на несправність, виявляє будь-які зміни в його конфігурації, відображає повідомлення про помилку, щоб вказати, що відбувається і що повинен робити користувач [129];

– самодіагностика, тобто процес ідентифікації та діагностування станів для зменшення помилок, котрі можуть бути небезпечними, якщо непридатні рішення прийматимуться на основі помилкової діагностики [129];

– самоврядування, тобто низка методів, за допомогою яких система управляє власними функціями без втручання людини, а програмне забезпечення

автоматично знаходить рішення для програмних помилок без втручання людини [96];

- самоконтроль, тобто процес контролю, який має агент над своїм станом та поведінкою залежно від складності внутрішнього стану агентів, який оцінюється як функція структурної складності та розміру внутрішнього стану та складності поведінки агента [92];

- самоконфігурація, тобто процес, при якому встановлення та моніторинг конфігурацій системи проводиться за допомогою конкретного компонента, підтримується тестування конфігурації шляхом повторного використання створених тестів з усіма підтримуваними апаратними та програмними конфігураціями [87].

Самовідновлення – це свого роду віртуальний механізм, заснований на чотирьох різних етапах: по-перше, програмне забезпечення, що автоматично відстежує функціонування системи; по-друге, згідно з цим механізмом стеження діагностується проблема; по-третє, відповідне рішення знаходиться автоматично; найважливіший етап, коли рішення тестується і нарешті впроваджується, щоб відновити систему до нормальної роботи. Після усунення проблеми програмне забезпечення ще раз тестується і запускає цикл самовідновлення. Петля самовідновлення є найбільш визначальною стадією процесу самовідновлення, яка є циклом, що виконує п'ять найважливіших функцій. Життєвий цикл самовідновлення (рис. 1.1) має такі функції:

- моніторинг, процес збору важливої інформації, необхідної для аналізу;
- аналізатор, допомагає визначити дію, яку потрібно здійснити шляхом порівняння інформації про стан із вимогами системи;
- діагностика, процес виявлення всіх життєво важливих несправностей, помилок або змін у системі;
- відновлення, складається з планування та виконання; плануються дії, які безумовно необхідні, план виконується досконало для досягнення бажаного результату для програмного забезпечення чи системи [87, 117].

– накопичення знань, ця функція є важливою, оскільки містить усі відповідні знання, спожиті та отримані попередніми чотирма функціями [83].



Рис. 1.1. Життєвий цикл самовідновлення

Відзначимо, що робоче середовище самовідновлювальних розширень містить багато особливостей, таких як: ненадійні системи; багато типів джерел, що пов'язані із помилками, коливання в часі тощо.

Згідно з дослідженнями [82, 83, 117] найбільш доцільною є трирівнева модель самовилікування з такими рівнями: реакція, дія, рефлексія. Усі ці три рівні різняться з точки зору глибокої обробки [83]. Ця обробка базується на наступних двох факторах: оцінка системних параметрів; оцінка навколишнього середовища.

Механізми, системи та інструменти самовідновлення забезпечують чудове рішення для величезної та складної системи, або її компонент, котрі вимагають великих зусиль, витрат, часу та знань для відновлення після різних типів помилок, як великих, так і простих. Максимальні можливості самовідновлення можуть бути досягнуті на автономному об'єкті, який контролює ієрархію різних ситуацій, з якими програмне забезпечення стикається в навколишньому середовищі.

Самовідновлювальні системи класифікуються як централізовані та децентралізовані. Централізовані системи мають менеджера управління, який відстежує, аналізує, складає плани та виконує їх, у той час як децентралізовані не мають менеджера, автоматичне відновлення відбувається лише фрагментарно, і вимагає для глобальних дій людської взаємодії [88, 95].

Існує багато досліджень щодо впровадження методів самовідновлення [72, 96]. Такі дослідження все ще розвиваються. Американська компанія Hewlett-Packard зробила стрибок у цьому напрямку та запустила програмне забезпечення для підтримки самовідновлення [82]. На сьогодні концепція програмного забезпечення для автоматичного самовідновлення видається дуже цікавою, більшість ІТ-компаній залучаються до неї і зосереджуються на таких сферах: самооптимізація, самозахист, самоконфігурація [73].

При розробці програмного забезпечення для самовідновлення слід брати до уваги багато питань: чи зможе система самовідновлення відновити програмне забезпечення у разі несправності, чи зможе система самовідновлення відновити працездатність базової системи після всіх типів відмов, чи зможе програма для самовідновлення зцілити програмне забезпечення, якщо є інші фактори, що впливають або атакують? [72, 73].

Рис. 1.2 візуалізує схему стандартного процесу самовідновлення, в якій відхилення від бажаної поведінки системи розглядається в динаміці, коли воно прогресує при експлуатації даної системи. З часом критичність стану системи може змінюватися. Якщо стан самовідновлення перевищує деякий поріг (критичний стан), тоді необхідно розпочати дії відновлення, щоб повернути систему в “нормальний” стан. Критичність стану – це міра відхилення системи від бажаної поведінки. Важливо зазначити, що якщо відхилення від бажаної поведінки нижче критичного стану, адаптація не потрібна, але тим не менше можлива. Однак, як тільки відхилення від бажаної поведінки системи перевищує поріг, необхідна адаптація. На цьому етапі потрібно відновити дії з відновлення та подальшої реконфігурації. Час між початком дій з викриття та моментом, коли система вже не перевищує критичного стану, визначається як час відновлення

(ТТН). Дії відновлення відновлюють поведінку системи нижче або ближче до критичного стану, тоді як подальші дії можуть стосуватися додаткових змін в навколишньому середовищі тощо з точки зору активних дій.

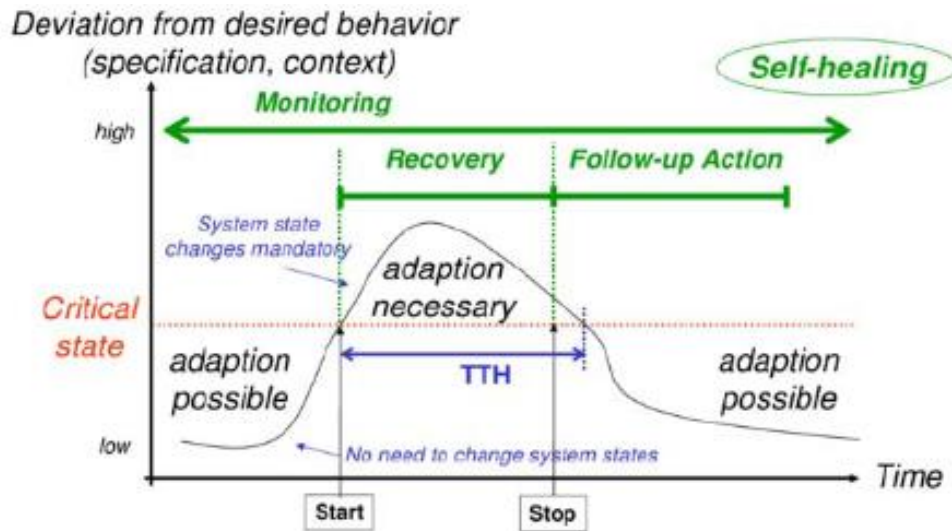


Рис. 1.2. Схема процесу самовідновлення [117]

Система демонструє характеристику самовідновлення, якщо вона здатна контролювати і зцілювати себе зсередини, що вимагає здатності цієї системи приймати рішення та виконувати дії відновлення, щоб повернутися до поведінки, що відповідає її початковій специфікації, особливо без зовнішнього втручання. Забезпечуючи раннє виявлення і відновлення системи, системи самовідновлення можуть значно знизити MTTR (середній час відновлення). Також наявність самовідновлювальної ІТ-інфраструктури, здатної автоматично виконувати рутинні завдання, значно спростить робочі процеси DevOps.

Але слід зауважити, що при реалізації практики самовідновлення виникає низка різноманітних проблем. Частина з них пов'язана безпосередньо з реалізацією складових самої системи самовідновлення, частина – з можливостями самої системи. Деякі завдання виникають вже після реконфігурації та відновленні роботи комп'ютерної системи. Зокрема, розглянемо проблему, пов'язану із погіршенням показників якості обслуговування (QoS). Звісно, що наявність постійно функціонуючої додаткової

системи дещо погіршує показники QoS. Але після етапу самовідновлення, котрий закінчується реконфігурацією системи, значення показників зазвичай можуть погіршитися ще більше, особливо, якщо поточна відмова пов'язана із виходом із ладу якихось складових Hardware. Це може призвести до невиконання окремих умов QoS. Вважаючи на те, що у великих телекомунікаційних системах властивість самовідновлення розглядається зазвичай для автономних сегментів для того, щоб знизити навантаження магістральних каналів у разі локальних відмов у автономному сегменті, а також можливості покращення показників QoS на етапі реконфігурації, необхідно удосконалення методів, що впливають на ефективність використання обчислювальних ресурсів самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі.

1.2 Аналіз методів підвищення ефективності використання обчислювальних ресурсів телекомунікаційних мереж

В процесі реконфігурації систем зв'язку фундаментальною проблемою є ефективне використання вузлових і каналних ресурсів при забезпеченні необхідної якості обслуговування користувачів (QoS) [64, 109]. Рішення даної проблеми вимагає розробки методики розрахунку ширини смуг пропускання, оптимальні значення яких істотно залежать від топології і величини наявних вузлових ресурсів. З іншого боку, реконфігурація структури мережі не може бути обмежена топологічним проектуванням, оскільки характер взаємодії множини вузлів за допомогою засобів зв'язку повинен визначати ефективність мережі або її складових. Кінцевою метою структури повинна бути оптимальна архітектура мережі або її складових, що представляє собою функціональну схему розподіленої системи [1, 24]. При виборі оптимальної структури мережі або її складових при реконфігурації переслідуються такі основні цілі [15, 25]:

- 1) забезпечення прийняттого часу реакції за рахунок надання необхідної ширини смуги пропускання (оптимізація пропускнуої спроможності);

- 2) вибір оптимальних маршрутів для передачі інформації (оптимізація подорожних потоків) з мінімальним числом транзитних вузлів;
- 3) забезпечення альтернативної маршрутизації для самовідновлення;
- 4) організація ефективного управління;
- 5) обмеження вартості реконфігурації.

Для аналізу ефективності мережі або її складових будується характеристика «затримка – продуктивність», яка зводиться до теорії черг в мережах. У такій постановці критерієм ефективності може виступати потужність, а робочу точку емпірично можна вибрати таким чином [62]:

$$P = \frac{1}{2} P_{max}; \quad \bar{T}_{зад} = 2T_{затр}^{min} \quad \Rightarrow \quad M = \frac{1}{4} \cdot \frac{P_{max}}{T_{затр}^{min}}$$

де M – потужність мережі, P_{max} – максимальна продуктивність мережі, що оцінюється максимальною кількістю повідомлень, успішно доставлених до місця призначення; $T_{затр}^{min}$ – мінімальний час затримки.

Але такий підхід видається занадто песимістичним і пов'язаний зі складністю не тільки вирішення такого завдання, але і її коректної постановки [62]. Телекомунікаційні мережі або їхні складові є складними структурами, що включають різноманітні застосунки. Повний аналіз таких систем можливий із застосуванням системного підходу, що дозволяє складну систему розділити на низку підсистем нижчого рівня. Принцип декомпозиції виступає як засіб, що дозволяє знизити рівень складності досліджень, з подальшим урахуванням і відновленням емерджентних властивостей системи, що втрачаються при декомпозиції. Відповідно до цього, особливу увагу при реконфігурації приділяється розробці моделі мережі або її складових зі зв'язкою «структура – функція», яка забезпечить побудову близької до оптимальної топологічної структури системи, що реконфігурується. Систему зв'язку мережі можна представити графом G , у якому виділяються маршрути від множини джерел $\{S\}$ до множини приймачів $\{t\}$.

При реконфігурації сегмента необхідно знайти раціональну топологічну структуру, яка задовольняє накладеним обмеженням, причому з найменшими витратами. Дане завдання відноситься до потокових задач, для яких характерна особливість – велика розмірність відповідних оптимізаційних задач та неможливість знаходження точного рішення при більшості формулювань, тому що необхідно проаналізувати дуже велику кількість варіантів топологічних структур K_0 , навіть при невеликому числі вузлів комутації k [2, 13, 14]

$$K_0 = \sum_{j=0}^{\ell_n} C_{\ell_n}^j = \sum_{j=0}^{\ell_n} \frac{\ell_n!}{j!(\ell_n - j)!},$$

де $\ell_n = \frac{k(k-1)}{2}$ – кількість гілок мережі, граф топології якої є повним.

Структура, граф якої є повним, будується для заданого числа вузлів комутації в системі зв'язку. Її аналіз можна провести за допомогою різних методів, наприклад, методами дискретного програмування для вибору необхідного алгоритму маршрутизації та розподілення потоків між мережними вузлами. У загальному випадку отримати рішення повнопереборними методами серед всіх варіантів неможливо. Тому не існує єдиного підходу до формування системи зв'язку, котра має оптимальну топологічну структуру. Завдання ще більше ускладнюється для потокових моделей, внаслідок величезної загальної кількості можливих подорожніх потоків, що кожної топологічної структури [20, 23, 30], навіть при невеликій розмірності $k \sim 20..30$ [27].

Найбільш ефективними для цього випадку є «методи заміни» [21, 31, 37]. Як вихідна конфігурація («початкова структура») обирається структура з усіма можливими зв'язками, тобто сформована на основі повного графа. В процесі перетворень початкова структура повинна володіти певною регулярністю, тобто все вузли графа є рівноправними в сенсі топології.

Оптимальним з точки зору топології є граф Петерсона [9, 19]. У цьому графі ступінь всіх вузлів дорівнює 3, тому його зв'язність максимальна. Основною властивістю графа Петерсона є мінімально можливий для неповних графів розмір діаметру (максимальної відстані між будь-якими двома

вузлами), який дорівнює двом. Але такий граф не може мати більш, ніж десять вузлів [2, 126]. Також відзначимо, що вузлова зв'язність графа ніколи не є більшою, ніж його реберна зв'язність. Отже мережа або її автономні складові є менш вразливою до відмов каналів, ніж, вузлів, тому що відмовивший вузла призводить до втрати всіх каналів, які були пов'язані з ним. Якщо комутаційні вузли сегмента графа є подібними за параметрами і функціями, то можливе використання регулярних графів. Формування регулярних графів зазвичай здійснюється за допомогою Гамільтонових циклів зовнішніх і внутрішніх контурів, котрі не мають спільних ребер. Регулярні графи сприяють суттєвому зниженню обчислювальної складності, тому їх доцільно використовувати як проміжну початкову структуру реконфігуруємої мережі. Слід зазначити, що будь-яка топологічна структура мережі, що має фіксовану кількість вузлів, може бути приведена до регулярного вигляду із необхідною зв'язністю.

Використання структури на базі повного графа для початку пошуку необхідного варіанта з подальшим виключенням з неї низки гілок для зниження вартості реконфігурації, потребує велику кількість обчислень. У зв'язку з цим доцільне для отримання початкової структури використовувати метод упорядкованого винятку гілок з метою отримання регулярної структури, котра має зв'язність та діаметр, що задовольняють обмеженням задачі. Якщо вартість мережі перевищить допустиму, то можна провести спрощення регулярної структури шляхом використовуючи один із методів оптимізації заміною, наприклад, методу Туега-Стейгліца [121], алгоритм якого спеціально орієнтований на побудову надійних мереж. Вимогу до надійності мережі або її складових можна задати мінімальною необхідною кількістю альтернативних шляхів для передачі даних між кожною парою взаємодіючих вузлів. Як критерій оптимальності можна використати загальну протяжність зважених ребер графа структури, що розглядається. Обирається якась допустима початкова структура, котра задовольнить вимогу зв'язності (для умов надійності) певної вартості. Оптимізація отриманої вихідної структури здійснюється за рахунок послідовного виконання так званих X-

трансформацій, які орієнтовані на допустиму надійність та паралельне зниження вартості. При закінченні процесу X-трансформацій фіксується структура, оптимальна в локальній області. Надалі така процедура повторюється у іншій локальній області. Мережа зв'язку, котра має вартість, яка є мінімальною серед усіх переглянутих структур, оптимальних у локальних областях, і є рішенням завдання реконфігурації [121]. Розглянутий алгоритм, звісно, не надає строгого оптимального рішення та базується на низці евристичних міркувань, крім того цей алгоритм і, відповідно, метод, заснований на ньому мають ряд недоліків:

- припущення про те, що пропускна спроможність гілки є рівною навантаженню, котре проходить по ній;
- орієнтованість на формування нових каналів зв'язку реконфігурованих автономних сегментів без розгляду потенціальної можливості оренди каналів;
- перегляд всіх можливих топологічних локальних перетворень;
- вимоги до якості обслуговування повідомлень у повному обсязі запланувати неможливо;
- породжувані топології суттєво залежать від виду цільової функції оптимізаційної задачі.

Розгляд інших відомих методів, що використовуються для оптимізації процесу реконфігурації мережі або її складових показав [8, 10, 18, 65, 77], що вони в тій або іншій мірі мають вищеперераховані недоліки, наприклад, при використанні методу заміни гілок, крім вищеперерахованих недоліків, ще додається можливість вводу до початкової структури нових гілок, але при цьому генерується великий набір квазіоптимальних топологічних структур, тобто додається ще один зайвий недолік метода. А при використанні увігнутого методу додавання гілок в моделі при хаотичному характері навантаження, що специфічно для реальних мереж, довжина черг та час обслуговування прагнуть до нескінченності, а ймовірність втрат буде перевищувати всі допустимі границі.

Для зменшення впливу вищеперерахованих недоліків пропонується одночасно збільшити ширини смуги пропускання для кожної гілки мережі,

причому пропорційно квадратному кореню із величини навантаження, яке на неї надходить [84]

$$V_{i,j} = F_{i,j} + d\sqrt{F_{i,j}}, \quad i, j = \overline{1, k}, \quad (1.1)$$

де $V_{i,j}$, $F_{i,j}$ – ширина смуги пропускання та потік відповідно для гілки (i, j) ; d – фіксований коефіцієнт.

Завдяки цьому збільшенню можна отримати значення такого суттєвого показника, як час середньої затримки, рівним прийнятному рівню, але немає гарантії, що реконфігурована структура буде не сильно відрізнятися від оптимальної [84].

Однак, вирішуючи задачу оптимізації окремо для кожної із проміжних структур, можна домогтися прийнятного варіанта, причому не тільки для часу середньої затримки, але й для інших якісних показників обслуговування з використанням відповідних оптимізаційних процедур.

Завдання реконфігурації значно спрощується для ізотропної телекомунікаційної мережі або автономних складових мережі, що мають ізотропну структуру, для котрої величина завантаження засобів зв'язку є інваріантною з напрямком передачі даних. Зазначимо, що використання регулярних структур як початкових, надає можливість аналітичного вирішення оптимізаційної задачі.

Збільшення ширини смуги пропускання зменшує час середньої затримки в мережі, або її складових, але при цьому, звісно, і збільшується вартість. Визначення середньої затримки $\bar{T}_{затр}$ можливо, якщо проводити аналіз системи зв'язку мережі як складної системи, що здійснює обслуговування. Величину середньої кількості пакетів, котрі на даний час знаходяться в мережі, можна визначити за формулою Літтла [22]

$$W = \gamma \bar{T}_{затр}, \quad (1.2)$$

де γ – величина загального трафіка в мережі на даний час (кількість повних пакетів в секунду).

В іншому поданні, враховуючи інтенсивність для кожного потоку λ_i і час середньої затримки у кожному каналі t_i , формулу Літтла можна задати у такому вигляді:

$$\gamma \bar{T}_{затр} = \sum_{i=1}^{\ell} \lambda_i t_i, \quad (1.3)$$

де ℓ – кількість можливих потоків.

Інтеграція різних засобів зв'язку базується на технології, що забезпечує передачу інформації незалежно від джерел трафіку.

Вважаючи на це, необхідно розробити такий підхід до вибору варіанту реконфігурації, котрий би забезпечив необхідну якість обслуговування (QoS). З огляду на структурну складність телекомунікаційних мереж, в [124] пропонується вирішити цю задачу стосовно кожної окремої ланки з подальшим розрахунком ширини смуги пропускання і вектору ймовірності втрат пакетів для всієї мережі. При цьому ймовірність втрат визначається як

$$P = 1 - \prod_{i=1}^j (1 - P_i), \quad (1.4)$$

де P_i – вектор втрат пакетів на i -му фрагменті маршруту; j – число фрагментів, що складають маршрут.

Відмітимо, що розглянутий метод не дозволить розглянути мережу або її автономний фрагмент у якості єдиної динамічної системи, котра враховує взаємодію всіх її елементів при функціонуванні і тому не надає можливості для отримання оптимальних значень ширини пропускнуої смуги для всіх каналів, що, в свою чергу, забезпечують затримку пакетів та ймовірність втрат, важливі для виконання умов QoS. В [91, 93] також пропонується використання моделі ланки типу М/М/п з відмовами в обслуговуванні для безпріоритетних потоків. При цьому ймовірність відмови в обслуговуванні визначається формулою Ерланга [90]:

$$P_{відм} = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n \frac{1}{n!} / \sum_{i=0}^n \frac{1}{i!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^i, \quad (1.5)$$

у якій значення величини λ/μ відповідає щільності трафіка, що вимірюється в Ерлангах, тобто відносному часі зайнятості каналу за 1 годину.

Численні публікації [12, 28, 29, 40, 63, 81], що присвячені оптимізації ширини смуги пропускання каналів телекомунікаційних мереж, базуються на мережних моделях типу M/M/1 з необмеженою чергою. При цьому припускається, що на вхід i -ої черги поступає пуассонівський потік, котрий має інтенсивність λ_i пакетів в секунду, а обслуговування проводиться у відповідності із експонентним законом із середнім часом μ^{-1} .

Середня затримка в такій системі [85] виражається

$$T_i = \frac{1}{\mu V_i - \lambda_i}. \quad (1.6)$$

Така ідеалізація допускає аналітичне рішення, що спрощує інтерпретацію результатів, але не відповідає реальним умовам функціонування мережі або її автономних сегментів, особливо тих, що мають властивість самовідновлення.

Отже, необхідна розробка моделей та методів реконфігурації самовідновлювальних телекомунікаційних мереж або їх автономних сегментів, що орієнтовані на урахування властивостей самовідновлюваності.

1.3 Принципи реконфігурації автономних самовідновлювальних сегментів телекомунікаційних мереж та постановка завдання

Як було доведено у попередньому підрозділі, питання реконфігурації автономних самовідновлювальних сегментів телекомунікаційних мереж не знайшли належного відображення в літературі і вимагають глибокого осмислення місця і необхідного ступеня взаємодії нових мережних технологій. Це має на увазі певну послідовність і етапність прийняття організаційно-технічних рішень щодо вибору архітектури, топології, структури, базових технологій і апаратури на основі певних принципів і технічних вимог. Крім того,

відсутність необхідної теоретичної бази не дозволяє оцінити оптимальність отриманого мережного рішення в цілому.

Аналіз показує, що проблеми інтеграції та конвергенції різних видів зв'язку, включаючи інформаційний, системний і мережний аспекти, в перебігу останніх років залишаються найактуальнішими в області телекомунікацій. Складність вирішення зазначених проблем пов'язана з особливостями телекомунікаційних систем, як інформаційно-технічних систем з колективно використовуваними ресурсами, зокрема з географічною розпорошеністю мережних ресурсів, джерел та одержувачів інформації та пульсуючим характером трафіка.

Перша особливість визначає високу вартість мережних ресурсів і висуває вимоги їх ефективного використання. Однак в розподіленій системі конкуруючі за ресурси вимоги не можуть самоорганізовуватися в узгоджену чергу без додаткових витрат на координацію і управління. Отже, звідси впливає загальна задача реконфігурації - досягнення ефективного колективного використання ресурсів множини несумісних пристроїв розподіленої системи, в якій запити на доступ до ресурсів виникають від асинхронних процесів в істотно нерівні проміжки часу.

На основі аналізу низки літературних джерел [32, 49, 60, 95, 98] можна сформулювати такі основні принципи реконфігурації автономних самовідновлювальних сегментів телекомунікаційних мереж в системному аспекті:

- система зв'язку повинна мати максимальну, при заданих обмеженнях, інформаційну ємність;

- завантаження каналів сегмента повинно бути по можливості рівномірної і не залежати від вибору маршрута передачі інформації, тобто структура сегмента повинна бути наближеною до ізотропної;

- система зв'язку сегмента повинна забезпечувати мінімальні втрати цільової інформації, яка повинна мати мінімальну надмірність, виходячи із того, що ця система є динамічною системою з обмеженими ресурсами;

– система зв'язку сегмента повинна використовувати мінімальне число буферних елементів черги, котре є достатнім для оптимального узгодження параметрів трафіку з параметрами каналів зв'язку; неконтрольоване використання накопичувачів для згладжування трафіку призводить до необмеженого росту черг, а нестача буферів унеможливорює передачу трафіку даних, чутливого до втрати пакетів;

– система зв'язку сегмента повинна бути гнучкою і реагувати досить швидко на зміну стану її елементів і зовнішнього середовища відповідно до вимог системи самовідновлення.

Наведені принципи дозволяють провести математичну постановку завдання стосовно процесу реконфігурації автономних самовідновлювальних сегментів телекомунікаційних мереж. В якості цільової функції виберемо математичне сподівання часу затримки $\bar{T}_{затр}$ при передачі необхідного обсягу інформації $W_{необх}$. Завданням проведення оптимальної реконфігурації автономного самовідновлювальних сегмента телекомунікаційної мережі є розробка такої її структури $S_{сегм}$ при доступних ресурсах $D_{дост}$, виділених на її проведення, при якій виконується така умова:

$$S_{сегм} : \bar{T}_{затр}^{min}(W_{необх}) = \min_{D \leq D_{дост}} \bar{T}_{затр}(W_{необх}). \quad (1.7)$$

Очевидно, що для виконання умови (1.7), мережа повинна мати відповідну продуктивність, досягне значення якої визначає її пропускну здатність V . Крім того, оптимізація є умовною, вважаючи на низку додаткових обмежень, заданих, наприклад, у вигляді деякої функції

$$F_{\xi}(\chi_{ij}, n_{ij}, m_{ij}, \mu_{ij}, \lambda_{ij}) \leq F_{\xi 0}, \quad \xi \in \Xi, \quad (1.8)$$

де $\chi_{ij}, n_{ij}, m_{ij}, \mu_{ij}, \lambda_{ij}$ – завантаженість, кількість каналів та буферних елементів черги, інтенсивності надходження та обслуговування пакетів відповідно на напрямку зв'язку між вузлами i та j , $\Xi = \{\xi | \xi = \overline{1, \Xi}\}$ – множина номерів обмежень $F_{\xi}(\bullet)$, серед яких, наприклад, є обмеження щодо надійності

$$P_{відм}(\chi_{ij}, n_{ij}, m_{ij}, \mu_{ij}, \lambda_{ij}) \leq P_{відм}^{доот}. \quad (1.9)$$

Крім того, обов'язково потрібно врахувати обмеження, що накладає система самовідновлення (множина SVD) та деякі додаткові обмеження, накладені специфікою системи та зовнішніми факторами (множина ZD):

$$SVD = \{svd_{\zeta}\}, \quad ZD = \{zd_{\eta}\}. \quad (1.10)$$

Отже, математична постановка завдання може бути сформульована таким чином: знайти раціональне рішення, наближене до оптимального, оптимізаційної задачі з цільовою функцією (1.7) та обмеженнями (1.8) – (1.10).

Висновки за розділом 1

У розділі проведений аналіз сучасного стану і тенденцій розвитку методів розподілу обчислювальних ресурсів та вибраний і обґрунтований критерію оцінки якості розподілу для самовідновлювальних мереж та їх компонентів. Проведені в розділі дослідження дозволили отримати такі результати.

У підрозділі 1.1 проведений аналіз особливостей функціонування самовідновлювальних систем. Визначені три обов'язкові компоненти та перераховані основні властивості таких систем. Показані життєвий цикл самовідновлення та схема стандартного процесу самовідновлення, в якій відхилення від бажаної поведінки системи розглядається в динаміці, коли воно прогресує при експлуатації даної системи. Наведений перелік різноманітних проблем, що виникають при реалізації практики самовідновлення.

У підрозділі 1.2 проаналізовані існуючі методи підвищення ефективності використання обчислювальних ресурсів телекомунікаційних мереж. Визначені основні цілі, які переслідуються при виборі оптимальної структури мережі або її складових. Задача топологічного проектування була зведена до знаходження такої топологічної структури, що при мінімальних витратах задовольняє встановленим обмеженням та наближена до оптимального варіанта. Показано,

що методи заміни є найбільш ефективними, але мають багато суттєвих недоліків при опрацюванні самовідновлювальних систем. Для прикладу розглянутий методу Туега-Стейгліца та розглянутий підхід до його модифікації з метою усунення деяких недоліків, що припускає одночасне збільшення ширини смуги пропускання кожної гілки. Але при цьому хоча й зменшується середня затримка в мережі, але збільшуються вартісні показники. Зроблений висновок щодо необхідності розробки моделей та методів реконфігурації самовідновлювальних сегментів телекомунікаційних мереж, що орієнтовані на урахування властивостей самовідновлюваності.

У підрозділі 1.3 сформульовані принципи реконфігурації автономних самовідновлювальних сегментів телекомунікаційних мереж. Показано, що загальним завданням реконфігурації є досягнення ефективного колективного використання ресурсів множини несумісних пристроїв розподіленої самовідновлювальної системи. Наведені принципи дозволили провести математичну постановку завдання стосовно процесу реконфігурації автономних сегментів телекомунікаційних мереж.

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛЮВАННЯ ТОПОЛОГІЧНОЇ СТРУКТУРИ САМОВІДНОВЛЮВАЛЬНОГО СЕГМЕНТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ

В розділі розглянуте третє завдання дослідження та доведено перший науковий результат: розроблений та досліджений комплекс моделей топологічної структури самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі та наведені результати моделювання процесу нарощування структури сегмента при нестачі обчислювальних ресурсів. Моделювання здійснюється в три етапи, на заключному етапі топологічна структура сегмента оптимізується за критерієм мінімізації середнього часу затримки та враховує всі існуючі фрагменти сегмента, що розглядається. Реконфігурований сегмент відповідає вимогам горизонтальної та вертикальної масштабованості. Завдяки цьому можна, виходячи із конкретних умов, стискати або нарощувати структуру сегмента або його окремих фрагментів в будь-якому напрямку.

2.1 Загальна постановка завдання моделювання автономного самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі

Для вирішення завдання побудови каналів зв'язку та вузлів комутації автономного сегмента телекомунікаційної мережі необхідно знати кількість наявних вузлів комутації, їх територіальне розташування, а також матрицю тяжіння між ними [79].

Отримана мережа повинна обслуговувати потоки пакетів, котрі описані матрицею тяжіння, і мати мінімальну вартість, до якої входять складовими вартість каналів і вартість вузлів комутації. На мережу, що проектується, накладаються обмеження щодо часу передачі інформації, надійності, живучості, ємності мережних ресурсів, а також умови щодо використання вже існуючих фрагментів, що повинні увійти до складу сегмента.

У даній постановці задачі отримаємо модель статичного розподілу потоків сегмента мережі, що належить ре конфігурації. Дана модель може бути використана у алгоритмах управління інформаційними потоками.

На початковому етапі моделювання зобразимо топологічну структуру самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі у вигляді повного графа G , який складається із k вузлів, серед яких два будемо розглядати як джерело S і приймач t (рис. 1), а з інших $k - 2$ виділимо множину транзитних вузлів B потужністю $\beta \leq k - 2$.

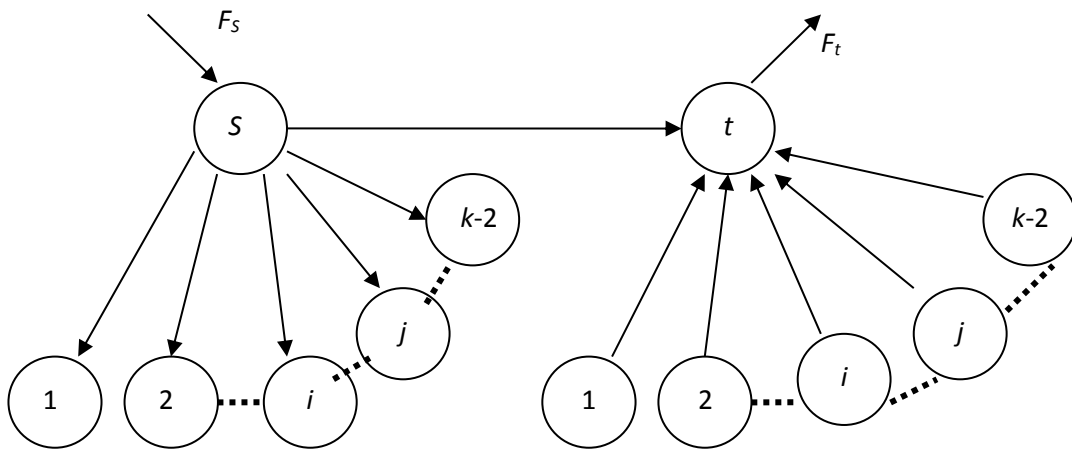


Рис. 2.1. Фрагмент топологічної структури

Якщо для розподілу γ підмножину всіх подорожніх потоків в довільній гілці (i, j) (для повного графа – це ребро між довільно обраними вершинами i та j) позначимо як $\Gamma_{i,j}^{(\gamma)} \subset B$, то загальний потік F_{ij} , що проходить цією гілкою, дорівнює сумі всіх подорожніх потоків X_p , тобто

$$F_{ij} = \sum_{p \in \Gamma_{i,j}^{(\gamma)}} X_p, \quad i, j \in \overline{1, k}. \quad (2.1)$$

Пропускні спроможності V_{ij} даних гілок, які повинні забезпечувати мінімальну середню затримку, можна визначити з розв'язку завдання оптимізації в будь-якій з постановок [79, 97, 119], наведених у першому розділі роботи, наприклад, (1.6).

Оскільки потоки F_{ij} задовольняють співвідношенню (1.6), то можна стверджувати, що і шляхові потоки, знайдені з рішення системи (2.1) будуть забезпечувати мінімальну середню затримку. Однак система рівнянь (2.1) не є однозначною, оскільки кількість подорожніх потоків значно перевищує кількість гілок F_{ij} . Отже в системі (2.1) кількість змінних перевищує кількість рівнянь, особливо при зростанні кількості вершин. Оскільки ця система – це система лінійних алгебраїчних рівнянь, то виникає завдання лінійного програмування (ЛП), для якого система (2.1) виступає в якості обмежень. Після вибору цільової функції дану систему можна розв'язати стандартними методами знаходження рішення, наприклад, симплекс-методом [38].

При цьому формування топологічної структури самовідновлювального сегмента мережі здійснюється в три етапи. *На першому етапі* розподіляються подорожні потоки між всіма парами кореспондуючих абонентів із припущенням щодо повності сегмента, що розглядається. *На другому етапі* здійснюється перехід із повної структури графа до регулярного графа, що задає топологічну структуру сегмента, який розглядається, та має задану зв'язність. На заключному, *третьому етапі*, формується топологічна структура сегмента, оптимальна за обраним критерієм та така, що враховує всі існуючі фрагменти сегмента, що розглядається.

2.2 Моделювання розподілу подорожніх потоків між кореспондуючими вузлами повного сегмента

На першому етапі вирішується завдання розподілу подорожніх потоків X_p між парою взаємодіючих абонентів на вузлах S і t в мережі, структура якої описується повним графом. модифікованим симплекс-методом, для яких максимальна кількість транзитних вузлів у поточному потоці не перевищує $\ell_{\max} \leq \beta$, тобто кількість потоків, які можуть бути задіяні для зв'язку розглянутих вузлів, визначається подвійним числом розміщень і складає

$$N_p(\ell_{\max}) = 1 + 2 \sum_{z=1}^{\ell_{\max}} A_{\beta}^z. \quad (2.2)$$

Обираючи будь-яку пару абонентів, що використовують вузли S і t , можна сформулювати систему обмежень, що включають β транзитних вузлів, які виражають базисні змінні за допомогою вільних змінних.

З огляду на велику кількість подорожніх потоків та на необхідність для кожного потоку мати дубльований потік з іншою множиною транзитних вузлів, обмежимо передачу інформації тільки за маршрутами, у яких в наявності є не більше двох транзитних вузлів. Тоді загальне число задіяних потоків є таким:

$$N_p(2) = 1 + 2(A_{\beta}^1 + A_{\beta}^2) = 1 + 2\beta + 2\beta \cdot (\beta - 1)/2 = 1 + 2\beta + \beta \cdot (\beta - 1),$$

а система обмежень (2.1) прийме такий вигляд:

$$\begin{cases} F_{si} = \sum_{j=1}^{\beta} X_{(i-1)\beta+j}; & i, j = \overline{1, \beta}; j > i; \\ F_{it} = \sum_{j=1}^{\beta} X_{[(j-1)\beta+i]}; \\ F_{ij} = X_{(i-1)\beta+j} - X_{(j-1)\beta+i}; \\ F_{st} = X_0, \end{cases} \quad (2.3)$$

де X_0 – загальний потік між заданими кореспондуючими вершинами, а із загальної кількості лінійних рівнянь є тільки β незалежних і відповідно β незалежних змінних, а інші – вільні.

Відповідно, для кожного i -го вузла ($i \in \overline{1, k}$), вважаючи на закон збереження потоку, є вірною така рівність:

$$\sum_{\alpha=1}^{p+1} F_{i\alpha} = F_0 \begin{cases} 1, & i = S; \\ 0, & i \neq S, t; \\ -1, & i = t; \end{cases}$$

де p – число, що позначає зв'язність графа.

У системі (2.3) ряд рівнянь є лінійною комбінацією інших, тому їх можна не розглядати, як лінійно-залежні, а базисні змінні можна виразити через вільні, тобто привести до канонічного вигляду ($i, j = \overline{1, \beta}$):

$$\begin{cases} X_{[(i-1)\beta+j]} = F_{i,j} + X_{[(j-1)\beta+i]}; \\ X_{[(i-1)\beta+i]} = F_{s,i} - \sum_{j=i+1}^{\beta} F_{i,j} - \left(\sum_{j=1}^{i-1} X_{[(i-1)\beta+j]} - \sum_{j=i+1}^{\beta} X_{[(j-1)\beta+i]} \right), \quad j > i; \\ X_0 = F_{s,t}. \end{cases} \quad (2.4)$$

У правій частині системи рівнянь (2.4) стоять базисні змінні, число котрих дорівнює числу рівнянь:

$$N_{\text{баз}} = \frac{(\beta+2)(\beta+1)}{2} - \beta = \frac{\beta^2 + \beta + 2}{2}.$$

Загальна кількість змінних (колійних потоків) визначається виразом (2.2), отже число вільних змінних є таким:

$$N_{\text{вільн}} = N_p - N_{\text{баз}} = 1 + \sum_{z=1}^2 A_{\beta}^z - \frac{\beta^2 + \beta + 2}{2}.$$

Результат розв'язання завдання, що надане формулами (2.1) та (2.2) цілком залежить від того, якою буде вибрана цільова функція $L(X)$, її вигляд визначається конкретними умовами загальної задачі. Якщо, наприклад, обмежитися умовою, що більшість інформації від вузла S до вузла t передається по маршрутах, які містять не більше одного транзитного вузла, то

$$\begin{aligned} L(X) &= X_0 + \sum_{i=1}^{\beta} X_{[(i-1)\beta+i]} = \\ &= X_0 + \sum_{i=1}^{\beta} F_{si} - \sum_{i=1}^{\beta} \sum_{j=i+1}^{\beta} F_{ij} - \sum_{i=1}^{\beta} \left(\sum_{j=1}^{i-1} X_{[(i-1)\beta+j]} - \sum_{j=i+1}^{\beta} X_{[(j-1)\beta+i]} \right), \end{aligned}$$

а цільова функція для вирішення завдання оптимізації, враховуючи закон зберігання потоку

$$X_0 + \sum_{i=1}^{\beta} F_{si} = F_0$$

перетворюється до вигляду:

$$L^{\min}(x) = -L(x) = \sum_{i=1}^{\beta} \sum_{j=1}^{\beta} F_{ij} - F_0 - 2 \sum_{ij} (-X_{ij, \text{вільні}}) \rightarrow \min, \quad (2.5)$$

де

$$2 \sum_{ij} X_{ij, \text{вільні}} = \sum_{i=1}^{\beta} \left(\sum_{j=1}^{i-1} X_{[(i-1)\beta+j]} - \sum_{j=i+1}^{\beta} X_{[(j-1)\beta+i]} \right).$$

Остаточно цільова функція для вирішення завдання табличним симплекс-методом перетворюється до такого вигляду:

$$L^{\min}(x) = -L(x) = \sum_{i=1}^{\beta} \sum_{j=1}^{\beta} F_{ij} - F_0 - 2 \sum_{ij} (-X_{cв}) \rightarrow \min.$$

При виконанні умов

$$F_{si} - \sum_{j=i+1}^{\beta} F_{ij} > 0; \quad F_{ij} > 0, \quad (2.6)$$

завдання розподілу подорожніх потоків має допустиме рішення, а враховуючи те, що всі подорожні потоки орієнтовані в напрямку від S до t , знаходиться оптимальне рішення, при якому прирівнюються до нуля вільні змінні ($X_{ij, \text{вільні}} = 0$):

$$\begin{cases} X_{[(i-1)\beta+i]}^* = F_{si} - \sum_{j=i+1}^{\beta} F_{ij}; \\ X_{[(i-1)\beta+j]}^* = F_{ij}, \end{cases} \quad (2.7)$$

а цільова функція приймає значення

$$L^{\min}(X) = \sum_{i=1}^{\beta} \sum_{j=1}^{\beta} F_{ij} - F_0.$$

Для отримання всього розподілу потоків в автономному сегменті мережі, що розглядається, необхідно аналогічне завдання вирішити для кожної пари кореспондуючих вузлів, які мають початкові потоки F_0^k . Отримані значення F_{ij}^{kl} для кожного варіанта розв'язання завдання повинні бути підсумовані по всіх

варіантах рішення і розглядатися як сумарні навантаження на канал зв'язку, що розглядається .

Відмітимо, що у випадку, коли початкові потоки F_0^k формуються на вузлі вузлом k , а не надходять із зовнішніх джерел, то їх значення співпадають із відповідними елементами матриці тяжіння $\|\lambda_{ij}\|$, тобто, у цьому випадку, її елементи, як правило, задаються в якості вихідних даних.

Відмітимо, що така структура є якоюсь складовою деякої телекомунікаційної мережі, тому її початкові потоки можна використовувати з метою об'єднання окремих складових в більш широку структуру.

2.3 Формування регулярної структури, що має задану зв'язність

На другому етапі розробки моделі топологічної структури здійснюється перехід до формування регулярної структури графа сегмента, який розглядається, зв'язність котрого буде не менше заданої. При цьому слід враховувати, що для кожного подорожнього потоку існує альтернативний маршрут передачі даних шляхом, що містить один або два інших транзитних вузла.

Отримані в попередньому підрозділі співвідношення (2.3) описують статичний розподіл потоків в мережі, граф топологічної структури є повним. Однак таку структуру немає сенсу реалізовувати на практиці через її надзвичайно високу вартість, особливо в випадках, коли така надмірність не потрібна, виходячи із вимог надійності. Звичайно, при такій структурі кожен користувач має можливість зв'язатися з будь-яким другим користувачем самостійним каналом. Це полегшує вирішення завдання маршрутизації повідомлень реалізацію властивості самовідновлення, але часто може бути і недостатнім при деградації якихось компонент мережі. Рівняння (2.3) при локальних відмовах мають надати альтернативні маршрути передачі по непересічних шляхах, що містить один або два транзитних вузла. Завдяки цьому,

рівняння (2.1) можуть легко трансформуватися до менш затратних варіантів формування структури, наприклад, з використанням метода виключення гілок [105], до отримання структури, регулярний граф якої має задану зв'язність.

Так при виключенні зав'язків між усіма вузлами, що складають зовнішній для графа гамільтонів цикл, зв'язність відповідного графа структури буде зменшена на дві одиниці.

При цьому рівняння (2.3) суттєво спростяться, так як частина змінних X_j буде дорівнювати нулю:

$$F_{st} = 0;$$

$$F_{s1} = \sum_{j=1}^{\beta} X_j = 0; F_{\beta t} = \sum_{j=1}^{\beta} X_{\beta j} = 0;$$

$$F_{i(i+1)} = X_{(i-1)(\beta+1)+2} - X_{i(\beta+1)} = 0.$$

Так як змінні $F_{s1}, F_{\beta t}, F_{i(i+1)}$ є ненульовими, то будуть нульовими і всі подорожні потоки $X_j, X_{\beta j}, X_{[(i-1)(\beta-1)+2]}, X_{i(\beta+1)}$, які загалом утворюють відповідні потоки у цій гілці. Так як відбувається суттєве скорочення числа подорожніх потоків, що виступають у якості змінних, система рівнянь становиться виявляється однозначною і має одне рішення.

Даний підхід можна використовувати при вирішенні завдання управління потоками, що пов'язане з модифікацією адаптивних алгоритмів керування, які реагують як на зміни потоків за межами допустимих значень, так і на динамічні зміни стану мережі та її автономних складових. Проблеми, котрі виникають при цьому, пов'язані з тим, що в алгоритмах, орієнтованих на динаміку, процеси, які описують поведінку системи, залежать від рішень, що приймаються, а ці рішення повинні враховувати існуючий на реальний час стан мережі або її складових. Тому для кожних початкових умов буде сформований власний оптимальний розподіл потоків, а для оптимальної маршрутизації необхідно кожного разу розв'язувати завдання оптимізації для нових початкових умов, що не тільки вимагає знати стан мережі кожного поточного моменту, але і, вочевидь, не може бути виконано в реальному часі.

Ця самостійне завдання, не пов'язане з топологічним проектуванням, повинно вирішуватися шляхом модифікації системи керування, що підтримує внутрішню організацію сегмента телекомунікаційної мережі. Слід зауважити, щої в даному випадку необхідно, як при статичному управлінні, зберегти трафік в межах, які задають наявні ресурси при швидкостях передачі, близьких до номінальної величини.

Також слід не відкидати такий фактор, як простота управління інформаційними потоками, котрий знаходиться в прямій залежності від впорядкованості структури.

2.4 Моделювання оптимальної топологічної структури

На третьому етапі за допомогою запропонованої у роботі модифікації методу Туега-Стейгліца вирішується завдання винятку гілок тих напрямків передачі, які недоцільно реалізовувати або які є некритичними для вимог, що пред'являються до сегмента, що розглядаються. При цьому враховуються всі існуючі мережні фрагменти автономного сегмента, що реконфігурується.

Аналіз, проведений в попередньому розділі, показав, що більшість методів формування топологічної структури мережі орієнтовані на опрацювання при реорганізації мереж та їх сегментів не враховуючи суттєвої умови щодо використання існуючих мережних фрагментів, тобто не орієнтовані на реконфігурацію. Крім того, зазвичай не враховуються існуючі канали зв'язку, які використовуються на умовах оренди.

При реконфігурації сегмента мережі, який не обов'язково повинен володіти властивістю самовідновлення, дані обставини зазвичай виявляються несуттєвими, виходячи з того, що замість побудови вартісного окремої лінії зв'язку між парою вузлів у багатьох випадках можна орендувати канал між цими вузлами.

Але прямі напрямки зв'язку, що з'єднують різні вузли комутації, по незалежних трасах є більш кращою пропозицією, виходячи із надійності зв'язку.

Тому при побудові альтернативних незалежних маршрутів слід звертати увагу на облік топологічної структури первинного сегмента. В результаті вирішення даного завдання необхідно мати такі дані:

- всі наявні орендовані засоби зв'язку по вузлах первинного сегмента з відповідними характеристиками;
- результати трасування орендованих засобів зв'язку;
- вартість оренди засобів зв'язку;
- надійнісні характеристики засобів зв'язку первинного сегмента мережі.

Для того, щоб перейти від розгляду визначення місця, де будуть розташовані вузли комутації до виконання умов самовідновлення сегмента телекомунікаційної мережі, необхідно звести тяжіння між абонентами до тяжінь між комутаційними вузлами. Тому завдання моделювання топологічної структури самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі можна сформулювати у наступному вигляді:

Для автономного сегмента телекомунікаційної мережі відомо розташування k комутаційних вузлів. Потрібно сформулювати завдання на обмін інформаційними потоками між всіма цими вузлами, орієнтуючись на відповідну матриці тяжінь $\|\lambda_{i,j}\|, i, j = \overline{1, k}$. Вимоги до якості задані розміром середньої затримки $\bar{T}_{затр}$ та рівнем відмов в обслуговуванні $P_{номр}$. Також необхідно сформулювати декілька альтернативних маршрутів між парами тяготіючих вузлів S і t для передачі інформації, кількість таких альтернативних маршрутів повинна бути не меншою ніж задана. Необхідні канали зв'язку можна виділити із множини вже функціонуючих каналів фрагмента мережі, що реконфігурується. Ще відомі вартість оренди каналів зв'язку і параметри надійності каналу. Необхідно добудувати топологію мережі, яка задовольняє всім вищеперерахованим вимогам, орієнтуючись на те, щоб вартість реконфігурації не вийшла за прийнятні межі. При великих навантаженнях на засоби зв'язку ефективність їхнього використання виявляється дуже великою,

ось чому в цьому випадку об'єднання окремих каналів не дає суттєвого виграшу по низці показників.

Отже, для рішення першого часткового завдання треба сформувати декілька каналів по можливо коротших шляхах між сильно тяготіючими вузлами комутації, з метою виключення можливості перенасичення якихось каналів подорожними інформаційними потоками. Ці канали у разі необхідності додаються до існуючих каналів. У випадку істотної різниці отриманої в результаті топологічної структури та запланованої регулярної структури потрібно здійснити її наступне перетворення з використанням якихось відомих перетворень для того, щоб максимально наблизитися до реальних параметрів сегмента телекомунікаційної мережі.

Найбільш доцільно для цього використати модифікацію метода Туега-Стейгліца, тому що в такому випадку простіше задовольнити вимоги щодо надійності при обмеженнях на вартість. Як допустиму початкову структуру, що задовольняє вимозі за зв'язністю, можна використати регулярну топологічну структуру із фіксованою кількістю вузлів графа з урахуванням існуючих компонент. Потрібно замінити тільки ті гілки, які в кінцевій структурі відсутні, і фізичну реалізацію котрих не можна здійснити.

Основні і найбільш істотні недоліки, пов'язані з вирішенням завдань мережного рівня, а саме, маршрутизації та управління потоками, можуть бути подолані за рахунок використання модифікації метода Туега-Стейгліца.

Розглянемо рішення завдання формування оптимальної топологічної структури в наведеній постановці, використовуючи модифікацію метода Туега-Стейгліца, якщо відомі число k , місця розташування комутаційних вузлів і відомі значення навантажень між парами (i, j) вузлів комутації, що складають матрицю навантажень $\| F_{ij} \|$. В якості критерію оптимізації обирається значення середнього часу затримки $\bar{T}_{затр}$, що визначається формулою Літтла:

$$\bar{T}_{затр} = \frac{1}{\gamma} \sum_{i,j=1}^k N_{i,j}, \quad (2.8)$$

де γ – загальний трафік сегмента; $N_{i,j}$ – число повідомлень, що надходять до гілки (i, j) .

У найпростішому випадку мережі масового обслуговування типа М/М/1 [80], отримуємо

$$\bar{T}_{затр} = \frac{1}{\gamma} \sum_{i,j=1}^k \frac{F_{i,j}}{V_{i,j} - F_{i,j}} \rightarrow \min. \quad (2.9)$$

У якості обмеження будемо використовувати загальну вартість всіх гілок, котра розраховується як

$$D = \sum_{i,j}^k z_{i,j} (a_{i,j} + b_{i,j} F_{i,j}) \leq D_{номр},$$

де $z_{i,j}$ – булева змінна, що визначає завантажена ($z_{i,j} = 1$) чи ні ($z_{i,j} = 0$) гілка (i, j) , а $a_{i,j}, b_{i,j}$ – коефіцієнти пропорційності.

Використаємо для розв'язку метод Лагранжа. Прирівнявши до нуля значення часткових похідних $\frac{\partial \Phi}{\partial F_{i,j}} = 0$, отримуємо

$$F_{i,j}^* = V_{i,j} + d \sqrt{V_{i,j}}, \quad (2.10)$$

де $d = \left(D_{номр} - \sum_{i,j=1}^k (z_{i,j} a_{i,j} + b_{i,j} V_{i,j}) \right) / \left(\sqrt{b_{i,j}} \sum_{i,j=1}^k \sqrt{b_{i,j} V_{i,j}} \right)$.

Тоді значення мінімального середнього часу затримки з урахуванням (2.9) і (2.10) можна розрахувати таким чином:

$$\bar{T}_{затр}^{\min} = \frac{k}{\gamma d} \left(-1 + \frac{1}{k} \sum_{i,j=1}^k \sqrt{V_{i,j}} \right).$$

Отже, запропонований метод формування оптимальної топологічної структури за критерієм мінімізації середнього часу затримки при розробці відповідної моделі дозволяє визначити яким чином залежать пропускні здатності маршрутів від навантаження, а також мінімізувати показник якості – значення середнього часу затримки. Регулярний граф, що отриманий у попередньому

підрозділі, є початковою структурою в роботі процедури. Надалі робота алгоритму за методом Туега-Стейгліца не змінюється, а пошук допустимих X -трансформацій відбувається у такому ж порядку, доки не буде знайдена оптимальна топологічна структура сегмента мережі, що розглядається. Поєднання умов (2.1) і (2.10) дозволяє шляхові потоки вважати оптимальними, а отриманий статичний розподіл потоків розглядати як модель оптимальної маршрутизації. Вимога до самовідновлювальності сегмента наводиться як мінімально необхідна кількість альтернативних шляхів проходження інформаційних потоків між всіма парами взаємодіючих вузлів, причому один із альтернативних шляхів не має спільних проміжних вузлів з основним маршрутом.

2.5 Моделювання процесу нарощування структури самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі

Самовідновлювальний сегмент телекомунікаційної мережі, що реконфігурується, повинен задовольняти вимозі масштабованості. Це дає змогу у конкретному випадку застосування цієї властивості розширювати або стискати первинну структуру сегмента або його складових. При цьому для структури сегмента та відповідного масштабу визначена велике число різноманітних факторів, з яких основними є такі: розподілене розташування абонентів, характеристики потоків інформації, якою вони обмінюються, параметри, що характеризують надійність та якість обслуговування, а також економічні обмеження. У автономних сегментах великомасштабних телекомунікаційних мереж визначальними зазвичай є інформаційні потоки, котрі надходять із центрів управління та до центрів управління. Тому в топологічній структурі територіально розподіленого сегмента необхідно передбачити потужні напрями, котрі зв'язують магістральні та локальні вузли комутації. Отже, у автономному сегменті всі напрямки до центрів керування повинні забезпечувати інформаційний обмін між віддаленими фрагментами, використовуючи

мінімальну кількість транзитних вузлів, тобто бути сильно зв'язними у структурі графа. Для забезпечення тяжіння між сусідніми локальними фрагментами сегмента необхідно організовувати, якщо є така можливість, прямий зв'язок з метою зменшення навантаження на магістралі. Дані зв'язки можна використовувати як для підвищення надійності передачі інформації у сегменті, так і для реалізації вимог щодо самовідновлюваності, тому що при відмові якихось магістральних напрямків можуть бути використані для організації обходів.

Значні проблеми виникають при організації взаємодії локальних фрагментів розподіленого сегмента, котрі побудовані на різних базових принципах. Якщо при відсутності гетерогенності подібну взаємодію можна здійснювати аналогічними вузлами комутації з використанням стандартних протоколів обміну, то для організації обміну між гетерогенними локальними сегментами необхідно використовувати спеціальне програмне та апаратне забезпечення, котре буде здійснювати всі стандартні функції протоколів обміну абонентами таких фрагментів, тобто потрібна наявність спеціальних шлюзів між ними. Шлюзи елементи автономного сегмента забезпечать сумісність різних його структурних елементів, які мають різні протоколи обміну. Отже, в такому випадку засоби зв'язку можна пов'язати у ієрархічну структуру, що звільнить дорожчі магістральні канали від частини транзитних інформаційних потоків.

Якщо система зв'язку розглядаємого автономного сегмента має велику розмірність, то деякі її автономні фрагменти можна формувати як елементи розподіленої структури. Але використання даного підходу для всього сегмента невиправдано буде ускладнювати його структуру. Це, в свою чергу, збільшує вимоги до зв'язності, а отже призводить до невиправданого збільшення розмірності розв'язуваного завдання щодо управління потоками, внаслідок чого різко зростають розміри транзитних шляхів, а, отже, і збільшується час, потрібний для виконання транзакцій системи та її абонентів.

Серед рішень, які задовольняють вищеперерахованим вимогам, можна виділити коміркову структуру. Така структура на сьогодні використовується у гіперконвергентних мережах та їх складових.

Найпростішою моделлю системи зв'язку, що має коміркову структуру, є повний граф з чотирма вузлами (рис. 2.2). Його діагональні елементи використовуються для розвитку структури системи зв'язку в «ширину», тобто для горизонтального масштабування фрагмента сегмента, що розглядається (рис. 2.3). Цей граф має таку зв'язність $p = 2$, якщо визначати зв'язність як найбільшу кількість ребер графа, видалення котрих не призведе до втрати даної властивості.

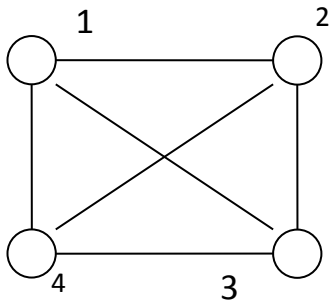


Рис. 2.2. Повний граф з чотирма вузлами

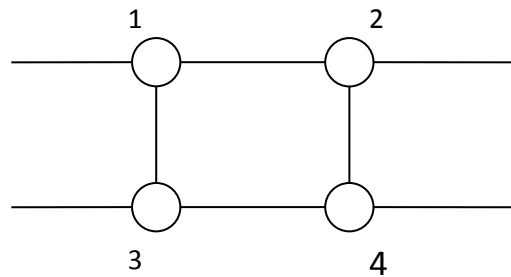


Рис. 2.3. Горизонтальне масштабування системи зв'язку

Вочевидь, що при такому підході до горизонтального масштабування довільної протяжності «в ширину» формуємо структура повинна містити парне число вузлів k , тобто $k = 2\vartheta$, де ϑ – натуральне число, що є діаметром отриманого графа. Горизонтальне масштабування можна здійснити за рахунок перетворення у регулярний граф повного графа, причому зв'язність вихідного графа є такою:

$$p_{рег} = p - 2,$$

де p – зв'язність вихідного повного графа.

Якщо повний граф має досить велику розмірність, то для переходу до коміркової структури потрібно виключити гілки, котрі утворюють декілька гамільтонових циклів:

$$k - 1 - 2v = 3 \Rightarrow v = \frac{k - 4}{2},$$

де v – число гамільтонових циклів повного графа, які виключаються.

Наприклад, при десятивузловому повному графі системи зв'язку автономного самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі число гамільтонових циклів, котрі виключаються, буде таким (рис. 2.4)

$$v = \frac{10 - 4}{2} = 3.$$

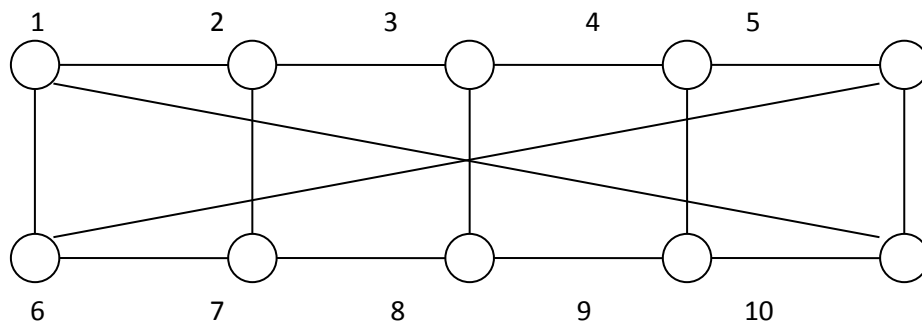


Рис. 2.4. Десятивузловий регулярний граф

Сумарне число гілок, котрі містить отриманий регулярний граф, визначається як:

$$N_{\text{заг}} = \frac{k(k-1)}{2} - v \cdot k = \frac{k(k-1)}{2},$$

причому отриманий граф має діаметр $\theta = \frac{k}{2}$.

Узагальнений вигляд регулярний граф коміркової структури, котрий буде отриманим при числі вузлів k повного графа, наведений на рис. 2.5.

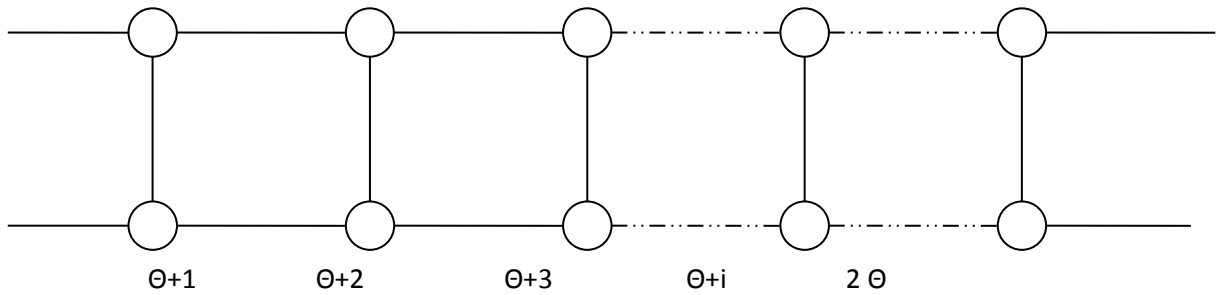


Рис. 2.5. Регулярний граф комірчастої структури, що має k вузлів

Але для розширення коміркової структури може знадобитися і вертикальне масштабування, або розширення в «глибину». З огляду на ієрархічність побудови системи зв'язку сегмента, надамо умовні позначення вузлам структури таким чином: перша цифра у позначенні – це відповідний номер рівня; друга цифра – це номер вузла на відповідному рівні ієрархії.

У результуючій структурі буде зв'язність $p=3$ (рис. 2.6). Обмін між її гетерогенними компонентами здійснюється за допомогою відповідних шлюзів (позначені на рис. 2.6 буквою «Ш»), які узгоджують різні за протоколами обміну розподілені фрагменти автономного сегмента телекомунікаційної мережі. З метою досягнення однорідності структури в системі зв'язку можуть бути організовані горизонтальні та вертикальні напрямки, котрі з'єднують кінцеві вузли. Це зменшує діаметр кінцевої структури приблизно в 2 рази (пунктир на рис. 2.6).

Узгодження зональних сегментів за трафіком здійснюється величиною початкового потоку F_{0i} за умови того, що для кожного i -го вузла виконується закон збереження потоку.

У цьому випадку результати розрахунків, отримані в підрозділах 2.1-2.3 в цілому справедливі для сегмента, що розглядається.

Якщо в остаточній структурі деякі напрямки передачі інформації не можна реалізувати, то структура (рис. 2.6) може прийняти вид «неправильної решітки»

[102]. Для її подальшого перетворення також можна застосувати модифікацію метода Туега-Стейгліца [84].

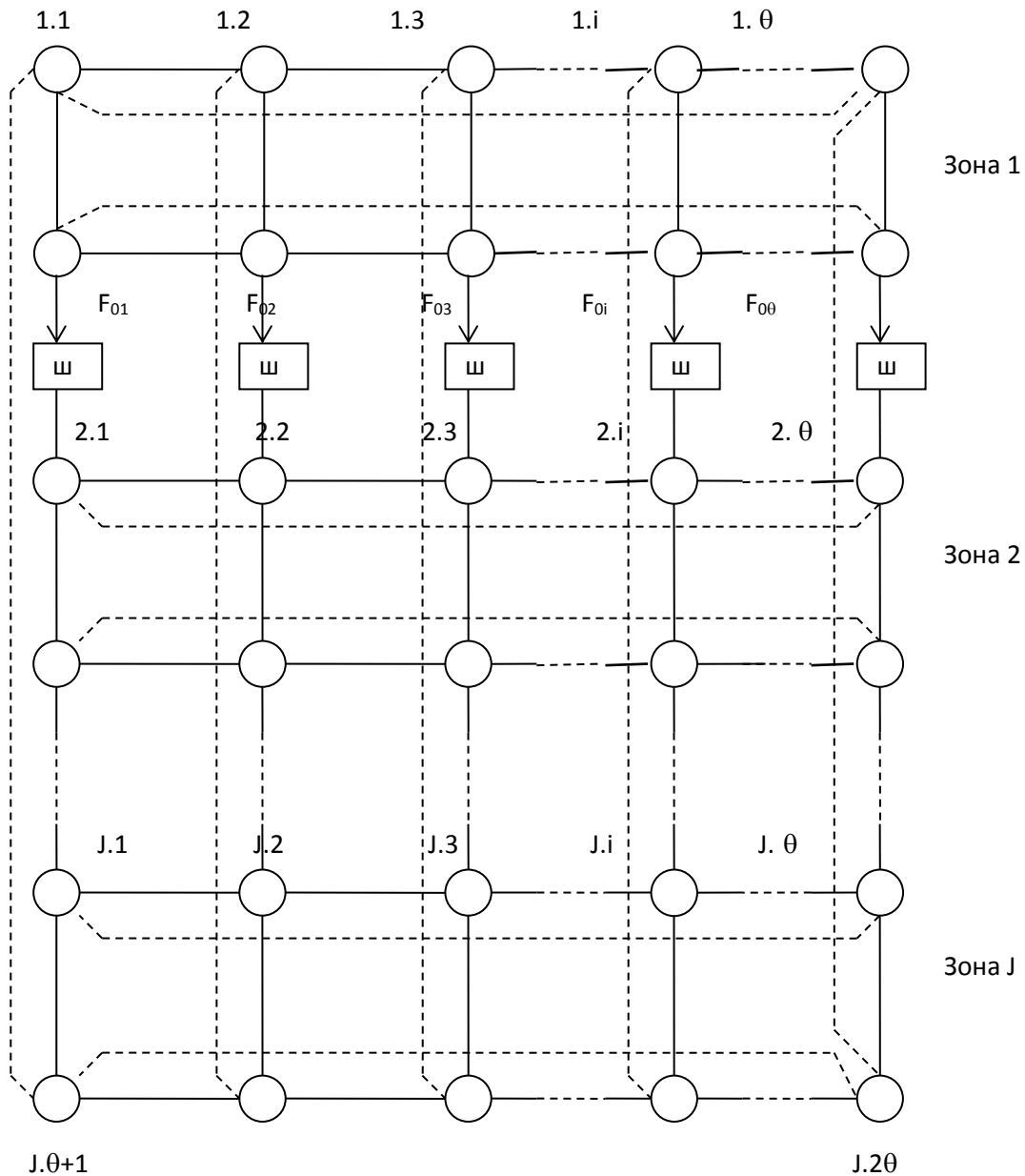


Рис. 2.6. Приклад коміркової структури системи зв'язку

Висновки за розділом 2

У розділі розроблений і досліджений комплекс моделей топологічної структури самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі, який

дозволяє сформувати регулярну структуру сегмента заданої зв'язності, що дозволяє виконати вимоги QoS щодо надійності та реалізувати процес нарощування структури при нестачі обчислювальних ресурсів. Проведені в розділі дослідження дозволили отримати такі результати.

У підрозділі 2.1 сформульована загальна постановка завдання моделювання автономного самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі. В даній постановці формування топологічної структури самовідновлювального сегмента мережі здійснюється в три етапи, причому спочатку розглянутий повний граф сегмента, що розглядається, надалі здійснюється перехід до графа, що має регулярну структуру, а також зв'язність, не менше заданої, а потім формується топологічна структура сегмента, оптимальна за обраним критерієм.

У підрозділі 2.2 запропонована математична модель розподілу подорожніх потоків між виділеною парою взаємодіючих абонентів в мережі, граф топологічної структури якої є повним, що базується на модифікованому симплекс-методі з обмеженням на максимальну кількість транзитних вузлів у кожній складовій поточного потоку. При цьому для цієї пари знаходиться як мінімум два незалежних маршрути, які необхідні для виконання умови самовідновлюваності сегмента. Надалі даний підхід застосовується для кожної пари абонентів, що обмінюються інформацією. Завершенням першого етапу моделювання є сформована топологічна структура сегмента з розрахованими пропускними здатностями каналів зв'язку при припущенні повності сегмента, що розглядається.

У підрозділі 2.3 реалізований другий етап розроблення моделі топологічної структури. На цьому етапі здійснюється перехід до регулярної структури графа сегмента мережі, у якого зв'язність не менше заданої та враховується умова, що для кожного подорожнього потоку існує альтернативний маршрут передачі даних. При цьому серед можливих структур обирається менш затратна за допомогою методу виключення гілок, яка використовується в якості початкової для третього етапу.

У підрозділі 2.4 реалізований третій етап моделювання, на якому запропонована математична модель оптимальної топологічної структури. За допомогою запропонованої модифікації метода Туега-Стейгліца вирішується завдання винятку з регулярної структури графа гілок тих напрямків передачі, реалізація яких є недоцільною. Подорожній потік визначається мінімальною пропускною спроможністю гілки у відповідному маршруті. Пропускна спроможність на кожному маршруті перевершує потік в даній на величину, пропорційну кореню квадратному з величини цього потоку, що не тільки необхідно для запобігання перевантажень, але й забезпечує мінімальний час доставки інформації. При цьому шляхові потоки є оптимальними, а, отже, отриманий статичний розподіл потоків можна розглядати як модель оптимальної маршрутизації. При такому статичному розподілі потоків правильно розрахована структура сегмента запобігає перевантаженню без участі спеціально організованої системи управління, що координує потоки по всій розподіленій системі, а також сприяє самовідновленню при її порушеннях.

У підрозділі 2.5 розглянута модель процесу нарощування структури самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі, статична топологічна структура якого є відомою. Дана модель використовується при збільшенні розмірів (масштабу) системи зв'язку з використанням графів, що мають регулярну структуру, і отримання багаторівневої ієрархічної топологічної коміркової структури.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ РЕСУРСІВ САМОВІДНОВЛЮВАЛЬНОГО СЕГМЕНТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ

В розділі розглянуті четверте та п'яте завдання дослідження та доведені другий та третій наукові результати: удосконалений та досліджений комплекс методів реконфігурації самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі, а також набув подальшого розвитку метод перерозподілу ресурсів самовідновлювального сегмента при пульсуючому характері трафіка. Для реконфігурації сегмента використані такі методи, що удосконалені за рахунок сумісного використання властивостей локальної самовідновлюваності та горизонтальної масштабованості: метод розрахунку мінімальної середньої затримки повідомлень; метод визначення ширини смуги пропускання; метод визначення сгладжуючого впливу кількості буферних елементів черг на завантаження каналів. Також набув подальшого розвитку метод перерозподілу ресурсів сегмента при пульсуючому характері трафіка за рахунок використання спектральних властивостей процесу передачі даних. Дані методи дозволили виконати вимоги QoS щодо часу середньої затримки повідомлень та уникнути втрат пакетів при перевантаженні каналів зв'язку.

3.1 Метод розрахунку мінімальної середньої затримки повідомлень при реконфігурації самовідновлювального сегмента

Основною причиною перевантажень у телекомунікаційних мережах є кінцеве число буферних елементів черг у вузлах комутації та недостатність каналного ресурсу, пов'язана як із шириною смуги пропускання, так і з вартістю орендованих каналів. Постановка завдання з необмеженими вузловими ресурсами дає дуже завищені значення часу середньої затримки повідомлень, а обмеження обсягу буферів при інших рівних умовах дозволяє передавати

мережею більш значні інформаційні потоки [66, 85]. При цьому обмеження кількості буферних елементів черг скорочує час середньої затримки за рахунок зменшення часу перебування пакета в черзі, однак обмежує можливість передачі довгих повідомлень методами з проміжним накопиченням, коли довжина повідомлення може перевищити обсяг буферного елемента черги, необхідної для забезпечення оптимального рішення. Виходом з цього положення є використання комбінованих методів комутації, наприклад, в пакетній мережі довгі повідомлення транспортувати методом гібридної комутації. З іншого боку, спроба знайти рішення даного завдання при обмеженні на кількість місць у черзі не дозволяє отримати аналітичне рішення при обмеженні вартості орендованих каналів зв'язку через складність отриманого функціонала оптимізації для відомих видів функції вартості.

З метою спрощення функціоналу оптимізації і забезпечення можливості отримання наближеного до оптимального вирішення задачі, в даному підрозділі пропонується використовувати в якості обмежень умови вартості передачі обсягу інформації, котрий припадає на умовну одиницю пропускну здатності. Тоді сумарна кількість переданої інформації буде визначати загальний дохід від використання засобів зв'язку. Загальна вартість мережі може визначатися на заключному етапі проектування, що обчислюється, наприклад, як сума розмірів смуг пропускання. Такий підхід дозволить визначити терміни окупності мережі з урахуванням витрат на її реалізацію і дохід від її експлуатації.

Використовуючи формулу Літгла та опираючись на апроксимацію Клейнрока [22, 127], представимо черги пакетів, що надходять до кожного каналу зв'язку, як систему масового обслуговування (СМО) типу М/М/1 з очікуванням. Припустимо, що на вхід i -ої черги буде надходити пуассонівський потік пакетів, що має інтенсивність λ_i (пакетів/сек) і час середнього обслуговування повідомлень μ_i за секунду, випадкова величина якого розподілена по експоненціальному закону. З огляду на коефіцієнт використання каналу (завантаження мережі) $\rho_i = \lambda_i / \mu_i$, відносна ширина смуги пропускання

(тобто математичне сподівання частки пакетів, котрі надійшли, які обслуговуються системою) визначається [33] як

$$\bar{g}_i = \frac{1 - \rho_i^{m_i+1}}{1 - \rho_i^{m_i+2}}, \quad (3.1)$$

де m_i – реально визначене число місць у черзі.

Тоді середнє число заявок в черзі визначається як:

$$\bar{r}_i = \frac{\rho_i^2 [1 - \rho_i^{m_i} (m_i + 1 - m_i \cdot \rho_i)]}{(1 - \rho_i^{m_i+2}) (1 - \rho_i)}, \quad (3.2)$$

а час середньої затримки \bar{T}_i , що дорівнює часу перебування запиту у системі, розраховується за такою формулою [36]:

$$\bar{T}_i = \bar{r}_i / \lambda_i + \bar{g}_i / \mu_i, \quad (3.3)$$

Враховуючи отримані вирази (3.1) и (3.2) вираз (3.3) після декількох простих перетворень набуває вигляду:

$$\bar{T}_i = \frac{1}{\mu_i} \frac{1 - \rho_i^{m_i+1} [(m_i + 2) - \rho_i (m_i + 1)]}{(1 - \rho_i^{m_i+2}) (1 - \rho_i)}. \quad (3.4)$$

Введемо такі позначення:

$$\sum_{k=0}^{m_i+1} \rho_i^k = \frac{1 - \rho_i^{m_i+2}}{1 - \rho_i} = \Sigma_{m_i}, \quad \Sigma' = \frac{\partial \Sigma}{\partial \rho},$$

де Σ_{m_i} – сума відповідної геометричної прогресії, а Σ' – відповідна похідна.

Тоді вираз (3.4) можна надати у такому вигляді:

$$\bar{T}_i = \frac{1}{\mu_i} \cdot \frac{\sum_{\alpha=0}^{m_i} (1 + \alpha) \rho_i^\alpha}{\sum_{\alpha=0}^{m_i+1} \rho_i^\alpha} = \frac{1}{\mu_i} \cdot \frac{\left(\sum_{\alpha=0}^{m_i+1} \rho_i^\alpha \right)'}{\sum_{\alpha=0}^{m_i+1} \rho_i^\alpha} = \frac{1}{\mu_i} \frac{\Sigma'_{m_i}}{\Sigma_{m_i}}. \quad (3.5)$$

Час середньої затримки запитів, розрахований відповідно всіх запитів, що надходять до сегмента телекомунікаційної мережі, що розглядається, є таким:

$$\bar{T} = \frac{1}{\gamma} \sum_{i=1}^k \rho_i \cdot \left(\sum_{\alpha=0}^{m_i+1} \rho_i^\alpha \right)' / \sum_{\alpha=0}^{m_i+1} \rho_i^\alpha = \frac{1}{\gamma} \sum_{i=1}^k \rho_i \frac{\sum' m_i}{\sum m_i}. \quad (3.6)$$

Залежність (3.6), якщо $m_i \rightarrow \infty$, є відомою формулою

$$\bar{T} = \frac{1}{\gamma} \sum_{i=1}^k \frac{\rho_i}{1 - \rho_i},$$

яка відповідає моделі сегмента мережі, що розглядається як система масового обслуговування, що має необмежений розмір черги [43], а якщо $m_i = 0$, то

$$\bar{T} = \frac{1}{\gamma} \sum_{i=1}^k \frac{\rho_i}{1 + \rho_i},$$

що відповідає такій моделі сегмента мережі, яка може відмовити в обслуговуванні [54, 59].

Функція, що описана виразом (3.6) – опукла функція, котра не має екстремумів, тому мінімум часу середньої затримки запиту неможливо знайти з використанням часткових похідних, отже, ця задача є задачею умовної оптимізації. Точне розв'язання цієї задачі є можливим при відповідному виборі обмежуючої умови для функції вартості. Числові розрахунки [99] показали, що немає значної різниці між підходами з використанням вартісних функцій того чи іншого виду, тому можна обирати таку функцію вартості, котра у найбільшому обсязі буде відповідати умовам розглядаємої задачі. Тому будемо розглядати вартісну функцію [99] такого вигляду:

$$D = v \sum_{i=1}^k \frac{F_i}{V_i}, \quad (3.7)$$

де для процесу передачі повідомлень

$$F_i = L\lambda_i, \quad V_i = L\mu_i,$$

L – фіксований розмір пакета, v – коефіцієнт.

Вважаючи на це, функцію вартості (3.7) можна надати у такому вигляді:

$$D = v \sum_{i=1}^k \rho_i \quad (3.8)$$

і виразити в одиницях, які відповідають значенню щільності інформаційного потоку, що відповідає прийнятим принципам сплати за використання засобів зв'язку. Отже, оптимізаційне завдання можна сформулювати у наступному вигляді: розрахувати значення щільності потоку інформації, яке мінімізує середню затримку

$$\bar{T} = \frac{1}{\gamma} \sum_{i=1}^k \rho_i \frac{\sum' m_i}{\sum m_i} \rightarrow \min \quad (3.9)$$

при існуванні обмеження щодо вартості передачі обсягу інформації ($D_{номр}$), котрий припадає на одиницю ширини смуги пропускання:

$$D = v \sum_{i=1}^k \rho_i \leq D_{номр}. \quad (3.10)$$

Для розв'язку цієї задачі будемо використовувати метод Лагранжа з введенням невизначених множників. Для цього складемо відповідний функціонал оптимізації:

$$\Phi = \frac{1}{\gamma} \sum_{i=1}^k \rho_i \frac{\sum' m_i}{\sum m_i} + Pv \sum_{i=1}^k \rho_i, \quad (3.11)$$

де P – невизначений множник.

Після того, як обчислимо часткові похідні $\frac{\partial \Phi}{\partial \rho_i} = 0$, отримаємо систему, що

складається із k рівнянь такого вигляду:

$$\left(\rho_i \frac{\sum' m_i}{\sum m_i} \right)' + \gamma Pv = 0, \quad i = \overline{1, k}, \quad (3.12)$$

Проаналізувавши вираз (3.12) бачимо, що всі рівняння, які входять до даної системи, залежать від конкретної змінної ρ_i та низки параметрів m_i, γ, P, v . Якщо для спрощення покласти $m_i = m$, тобто зробити однаковим для всієї множини вузлів, то дані характеристики не будуть залежати від індексу i , тобто розв'язуючи дану систему відносно ρ_i , отримуємо

$$\rho_i = F(m, \gamma, P, v).$$

Отже, можна зробити такий висновок:

$$\rho_i^{onm} = \rho = const,$$

тобто при прийнятих допущеннях оптимальні значення щільності інформаційного потоку однакові для всіх маршрутів і не залежать від номера маршруту, що характерно для ізотропної мережі.

Провівши диференціювання та низку простих перетворень отримаємо диференціальне рівняння другого порядку для кожного маршруту. Відкидаючи індекс i , маємо

$$\frac{\Sigma'_m}{\Sigma_m} + \rho \frac{\Sigma''_m}{\Sigma_m} - \rho \frac{(\Sigma'_m)^2}{\Sigma_m^2} + \gamma P v = 0. \quad (3.13)$$

Ввівши позначення для змінних у цьому рівнянні

$$\frac{\Sigma'_m}{\Sigma_m} = Z \quad \text{та} \quad \Sigma''_m = Z' \Sigma_m + Z \Sigma'_m \quad (3.14)$$

отримаємо таке лінійне рівняння:

$$Z' + \frac{1}{\rho} Z = -\frac{1}{\rho} \gamma P v. \quad (3.15)$$

Загальний розв'язок рівняння (3.15) знаходиться методом варіації змінної [16]. Відповідне однорідне рівняння є таким:

$$Z' + \frac{1}{\rho} Z = 0, \quad (3.16)$$

та має таке рішення:

$$Z = \frac{a_1}{\rho}. \quad (3.17)$$

Нехай $a_1 = a_1(\rho)$, тобто є деякою неперервно диференцуюмою функцією від ρ , тоді

$$Z = \frac{a_1(\rho)}{\rho}. \quad (3.18)$$

Визначимо функцію $a_1(\rho)$ таким чином, щоб вираз (3.18) задовольняв рівнянню (3.15). Підставивши (3.18) до (3.15) та виконавши низку перетворень, отримаємо, що

$$a_1(\rho) = \gamma P v. \quad (3.19)$$

Інтегруючи (3.19), отримаємо

$$a_1(\rho) = -\gamma P v \rho + a_2,$$

отже,

$$Z = -\gamma P v + \frac{a_2}{\rho}. \quad (3.20)$$

Вертаючись до початкових змінних із (3.15), отримаємо:

$$\partial \Sigma'_m / \Sigma_m = -\gamma P v + (a_2 / \rho). \quad (3.21)$$

Розділивши в цьому виразі змінні, отримаємо таке рівняння:

$$\frac{d \Sigma_m}{\Sigma_m} = -\gamma P v d\rho + a_2 \frac{d\rho}{\rho},$$

інтегруючи котре, маємо

$$\Sigma_m = a_3 \rho^{a_2} \cdot e^{-\gamma P v \rho}, \quad (3.22)$$

де a_3 – постійна інтегрування другої квадратури.

Із рівняння (3.22) можна знайти значення довільних постійних інтегрування a_2 та a_3 розв'язуючи задачу Коши для заданих початкових умов.

У подальших розрахунках обмежимося залежністю (3.22), з якої визначені значення для кожного маршруту розглянутого сегмента:

$$\rho = \frac{a_2}{\gamma P v + \left(\Sigma'_m / \Sigma_m \right)}. \quad (3.23)$$

Значення a_2 розрахуємо, виходячи із початкової умови $\rho_o = 1$ та рівняння (3.6):

$$\left(\Sigma'_m / \Sigma_m \right) \Big|_{\rho=1} = \frac{1 + 2 + \dots + (m+1)}{m+2} = \frac{(m+1)(m+2)}{2(m+2)} = \frac{m+1}{2}. \quad (3.24)$$

У цьому виразі враховано, що чисельник є сумою арифметичної прогресії. Ця умова дозволяє визначити довільну постійну a_2 із рівняння (3.23):

$$a_2 = \gamma P v + \frac{m+1}{2}.$$

Отже,

$$\rho = \left(\gamma P v + \frac{m+1}{2} \right) / \left(\gamma P v + \left(\frac{\sum'_m}{\sum_m} \right) \right). \quad (3.25)$$

Для визначення невизначеного множника Лагранжа скористаємося умовою (3.10) для граничного значення вартості:

$$v \sum_{i=1}^n \frac{\gamma P v + (m+1)/2}{\gamma P v + (\sum'_m / \sum_m)} = v n \cdot \frac{\gamma P v + (m+1)/2}{\gamma P v + (\sum'_m / \sum_m)} = D_{номр}.$$

Після перетворень отримуємо значення множника Лагранжа P :

$$P = \frac{(m+1)/2 - (\sum'_m / \sum_m) \cdot (D_{номр} / v n)}{\gamma v ((D_{зад} / v n) - 1)}. \quad (3.26)$$

Підставивши (3.26) в (3.25), отримуємо умови екстремумів \bar{T}_i у виразі (3.6):

$$(\rho_{опт} - D_{номр} / (v n)) \cdot ((m+1)/2 - \sum'_m / \sum_m) = 0. \quad (3.27)$$

Ці умови виконуються, якщо якийсь із множників дорівнює нулю, тобто

$$\rho_{опт} \cdot D_{номр} / (k v) = 0 \quad (3.28)$$

або

$$\sum'_m / \sum_m - (m+1)/2 = 0. \quad (3.29)$$

Умова (3.28) визначає оптимальне значення питомого потоку на маршрутах, тобто:

$$\rho_{опт} = \frac{D_{номр}}{v n}, \quad (3.30)$$

що забезпечує мінімум часу середньої затримки:

$$\bar{T}^{\min} = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{D_{номр}}{v} \cdot \left(\frac{\sum'_m}{\sum_m} \right)_{опт}, \quad 0 < \rho_{опт} < 1. \quad (3.31)$$

Умова (3.29) відповідає максимальному значенню затримки на маршрутах самовідновлювального сегмента при $\rho=1$, $\bar{T}^{\max} = (n/\gamma) \cdot (m+1)/2$, котре буде досягнутим незалежно від вартості проведення реконфігурації.

Виходячи із отриманих результатів (3.31) зробимо висновок, що основними складовими вартості при експлуатації реконфігурованого сегмента є витрати на передачу даних, отже, вважаючи на це, обчислювальні ресурси треба максимально ефективно використовувати. Аналізуючи вираз (3.30) зробимо висновок щодо ізотропності системи зв'язку сегмента, тобто сталості значень щільності інформаційних потоків, які передаються по усім маршрутам. Якщо інформаційні потоки по маршрутах при реконфігурації сегмента задати матрицею тяжінь, то маючи фіксовану довжину пакета L можна розрахувати ширину смуги пропускання відповідних маршрутів, виходячи із прямої пропорційності відповідних значень:

$$V_i = (vn/D_{nomp}) \cdot F_i. \quad (3.32)$$

Дана умова є необхідною для виконання вимоги щодо відсутності блокування маршрутів сегмента (тобто $V_i > F_i$).

Виходячи із виразу (3.32) можна зробити висновок щодо справедливості зробленого припущення щодо незалежності значення m від номера вузла або маршруту. Дійсно, бачимо, що збільшення або зменшення значення F_i призводить до пропорційного збільшення або зменшення значення ширини смуги пропускання, внаслідок чого більш швидко звільнюються або заповнюються буфери, отже число вимог на вході до кожного маршруту є незмінним, тобто постійним виявляється необхідне число буферів.

Результати аналізу розрахунку мінімальних значень середньої затримки повідомлень \bar{T}^{\min} згідно наведеному вище методу наведені на рис. 3.1. Для різної кількості буферних елементів у черзі окремого маршруту m значення \bar{T}^{\min} , розраховані в залежності від оптимального значення коефіцієнту питомого завантаження сегмента ρ , наведені на верхній півплощини системи координат рис. 3.1. Припущення про необмежену кількість буферів дозволило отримати верхню границю затримки, котру можна досягти, збільшуючи кількість буферних елементів черги. Для затримки у сегменті, що не дозволяє існування

черг, можна побачити нижню границю затримки, але слід зауважити що це практично неминуче призведе до втрати частини пакетів, які будуть відкинуті вузлом комутації системи зв'язку сегмента. Ймовірність такої відмови $P_{відм}$ в залежності від значень коефіцієнту питомого завантаження сегмента ρ , наведені на нижній півплощини системи координат рис. 3.1, тобто на цьому рисунку суміщені криві залежностей $P_{відм}(\rho)$ та $\bar{T}^{\min}(\rho)$, котрі побудовані для декількох різних значень кількості буферних елементів у черзі окремого маршруту m , при цьому ймовірність відмови розраховувалася у відповідності з таким стандартним виразом:

$$P_{відм}(\rho, m) = \rho^{m+1} / \sum_{i=0}^{m+1} \rho^i. \quad (3.33)$$

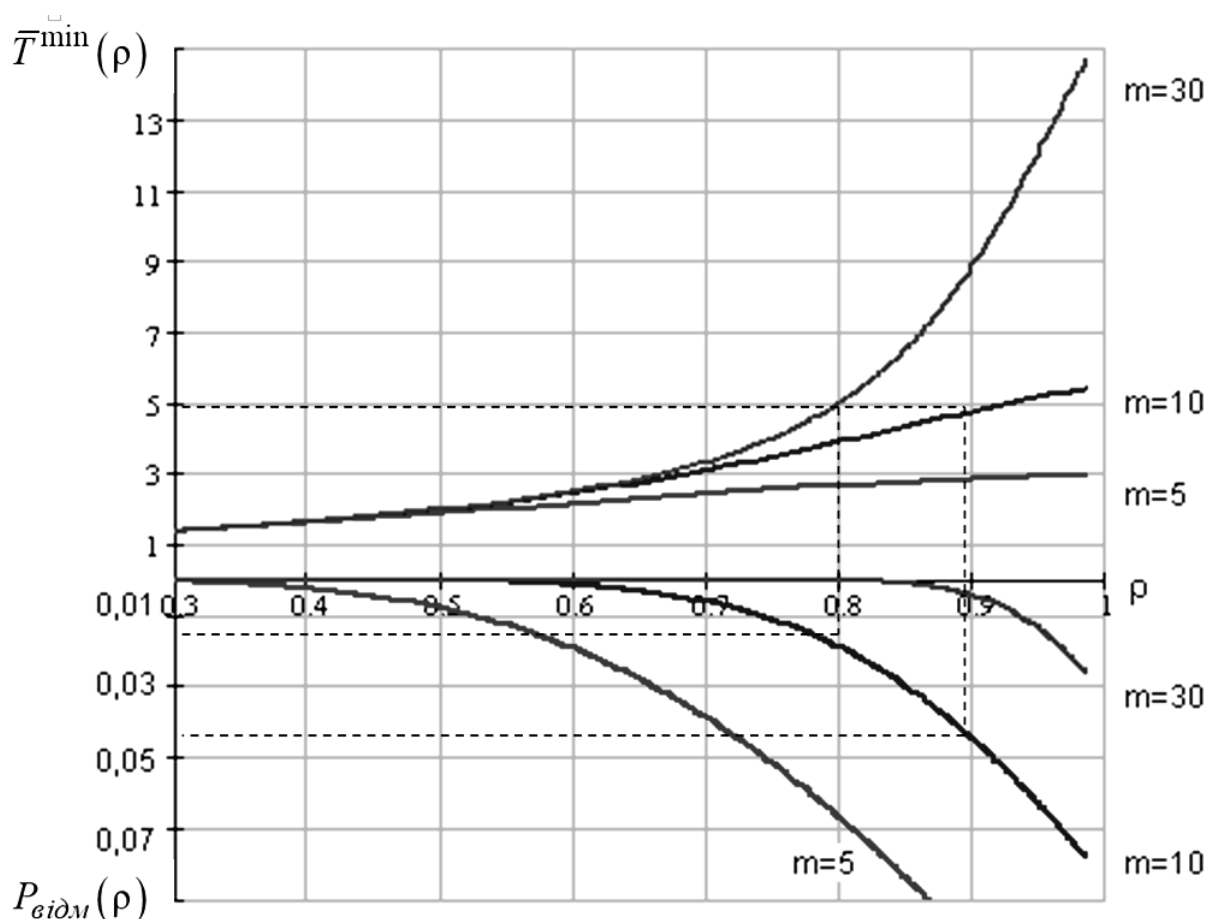


Рис. 3.1. Аналіз значень мінімальної середньої затримки повідомлень

Послідовність дій для розрахунку мінімальної середньої затримки наведена на схемі рис. В.2 (додаток В).

Розглянемо приклад. Нехай значення мінімальної середньої затримки повідомлень дорівнює 5 умовним одиницям часу, тобто $\bar{T}^{\min}(\rho) = 5$. На рис. 3.1 вона відповідає двом значенням m та відповідному завантаженню сегмента:

$$\rho' = 0,8 \quad \text{при} \quad m = 30 \quad \Rightarrow \quad P_{\text{відм}} = 0.015; \quad (3.34)$$

$$\rho'' = 0,9 \quad \text{при} \quad m = 10 \quad \Rightarrow \quad P_{\text{відм}} = 0.045. \quad (3.35)$$

Якщо значення ймовірності відмови в обслуговуванні пакета, отримана у (3.35) є прийнятною, то кількість буферних елементів черг можна зменшити у три рази, що дасть суттєвий економічний ефект.

Отже, отримані аналітичні вирази (3.30) – (3.33) дозволяють у випадку заданого значення вартості передачі інформаційної одиниці обрати необхідну кількість буферних елементів черги і оптимальне значення щільності інформаційного потоку, який забезпечує мінімум середньої затримки передачі повідомлень у самовідновлювальному сегменті телекомунікаційної мережі.

3.2 Метод визначення ширини смуги пропускання при реконфігурації самовідновлювального сегмента

При всіх позитивних тенденціях СвС припускають надмірність Software and Hardware. Крім того, система моніторингу вимагає незначних, але постійних витрат обчислювального ресурсу. Це призводить до зниження показників QoS [11, 44]. Тому необхідні нові моделі і методи обробки даних, орієнтовані на специфіку СвС. Зокрема, одним із низки таких завдань є розробка методу визначення ширини смуги пропускання самовідновлювального сегмента мережі, який орієнтований на врахування специфічних властивостей самовідновлювальних систем. Використання точних методів розв'язання задачі визначення ширини смуги пропускання самовідновлювального сегмента мережі [47, 50, 52] при існуючих можливостях ЕОМ обчислювальної техніки неможливо. Підходи до розрахунку ширини смуги пропускання, запропоновані у [122], припускають локальне масштабування мережних фрагментів як

вертикальне, так і горизонтальне, але не орієнтовані на врахування властивості самовідновлення. Методика розрахунку, розглянута у [118], орієнтована на вузькоспеціалізовані мережі. Низку методів розрахунку, наведених у [17, 26], можна застосовувати лише при наявності у мережі фрактального або самоподібного трафіка. Для використання методики розрахунку, запропонованої у [39], необхідно наявність оперативних емпіричних даних, що не відповідає наведеній вище постановці завдання. Отже на сьогодні існуючі методики визначення ширини смуги пропускання не орієнтовані на самовідновлювальні сегменти мережі

Отже, в даному підрозділі пропонується метод визначення ширини смуги пропускання самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі при обмежених мережних ресурсах за критерієм забезпечення мінімального часу доставки інформації при заданій ймовірності втрат.

Самовідновлювальний сегмент телекомунікаційної мережі моделюються у вигляді системи масового обслуговування (СМО) типу $M/M/n$ з обмеженою чергою (n -канальна СМО з очікуванням), яка обслуговує пуассонівський потік запитів з сумарною інтенсивністю λ , інтенсивністю обслуговування для кожного каналу μ і числом місць у черзі, що дорівнює m . Черги пов'язані зі входом до кожного сегменти, який утворений пучком із n каналів і колективно використовуваною пам'яттю в кожному напрямку, що містить m стандартних елементів пам'яті. Для кожного самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі середня кількість зайнятих каналів визначається як

$$\bar{z} = \rho \left(1 - \frac{\rho^{n+m}}{n^m n!} P_0 \right), \quad (3.36)$$

де $\rho = \lambda/\mu$ – середня завантаженість каналів.

Середнє число запитів, що знаходяться в черзі, може бути знайдено як

$$\bar{r} = \frac{(n\chi)^{n+1} P_0}{n n!} \cdot \sum_{\alpha=1}^m \alpha \chi^{\alpha-1}, \quad (3.37)$$

де $\chi = \rho/n$ – значення ступеню завантаженості каналу.

У виразах (3.36), (3.37) величина P_0 – це ймовірність того, що канали вільні і немає черги. Її можна розрахувати як

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{\alpha=0}^n \frac{\rho^\alpha}{\alpha!} + \frac{\rho^n}{n!} \sum_{\alpha=1}^m \left(\frac{\rho}{n}\right)^\alpha} = \frac{1}{\sum_{\alpha=0}^n \frac{(n\chi)^\alpha}{\alpha!} + \frac{(n\chi)^n}{n!} \sum_{\alpha=1}^m \chi^\alpha}. \quad (3.38)$$

Підсумовуючи вирази (3.33) і (3.34), знайдемо середню кількість запитів, що знаходяться в СМО або в черзі, або в очікуванні обслуговування:

$$\bar{W} = \bar{z} + \bar{r}. \quad (3.39)$$

Якщо зайняті всі можливі канали та немає місць в черзі, то виникає відмова в обслуговуванні. Ймовірність такої події можна розрахувати як

$$P_{відм} = \frac{\rho^{n+m}}{n! \cdot n^m} \cdot P_0. \quad (3.40)$$

Нехай є якийсь максимально допустимий, тобто граничний рівень ймовірності відмови в обслуговуванні $P_{відм}^{гран}$. Тоді

$$P_{відм} \leq P_{відм}^{гран}. \quad (3.41)$$

Визначимо для цього рівня $P_{відм}^{гран}$ із виразу (3.40) значення P_0 :

$$P_0 = \frac{n! \cdot n^m}{(n \cdot \chi)^{n+m}} \cdot P_{відм}^{гран}. \quad (3.42)$$

Використання виразу (3.42) спрощує вирази для середньої кількості зайнятих каналів (3.36) та кількості запитів, що знаходяться в черзі (3.37):

$$\bar{r} = P_{відм}^{гран} \cdot \sum_{\alpha=1}^m \alpha \cdot \chi^{-(m-\alpha)}; \quad (3.43)$$

$$\bar{z} = n\chi \left(1 - P_{відм}^{гран}\right). \quad (3.44)$$

Відповідно, спрощується і вираз (3.39) для середньої кількості запитів:

$$\bar{W} = n\chi \left(1 - P_{відм}^{гран}\right) + P_{відм}^{гран} \sum_{\alpha=1}^{m_i} \alpha \chi^{-(m-\alpha)}. \quad (3.45)$$

Дане співвідношення є вірним при розгляді будь-якого сегмента телекомунікаційної мережі, що має властивість ізотропності та в якій значення ρ є незалежним від напрямку передачі. Але у анізотропних мережах як незалежна змінна χ , так і значення змінних $P_{відм}^{гран}, m, n$ є залежними для кожного i -го самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі від напрямку передачі, таким чином, причому

$$\bar{W}_i = n_i \chi_i (1 - P_{відм}^{гран}) + P_{відм}^{гран} \sum_{\alpha=1}^{m_i} \alpha \cdot \chi_i^{-(m_i - \alpha)}, \quad i = \bar{1}, \bar{k}. \quad (3.46)$$

Якщо використати формулу Літгла для часу середньої затримки пакетів у самовідновлювальному сегменту телекомунікаційної мережі $\bar{T}_{затр}$:

$$\gamma \bar{T}_{затр} = \sum_{i=1}^k \bar{W}_i. \quad (3.47)$$

то з використанням виразу (3.46) його можна розрахувати таким чином:

$$\bar{T}_{затр} = (1/\gamma) \cdot \sum_{i=1}^k \left[P_{відм}^{гран} \sum_{\alpha=1}^{m_i} \alpha \cdot \chi_i^{-(m_i - \alpha)} + n_i \cdot \chi_i (1 - P_{відм}^{гран}) \right]. \quad (3.48)$$

Застосування граничного рівня ймовірності відмови в обслуговуванні надало змогу як спростити функціонал оптимізації, у якому був виключений громіздкий вираз (3.38), так і запропонувати ще один суттєвий показник – значення ймовірності відмови в обслуговуванні, граничне значення якого можна задати як вимогу, що надходить від користувачів сегмента мережі, що розглядається. Слід зазначити, що отримана функція (3.48) має мінімум, пошук котрого буде надалі розглянутий. Прирівнявши до нуля часткові похідні

$$\frac{\partial \bar{T}_{затр}}{\partial \chi_i} = 0 \quad (3.49)$$

отримуємо мінімальне значення $\bar{T}_{затр}$, яке виходячи із унімодальності функції (3.48) є глобальним мінімумом. Але таке значення не враховує обмежень щодо вартості. Вважаючи на те, що початкова функція є опуклою, пошук екстремуму

можна здійснити як задачу умовної оптимізації функції, що має якусь множину відносних екстремумів.

Зауважимо, що функція (3.45) є адитивною. Тоді, обчисливши часткові похідні (3.46) маємо таку систему алгебраїчних рівнянь

$$\frac{\partial \bar{W}_i}{\partial \chi_i} = 0, \quad i = \overline{1, k}, \quad (3.50)$$

причому кожне таке рівняння згідно сепарабельності є функцією однієї змінної, тому з часткових похідних перейдемо до операції диференціювання:

$$\frac{\partial \bar{W}_i}{\partial \chi_i} = \frac{d \bar{W}_i}{d \chi_i} = 0. \quad (3.51)$$

Обчислюючи (3.51) спираючись на (3.56) отримаємо систему із k рівнянь наступного вигляду:

$$\sum_{\alpha=1}^{m_i-1} (m_i - \alpha) \alpha \chi_i^{-(m_i - \alpha + 1)} = n_i \cdot \left(1 - P_{i \text{ відм}}^{\text{гран}}\right) / P_{i \text{ відм}}^{\text{гран}}, \quad i = \overline{1, k}, \quad (3.52)$$

з котрих можна визначити оптимальне значення $\chi_i = \chi_i^{\text{opt}}$ для функцій змінних $m, n, P_{\text{відм}}^{\text{гран}}$, що гарантують мінімальний середній час доставки пакетів.

З набору таких значень прийнятними є лише ті χ_i^{opt} , котрі розташовані на поверхні, що визначена виразами, які отримані з (3.40):

$$\frac{(n_i \chi_i)^{n_i + m_i}}{n_i! n_i^{m_i}} / \left(\sum_{\alpha=0}^{n_i} \frac{(n_i \chi_i)^\alpha}{\alpha!} + \frac{(n_i \chi_i)^{n_i}}{n_i!} \sum_{\alpha=1}^{m_i} \chi_i^\alpha \right) = P_{i \text{ відм}}^{\text{гран}}. \quad (3.53)$$

Проведемо перетворення виразу (3.52) до такого вигляду:

$$\frac{1}{1 + \frac{1}{n_i} \sum_{\alpha=1}^{m_i-1} (m_i - \alpha) \alpha \chi_i^{-(m_i - \alpha + 1)}} = P_{i \text{ відм}}^{\text{гран}}. \quad (3.54)$$

Вважаючи на те що у рівнянь (3.53) і (3.54) праві частини є однаковими та постійними, оптимальні значення ${}^{\text{opt}} \chi_i^{\text{opt}}$, що є прийнятними, знайдемо з такої умови:

$$\frac{n_i!}{(n_i \chi_i)^n} \sum_{\alpha=0}^{n_i} \frac{(n_i \chi_i)^\alpha}{\alpha!} = \sum_{\alpha=1}^{m_i} \left[\frac{\alpha(m_i - \alpha)}{n_i} - \chi_i \right] \chi_i^{\alpha-1}, \quad i = \overline{1, k}. \quad (3.55)$$

Проаналізувавши вираз (3.55) бачимо, що отримані значення ${}^{np} \chi_i^{onm}$ не залежать від граничного значення ймовірності відмови $P_i^{гран}$ та є функціями значень числа каналів (n_i) та числа місць у черзі (m_i).

Кожне із рівнянь системи (3.55) залежить тільки від однієї змінної χ_i та надає можливість окремо знайти прийнятне найкраще значення для ступеня завантаження каналу у кожному розглядаємому фрагменті самовідновлювального сегмента мережі. Однак всі рівняння є трансцендентними, тобто отримати точне аналітичне рішення (3.55) не є можливим, вважаючи на його. Тому для цього використовуємо програмно-чисельний підхід. При цьому достатньо розв'язати якесь з рівнянь (3.55)

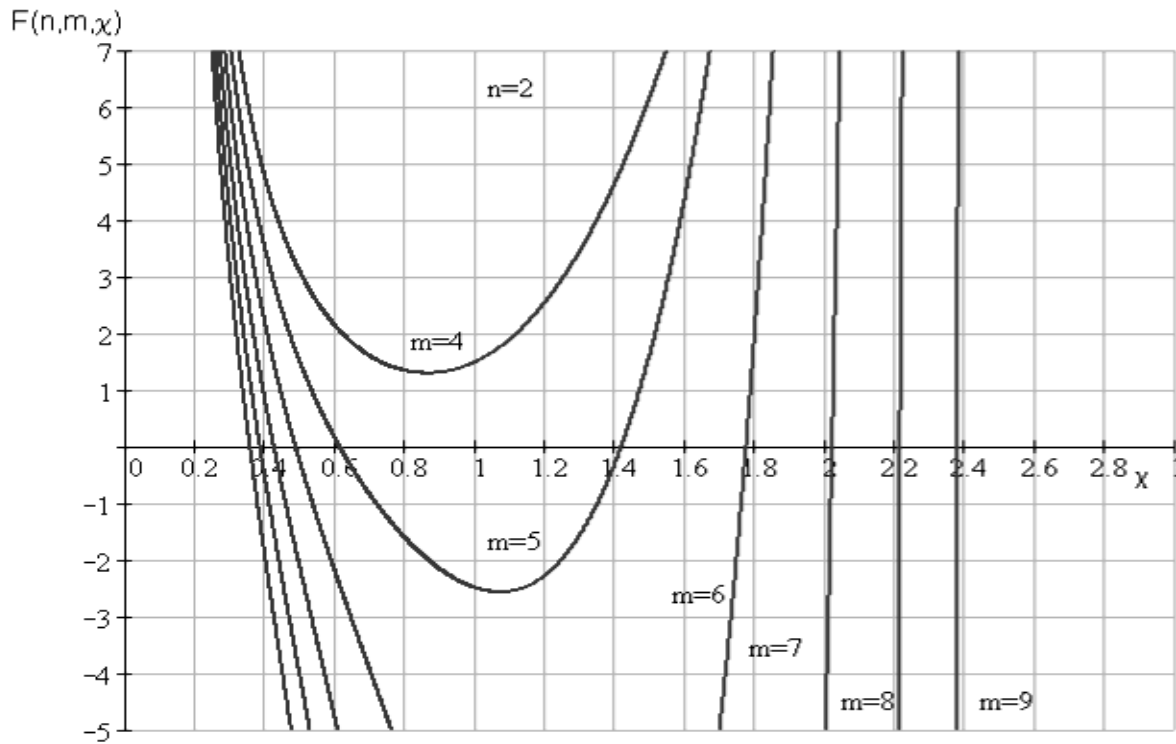
$${}^{np} \chi_i^{onm} = \frac{\lambda_i}{n_i \mu_i} = \frac{L \lambda_i}{n_i L \mu_i} = \frac{F_i}{V n_i}; \quad {}^{np} \chi_i^{onm} = f(m_i, n_i), \quad (3.56)$$

де $F_i = L \lambda_i$ є сумарним потоком, що надходить на вхід i -го сегмента, а $V_i = L \mu_i$ є шириною смуги пропускання для кожного із n каналів.

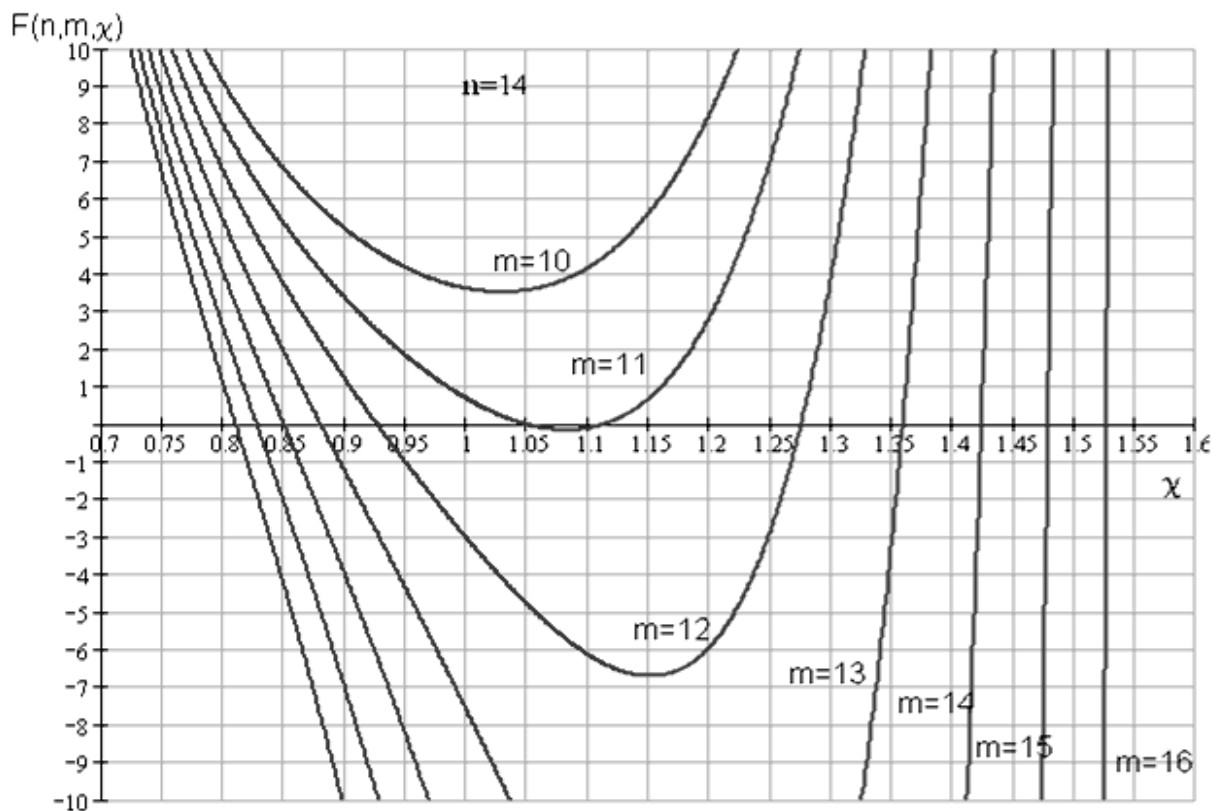
Елементи із отриманої множини значень ${}^{np} \chi_i^{onm}$ можуть відрізнитися кількістю буферів m_i чи каналів n_i . Проведення оптимізації за χ_i дозволить варіювати значеннями V_i та в залежності від трафіку F_i надати за вимогами користувачів низку каналів, що мають змінну ширину бітових швидкостей, при цьому кожного разу формуючи віртуальний канал, що має змінну ширину смуги пропускання, котра не залежить від значення P_0 . Зауважимо, що при таких умовах час доставлення інформації залишиться мінімальним.

Приблизний розв'язок рівнянь (3.55) можна отримати графічним методом (рис. 3.2), представивши для цього його у такому вигляді:

$$F_i(n, m, \chi) = \frac{n_i!}{(n_i \chi_i)^n} \sum_{\alpha=0}^{n_i} \frac{(n_i \chi_i)^\alpha}{\alpha!} - \sum_{\alpha=1}^{m_i} \left[\frac{\alpha(m_i - \alpha)}{n_i} - \chi_i \right] \chi_i^{\alpha-1} = 0, \quad i = \overline{1, k}. \quad (3.57)$$



а



б

Рис. 3.2. Визначення ${}^{np}\chi_i^{onm}$ для самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі: а – $n = 2$, $m = 5 \div 9$; б – $n = 14$, $m = 12 \div 16$

Всі можливі оптимальні значення ${}^{np}\chi_i^{opt}$ на графіку знаходяться при перетині відповідних ліній з віссю χ . Проаналізувавши відповідні графіки можна побачити існування трьох різних варіантів розв'язку, які залежать від того, в якому співвідношенні знаходяться значення величин n і m .

У першому випадку, коли функція $F_i(n, m, \chi)$ знаходиться над віссю χ , тобто її не перетинає, в області допустимих рішень мінімальних значень функції не існує (наприклад, такий варіант: $n = 2, m = 4$). У другому випадку функція $F_i(n, m, \chi)$ є дотичною до горизонтальної осі, в цьому випадку є тільки один розв'язок. А у останньому, третьому випадку, маємо дві різних точки перетину. Однак при $\chi > 1$ (друга точка, більше значення) значення $\bar{T}_{затр}$ та $R_{відм}^{гран}$ швидко зростають, отже за умовами завдання прийнятним із двох отриманих є менше значення.

Аналіз функцій $F_i(n, m, \chi)$ (3.57) показує, що ці функції є незалежними. Вони надають умови, котрі дозволяють здійснити вибір числа каналів та їх необхідну ширину смуги пропускання в залежності від наявного трафіка, при цьому надаючи низку фізичних каналів, які мають задану ширину смуги пропускання в границях розрахованого значення ${}^{np}\chi_i^{opt}$, при цьому час середньої затримки залишиться мінімальним, не зважаючи на величину потрібного значення для ймовірності втрати пакетів у самовідновлювальному сегменті телекомунікаційної мережі.

У пакеті Mathcad графічно відображений суміщений графік залежностей $\chi(m), \chi(V), \bar{T}_{затр}(m), \bar{T}_{затр}(V)$ (рис. 3.3) відповідно до умов (3.49), (3.50), (3.56).

Аналіз рис. 3.3 показує, що в границях, які встановлені для значень відповідних параметрів часової прозорості самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі, є можливість здійснення обміну розміру ширини смуги пропускання на обсяг буферної пам'яті на вході в даний канал. Але обмін є можливим тільки при виконанні умови підтримання сталості наступних показників сегмента: ймовірність втрати пакетів та мінімальний час затримки.

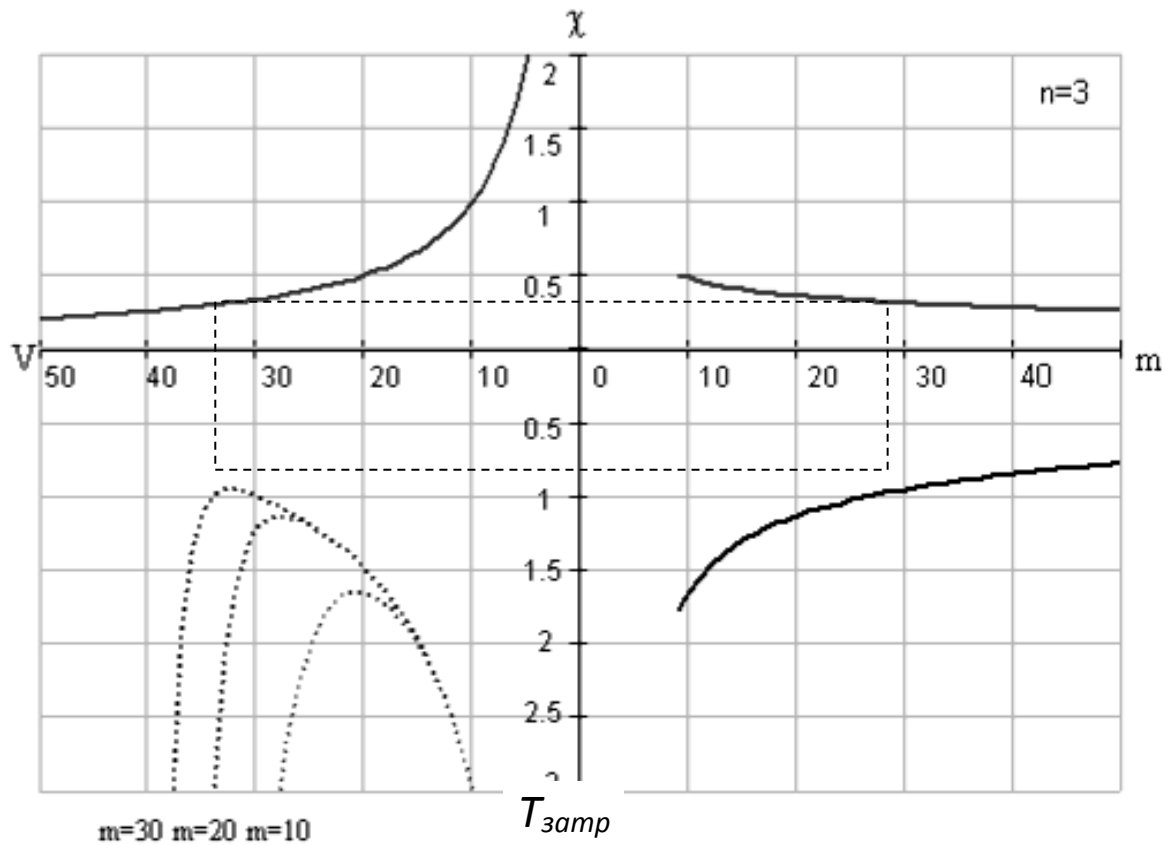


Рис. 3.3. Суміщений графік залежностей $\chi(m)$, $\chi(V)$, $\bar{T}_{zamp}(m)$, $\bar{T}_{zamp}(V)$

Таким чином, отримані з графіків рис. 3.3 значення спільно з співвідношенням (21) дають можливість розрахувати ширину смуги пропускання V_i самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі і необхідну кількість буферних елементів черги m_i при відомій топології мережі і заданій матриці тяжіння $\|\lambda_{ij}\|$, що забезпечують необхідні значення ймовірності відмови і гарантують мінімальний час доставки повідомлень.

Послідовність дій при визначенні ширини смуги пропускання для самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі наведена на схемі рис. В.3 (додаток В).

Отже, розроблено метод визначення ширини смуги пропускання самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі при обмежених мережних ресурсах за критерієм забезпечення мінімального часу доставки інформації при заданій ймовірності втрат.

3.3. Метод визначення сгладжуючого впливу кількості буферних елементів черги на завантаження каналів самовідновлювального сегмента

Центральною проблемою при проведенні реконфігурації автономного самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі є ефективне використання мережних ресурсів, обсяг яких залежить від якості послуг, що надаються користувачам сегмента. Наявні ресурси можуть використовуватися всіма службами, що дає можливість їх оптимального розподілу на статистичній основі. Система зв'язку телекомунікаційної мережі за своєю суттю є системою з проміжним накопиченням, саме в ній з найбільшою повнотою проявляється сгладжуючий ефект великих популяцій, або закон великих чисел.

Розглянемо, яким чином проводити розрахунок ширини смуги пропускання фрагментів системи зв'язку сегмента, що забезпечують досягнення допустимих значень показників якості, з урахуванням згладжувального впливу кількості буферних елементів черги на параметри трафіку і топологічних особливостей мережі (тобто на мережному рівні). Це дозволить отримати план статистичного розподілу потоків, який може бути покладений в основу статичних алгоритмів управління потоками інформації. При цьому виникає задача динамічного управління потоками, яка може бути вирішена шляхом застосування розвиненої системи управління, що реагує як на зміни потоків за межами номінальних значень, так і на динамічні зміни стану і продуктивності мережних елементів. Об'єднання різних інформаційних застосунків з урахуванням цього фактору представляє широкі можливості для створення інтегрованої інфраструктури передачі потоків даних.

Проаналізуємо причини виникнення складних процесів при передачі трафіку і розглянемо можливості використання його статистичних властивостей для адаптації і прогнозування стану каналів зв'язку.

Статистичні властивості потоку пакетів визначаються факторами [116]:

а) випадковий характер трафіка у вигляді бітового потоку, що генерується джерелом інформації;

б) особливості перетворення бітового потоку в потік пакетів, обумовлені технологічними особливостями перетворення;

в) цілеспрямовані перетворення потоку в процесі агрегування з метою поліпшення якісних показників мережі зв'язку;

Так як в цьому випадку пакети надходять нерівномірно, то часовий інтервал між послідовними надходженнями пакетів є випадковою величиною. На статистичні характеристики і структуру отриманого потоку в свою чергу впливає низка таких факторів [57]:

а) специфіка сучасних операційних систем, відповідно кожен функціонуючий в системі процес розвивається в "віртуальному часу", це визначається насамперед доступними ресурсами, що в процесі передачі інформації від рівня застосунка до канального рівня призводить до нерівномірності інтервалів часу між фазами формування пакетів навіть за умови генерації рівномірного потоку даних;

б) динаміка роботи інформаційних застосунків, що використовують засоби міжмережної взаємодії, є важливим фактором, що визначає характер агрегованого потоку даних; застосунок може генерувати дані з інтенсивністю, яка визначається наявними ресурсами, такими як кількість буферних елементів черги і ширина смуги пропускання;

в) реалізація протоколу транспортного рівня, що забезпечує достовірну доставку пакетів і регулювання швидкості їх передачі з використанням замкнутого контуру зворотного зв'язку між одержувачем і джерелом даних;

г) особливості роботи протоколів канального рівня, наприклад, колізії, що виникають при поділі середовища передачі та збільшують часові інтервали між пакетами при зростанні завантаження каналів;

д) характеристики і адміністративні обмеження, введені в проміжних мережних вузлах з метою забезпечення заданих параметрів якості сервісу.

Більш складні залежності в потоці даних виникають при використанні протоколів, які передбачають вбудовані функції контролю якості віртуальних з'єднань за допомогою стратегій буферизації, пріоритетності та резервування

[114]. Формування трафіку в даному випадку направлено на цілеспрямовану зміну характеристик потоку пакетів в з'єднанні віртуального шляху або каналу з метою зниження пікової швидкості, обмеження довжини пачки пакетів або зниження часу затримки шляхом розстановки пакетів в часі і в процесі планування (Traffic Shaping). Право формування трафіку надається як операторам мережі, так і користувачам з метою узгодження параметрів трафіку, що проходить через інтерфейс "користувач-мережа". Для мережних операторів формування трафіка є ефективним засобом оптимального використання мережних ресурсів за критерієм "затримка-продуктивність".

Буферизація дозволяє отримати комфортні потоки пакетів. Зниження пікової швидкості і обмеження довжини пачки пакетів призводить параметри трафіку у відповідність з вимогами QoS до трафіка [104, 108]. Головна умова – будь-які перетворення не повинні порушувати послідовність перенесення пакетів в комутаційних вузлах.

Швидкість передачі інформації є стохастичною величиною і, отже, є сукупністю функцій часу. Відповідними імовірнісними характеристиками можуть бути безумовні і спільні щільності ймовірності випадкових величин, які є точковими функціями процесу для фіксованих моментів часу, причому повна їх сукупність (наприклад, бітова швидкість передачі інформації) є ансамблем, де будь-яка його компонента є вибірковою функцією випадкового процесу $r_k(t)$, що віднесена до конкретного сеансу T (рис. 3.4).

Значення її реалізації в певний момент часу t_i визначають випадкову величину, а потік бітів перетворюється в дискретну послідовність пакетів, в загальному випадку змінної тривалості (заштриховані частини на рис. 3.4).

Нехай пакет має фіксовану довжину пакета L_0 . У цьому випадку структура трафіка повністю описується розподілом тривалості і інтервалів часу між переданими пакетами [100]. Тривалість інтервалу τ визначається часом накопичення інформації в буфері, достатнім для створення пакета заданої довжини L_0 :

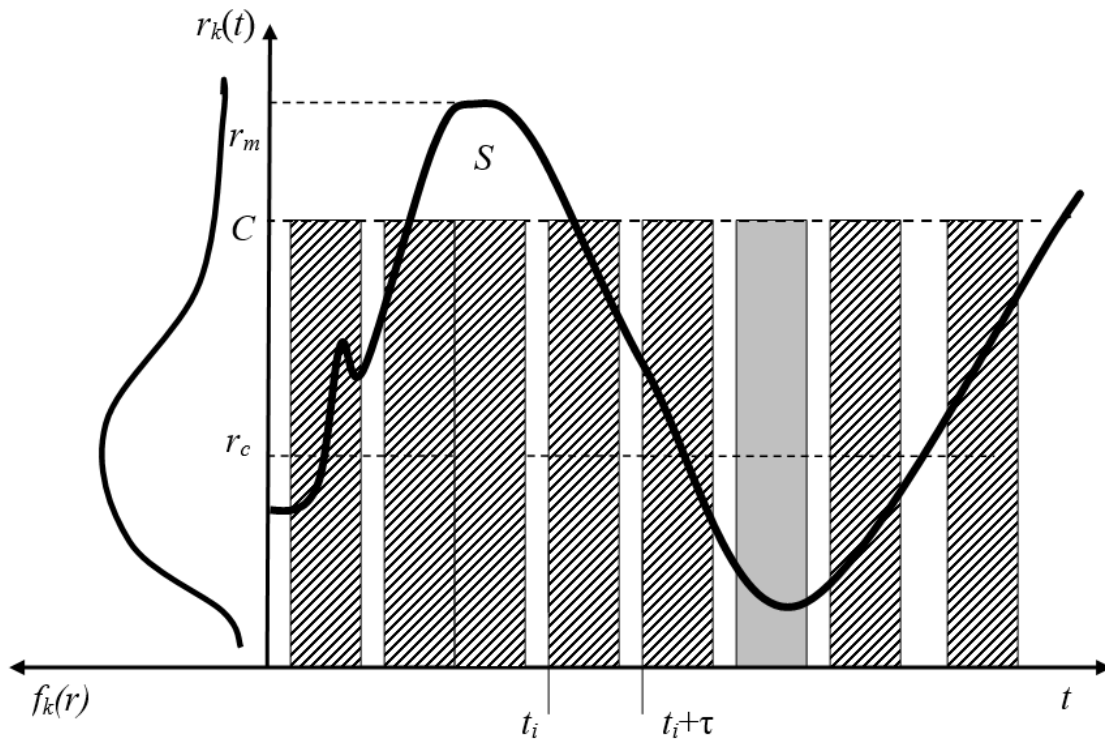


Рис. 3.4. Процес перетворення трафіку

$$\int_{t_i}^{t_i+\tau} r(t) dt = L_0. \quad (3.58)$$

Ліва частина виразу (3.58) є середнім значенням швидкості передачі на інтервалі τ , помножене на довжину цього інтервалу, тобто

$$r_{\text{сеп}} \cdot \tau = L_0, \quad (3.59)$$

де

$$r_{\text{сеп}} = \frac{1}{\tau} \cdot \int_{t_i}^{t_i+\tau} r(t) dt.$$

При відносно невеликих значення довжини пакета з невеликою похибкою $r_{\text{сеп}}$ можна замінити поточним значенням швидкості в інтервалі τ тобто $r_{\text{сеп}} = r$. Це припущення дає можливість знайти функціональну залежність між випадковими величинами τ і r :

$$\tau = \frac{L_0}{r} \quad (3.60)$$

і визначити закон розподілу $g(\tau)$ неперервної випадкової величини τ як функції одного випадкового аргументу r , якщо відомий закон розподілу $f(r)$.

Для розв'язку даного завдання розглянемо довільну ділянку осі абсцис (α, β) , на якій лежать усі можливі значення величини R , тобто $P(\alpha < R < \beta) = 1$. Спосіб вирішення залежить від поведінки функції (3.60) на ділянці (α, β) , яка є безперервною і диференціюється в даній області (рис. 3.5).

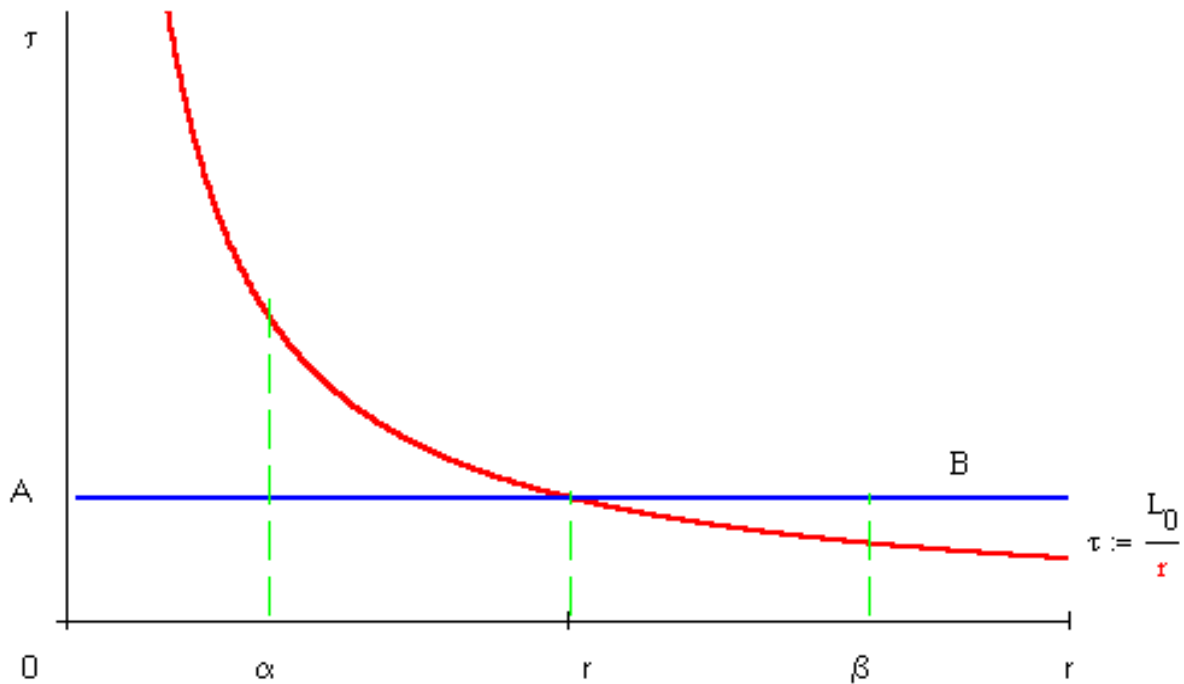


Рис. 3.5. Визначення щільності ймовірності тривалості інтервалів

Так як залежність (3.60) є монотонно убуючою, то можна стверджувати, що є вірним:

$$G(\tau) = P(T < \tau) = P(r_1 < R < \beta) = \int_{r_1}^{\beta} f(r) dr. \quad (3.61)$$

Щоб виконувалася умова $T < \tau$, випадкова точка (R, T) повинна потрапити на ту ділянку кривої, що лежить нижче прямої АВ.

Для цього необхідно і достатньо, щоб випадкова величина R потрапила на ділянку осі абсцис від точки r_1 до β , де r_1 – абсциса точки перетину кривої (3.60) і прямої АВ, отже

$$G(\tau) = \int_{L_0/\tau}^{\beta} f(r) dr. \quad (3.62)$$

Диференціюючи (3.62) за змінною τ , що входить до нижньої границі інтегрування, отримаємо

$$g(\tau) = G'(\tau) = -f\left(\frac{L_0}{\tau}\right) \cdot \frac{L_0}{\tau^2}. \quad (3.63)$$

Відмінною особливістю залежності між випадковими величинами r і τ є інваріантність по відношенню до заміни місцями функції і аргументу (зворотна пропорційність).

У зв'язку з цим виразимо цю залежність через узагальнені змінні $y = v/x$, що дозволяє розглядати наведений вище закон розподілу (3.63) і як зворотне перетворення:

$$f(x) = -g\left(\frac{v}{x}\right) \cdot \frac{v}{x^2}. \quad (3.64)$$

Криві залежності, побудовані відповідно до виразу (3.64) для реальних законів розподілу, наведені на рис. 3.6.

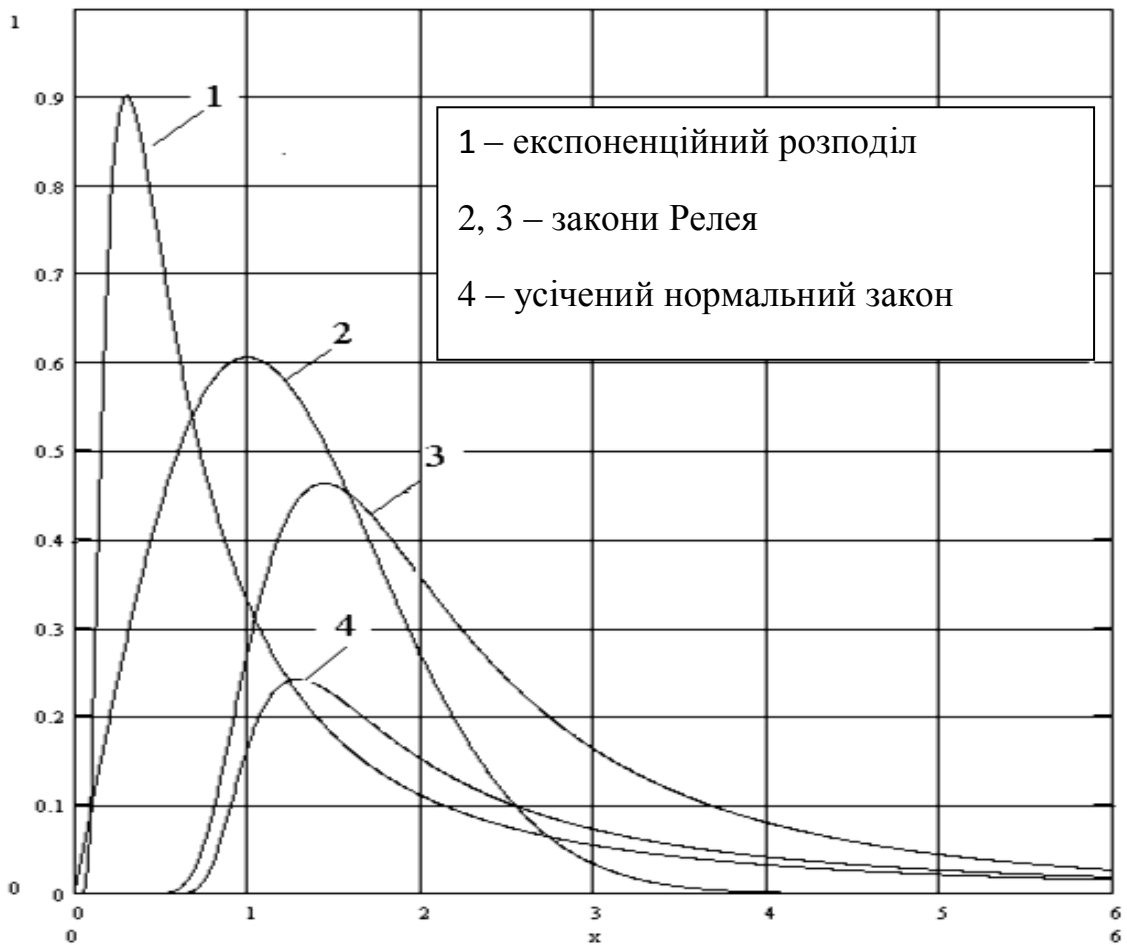


Рис. 3.6. Графіки розподілу інтервалів часу

Крива 1 (рис. 3.6) відповідає експоненціальному розподілу інтервалів часу в потоці пакетів:

$$f(x) = c \cdot \frac{e^{-c/x}}{x^2}, \quad c = \lambda \cdot \nu,$$

де $c = 0.6$, а λ – інтенсивність бітового потоку.

Криві 2 і 3 (рис. 3.6) відповідають релеевському закону розподілу і його перетворенню за формулою (3.64), відповідно. Залежність 4 (рис. 3.6) отримана шляхом перетворення усіченого нормального закону розподілу:

$$g(y) = \frac{L_0}{\sqrt{2\pi\sigma y^2}} \cdot e^{-L_0^2/2y^2}, \quad \frac{L_0}{\sqrt{2\pi\sigma}} = 0,6.$$

Отримані залежності задовольняють умові нормування

$$\int_0^{\infty} f(x) dx = 1.$$

Аналіз показує, що в результаті перетворення спостерігається різке зміщення центру ваги в бік збільшення тривалості інтервалів між пакетами, що надходять. Ця обставина може бути використана для зниження рівня обмеження максимальної швидкості з подальшим вирівнюванням потоку пакетів за рахунок їх розміщення (затемнені стовпчики на рис. 3.4), з метою поліпшення їх комфортності.

Проведемо більш детальний аналіз залежності 1 на рис. 3.6. Позначимо $r_0 = \lambda \cdot L_0$, тоді щільність розподілу швидкості передачі є такою:

$$f(r) = \frac{r_0}{r^2} \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right),$$

при якій розподіл тривалості інтервалів між пакетами має експонентний характер. Моменти появи пакетів незалежні і розподілені за законом Пуассона, що відкриває можливість при розрахунках характеристик зв'язку у самовідновлювальному сегменті використовувати марківські моделі [42, 46]. Слід зазначити, що наведені вище методи формування трафіку можуть призводити до порушення пуассонівського характеру процесів. Однак у мережному сегменті із розгалуженою структурою і досить високою зв'язністю спостерігається зворотний ефект, пов'язаний з нормалізацією процесів. На цьому ефекті базується гіпотеза Клейнрока про незалежність.

Вона справедлива, якщо топологія мережі і алгоритми маршрутизації обрані так, що трафік, який надходить із попередніх вузлів комутації переміщується в наступному вузлі, це виконується при нежорсткій умові про те, що у вузлі сходяться 2-3 напрямки зв'язку. В цьому випадку апроксимація пуассонівським законом виявляється досить точною [48].

Якщо довжина пакетів є фіксованою, то може виявитися справедливою формула Поллачека-Хінчина для моделі сегмента мережі у вигляді СМО типу M/D/1 з фіксованою тривалістю обслуговування пакетів [55]. Однак формула

Поллачека-Хінчина виведена для одноканальної СМО з необмеженою чергою. Так як в складній мережі можуть обслуговуватися користувачі з різними запитами, трафік котрих належить різним класам, то з деяким наближенням можна використовувати модель мережі у вигляді СМО типу $M/M/n/m$ з обмеженою чергою, розглянутої у попередньому підрозділі 3.2. В цьому випадку час обслуговування фактично визначається тривалістю пакета в часі, яка при фіксованій бітової довжині залежить від швидкості передачі.

Задача оптимізації ширини смуги пропускання є мережним завданням і вирішується на мережному рівні. Маршрутизація виконується теж на мережному рівні за допомогою мережних маршрутизаторів, в той час як функція маршрутизації здійснюється на каналному рівні, але маршрутизатори інтерпретують весь самовідновлювальний сегмент, як єдине ціле для передачі даних. Тому спроби ряду авторів вирішити цю задачу на рівні ланки передачі даних [41, 45, 61] не вирішують проблеми перевантажень у сегменті в цілому. Сформований в [56] підхід дозволяє розглядати будь-який мережний компонент з єдиних системних позицій.

Питання статистичного ущільнення і методика розрахунку допустимої кількості віртуальних з'єднань різних служб в цифровому тракті в залежності від кількості джерел і параметрів трафіка при заданих значеннях параметрів якості обслуговування, як було зазначено вище, є самостійним завданням, пов'язаним з управлінням ресурсами.

Під управлінням в даному випадку слід розуміти розподіл кількості буферних елементів черги в вузлах комутації та смуги пропускання цифрових трактів.

Аналіз показує, що ступінь завантаження каналів залежить від обсягу кількості буферних елементів черги в вузлах комутації (3.56). Цей вираз визначає умови, при яких можна здійснити варіювання кількістю каналів і їх пропускною здатністю, надаючи користувачу будь-яку сукупність каналів в залежності від класу трафіка в межах отриманого значення, залишаючи при цьому сумарний час затримки мінімальним, незалежно від величини необхідного значення

ймовірності втрати пакетів внаслідок відмови в обслуговуванні для компонента мережі відомої топології.

Крім того, вираз (3.56) показує, що в межах встановлених значень параметрів часової прозорості самовідновлювального автономного сегмента телекомунікаційної мережі можна здійснити обмін ширини смуги пропускання на обсяг буферної пам'яті.

Дуже важливо, що такий обмін може бути здійснений за умови підтримання сталості значень таких якісних показників як час затримки і ймовірність втрати пакетів внаслідок переповнення буферів.

Опускаючи для простоти індекси i та j довільної гілки графа сегмента, що розглядається, зі співвідношення (3.56) можна записати два таких незалежних рівняння:

$${}^{np}\chi^{onm} = \frac{F}{n \cdot V}, \quad (3.65)$$

$${}^{np}\chi^{onm} = f(m, n). \quad (3.66)$$

Рівняння (3.65) записано в явному вигляді. З іншого боку ${}^{np}\chi^{onm}$ визначається з (3.55) шляхом застосування ітераційної процедури або графічним методом.

Криві залежності

$${}^{np}\chi^{onm} = \phi(V, n) = f(m, n),$$

відповідно до виразу (3.27) та виразу (3.19) побудовані на суміщених графіках рис. 3.7.

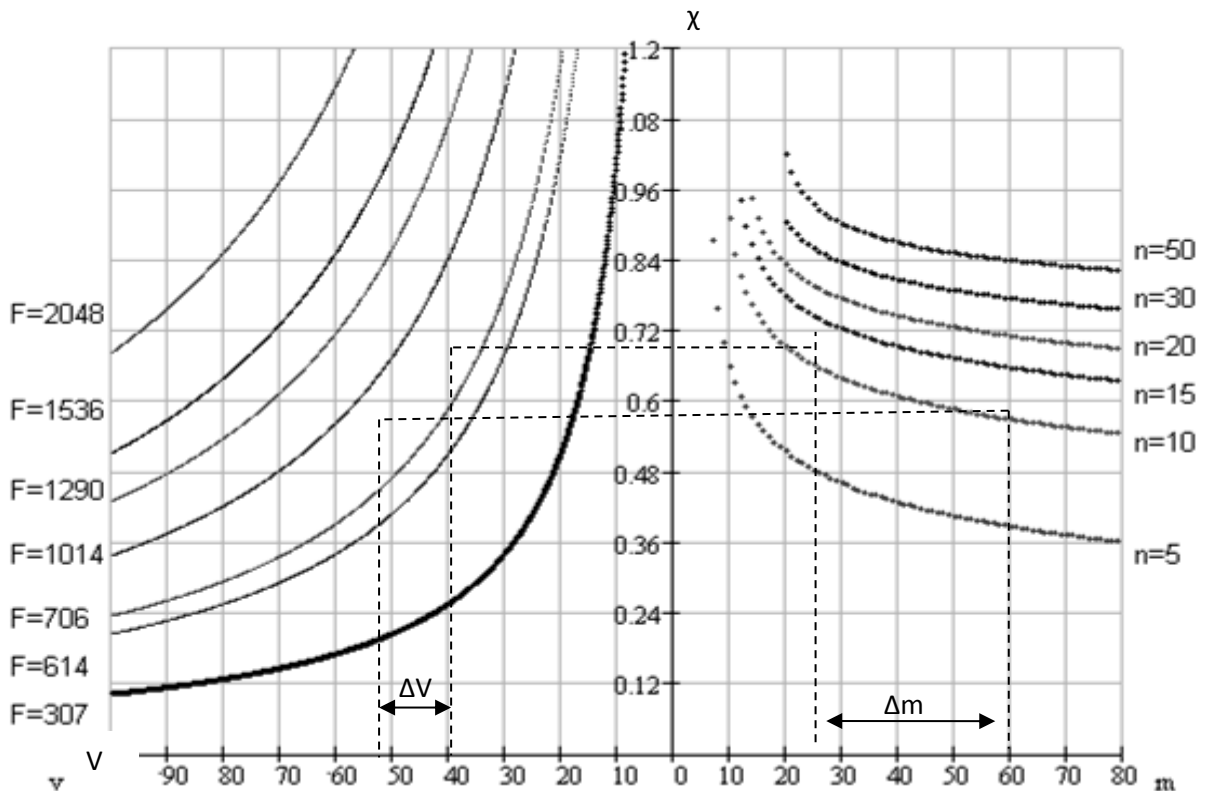


Рис. 3.7. Залежність ступеня завантаження каналів від ширини смуги пропускання

Криві лінії на суміщених графіках рис. 3.7 показують, що збільшення поточної кількості буферів m на величину Δm еквівалентно збільшенню ширини смуги пропускання на ΔV . Наприклад, якщо поточну кількість буферів $m = 20$ збільшити на $\Delta m = 34$ при одній і тій ж кількості каналів $n = 10$, то для потоку $F = 1014$ Ерл це буде еквівалентним збільшенню пропускнуої спроможності з 48 до 60 Мбіт/с. При цьому ступінь завантаження каналу χ зростає з 0,58 до 0,7.

На рис. 3.8 представлені графіки залежності $\frac{\Delta V}{V}$ від $\frac{\Delta m}{m}$ в відсоткових співвідношеннях. Аналіз кривих, наведених на рис. 3.8, показує, що зі збільшенням відносного прирощення буферів збільшується відносне прирощення ширини смуги пропускання. Наприклад, збільшення відносного збільшення буферів на 30% еквівалентно збільшенню відносного прирощення ширину смуги пропускання на 7,5% (для $n = 5$) або 9% (для $n = 20$).

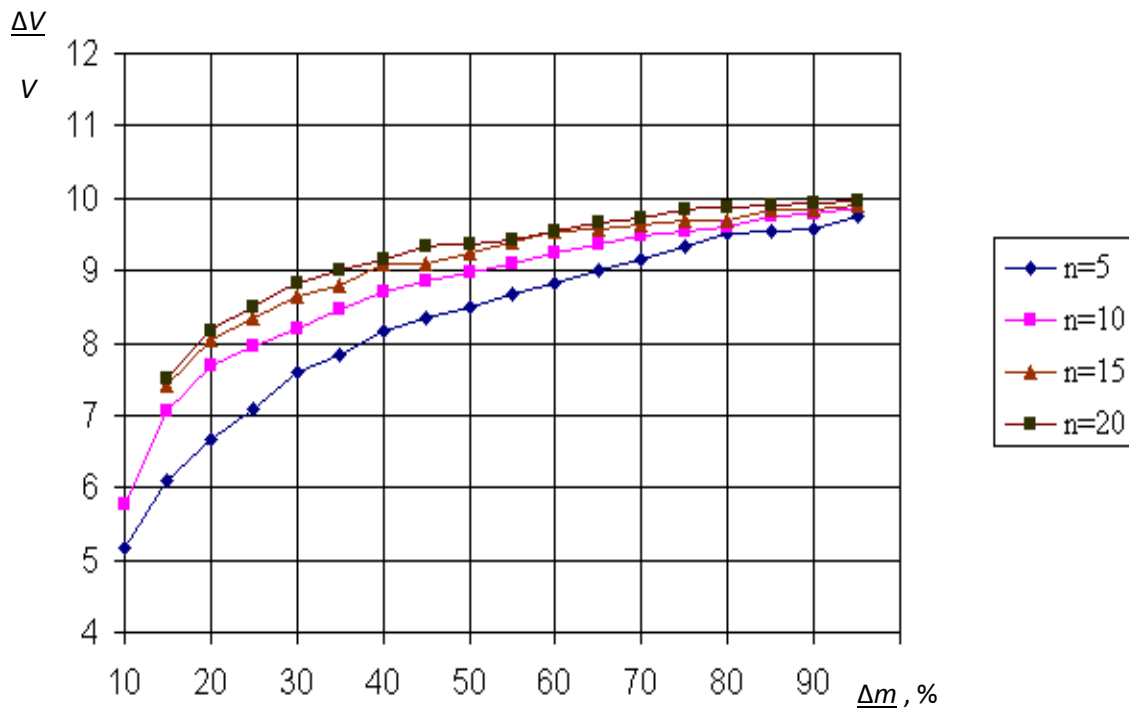


Рис. 3.8. Графік залежності зміни ступеня завантаження каналів від зміни ширини смуги пропускання

Таким чином, за рахунок наявності достатнього запасу обсягу пам'яті можна компенсувати недостатню ширину смуги бітових швидкостей передачі за умови дотримання вимог часової прозорості мережі, які можуть порушуватися через додаткові затримки в буфері. Величина додаткової затримки не перевищує подвоєного значення середньої тривалості викиду $\tau_{сер}$ [53], тобто

$$\tau_{затр_дод} \leq 2\tau_{сер} \cdot \quad (3.67)$$

Вважаючи рівень обмеження максимальної швидкості рівним доступній швидкості передачі ($C = r'_m$) визначимо достатній середній обсяг буфера [53]:

$$S_{сер} = \frac{1}{2} \frac{\sigma^3}{\Delta f_e} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{\sigma^2}{r'_m} T_p \cdot \quad (3.68)$$

Зауважимо, що співвідношення

$$\frac{r'_m}{r_{сер}} = B_{np}, \quad (3.69)$$

можна розглядати як приведену берстність.

З огляду на те, що реальна берстність є основною характеристикою інформації, яка передається, котра впливає на вибір ширини смуги пропускання компонент самовідновлювального сегмента, то коефіцієнт

$$\eta = \frac{B - B_{np}}{B} = \frac{r_m - r'_m}{r_m}, \quad (3.70)$$

дозволяє визначити необхідний ступінь зниження ширини смуги пропускання самовідновлювального сегмента за рахунок обмінних процесів.

3.4 Метод перерозподілу ресурсів автономного самовідновлювального сегмента при пульсуючому характері трафіка

Мережні послуги з передачі будь-яких видів інформації надаються, розподіляючи мережні ресурси на динамічній основі шляхом статистичного мультиплексування. Однак, з огляду на пульсуючий характер трафіку і територіальну розподіленість ресурсів мережі, заявки на обслуговування не можуть самоорганізовуватися в узгоджену чергу, внаслідок чого виникають локальні перевантаження мережних сегментів навіть при трафіку, котрий ще не досяг номінальних значень. Якщо ряд труднощів можна подолати за рахунок розвитку структури внутрішньої організації, то дослідження впливу пульсуючого характеру трафіка на параметри мережі є особливо актуальним. У будь-яких самовідновлювальних системах є обов'язковим проведення виявлення та моніторингу відмов, завдяки чому система постійно контролюється, з метою, щоб переконатися у нормальній її працездатності та повідомити про наявність відхилень від поведінки, яка очікується. Але забезпечуючи швидке виявлення та відновлення системи, механізми самовідновлення сприяють значному зниженню показників QoS [53, 75].

Розглянемо якусь із служб, яка доступна користувачу самовідновлювального сегмента, що розглядається. Нехай швидкість передачі інформації для цієї служби описується стохастичним процесом $r(t)$, який має

наступні характеристики: r_m – максимальна швидкість передачі даних, r_{cp} – середня швидкість передачі даних під час конкретного сеансу тривалістю T умовних одиниць часу та берстність властивостями.

Така характеристика, як берстність дає змогу провести оцінку необхідної пропускної спроможності елементів системи зв'язку сегменту, що розглядається, але при цьому не має можливості отримати оцінку швидкості розвитку динамічного стохастичного процесу $r(t)$ в часі. Причина цього полягає в тому, що берстність ніяким чином не пов'язана з спектральними і кореляційними властивостями даного процесу. Оцінку даних властивостей та часового масштабу функції $r(t)$ можна проводити за допомогою ще одного показника – середнього часу піку T_p , яка рекомендована Міжнародним союзом електрозв'язку. Відомо, що часова тривалість кожного викиду суттєво залежить від рівня, що проводить виміри, однак в відомих роботах та рекомендаціях відсутні способи вибору такого рівня.

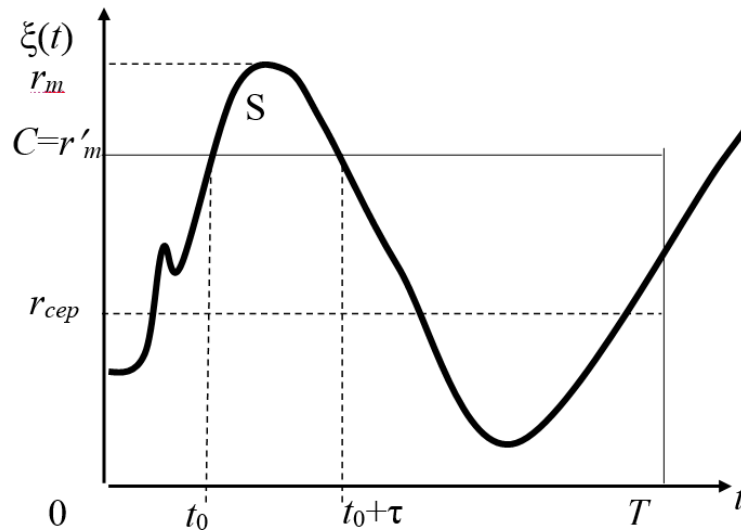


Рис. 3.9. Стохастичний процес $\xi(t)$ тривалістю T

Проведення обґрунтованого вибору масштабу відліків при вимірюванні часової тривалості пікового викиду надасть можливість визначати наступні параметри самовідновлювального сегмента, що розглядається: потрібну

кількість буферних елементів черги, ширину смуги швидкостей передачі трафіка сегмента, оцінку частоти пульсацій часу затримки передачі даних, тобто джітера.

Для проведення аналізу піків трафіку використовується теорія викидів стохастичних процесів. На рис. 3.9 наведений приклад реалізації стохастичного процесу $\xi(t)$, що має тривалість T (це, наприклад, може бути сеанс зв'язку), де C – значення фіксованого рівня, τ – час тривалості викиду, а S – його площа.

Реальні стохастичні процеси мають обмежений спектр, тому що джерелу повідомлення і мережним пристроям, котрі його оброблюють, властива інерція надходження, яка в свою чергу, діє у якості фільтра нижніх частот. Швидкодія вузлів комутації самовідновлювального сегмента, що розглядається, безпосереднім чином впливає на визначення тривалих та коротких повідомлень і пауз між ними, тобто ті визначення є відносними. Трафік будемо визначати як пульсуючий, коли час формування наскрізного каналу є меншим, ніж інтервал появи чергового повідомлення. Також при розгляді пульсуючого трафіка обмежимося апроксимацією викидів кривими другого порядку, тобто для нашого випадку це будуть параболи (рис. 3.9). Подібні функції мають кінцеве число мінімумів та максимумів, якщо розглядаються в рамках обмеженого інтервалу часу T .

Як бачимо на прикладі, графік реалізації викиду може декілька раз перетинати заданий фіксований рівень C , причому як знизу (негативна похідна), так і зверху (позитивна похідна). Кількість перетинів зверху відповідає кількості викидів стохастичного процесу $N^+(C, T)$ над фіксованим рівнем C , що дає змогу його розрахувати:

$$N^+(C, T) = \int_0^T dt \int_0^\infty \xi' P(C, \xi'; t) d\xi', \quad (3.71)$$

де $P(C, \xi'; t)$ визначає значення щільності ймовірності над фіксованим рівнем C (диференціювання за часом позначено штрихом).

Якщо стохастичний процес є стаціонарним, то вираз (3.71) можна значно спростити:

$$N^+(C, T) = P(C) \int_0^{\infty} \xi' P(\xi') d\xi'. \quad (3.72)$$

Отримана спрощена формула (3.72) надає можливість для визначення середньої кількості викидів, що виникають при будь-якому законі розподілу стохастичного процесу $\xi(t)$. Якщо закон розподілу є нормальним (найбільш прийнятний варіант для реальних трафікових процесів), то можна визначити середню кількість числа перетинів стохастичним процесом фіксованого рівня C за одиницю часу таким чином:

$$N(C) = \frac{1}{\pi} \sqrt{-\rho_o''} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{C - r_{cp}}{\sigma} \right)^2 \right], \quad (3.73)$$

де ρ_o'' – це друга похідна за часом від відповідного коефіцієнта кореляції, а σ – це середньоквадратичне відхилення процесу, що розглядається.

При значних значеннях фіксованого рівня $C \gg 0$ більший відсоток викидів має невелику тривалість та дорівнює кількості максимумів, котрі перевищують фіксований рівень C . Стохастичний процес $\xi(t)$ у невеликому околі його максимуму, будемо апроксимувати параболічною залежністю.

Позначимо як t_0 момент часу, при якому починається позитивний викид, тоді $\xi(t_0) = C$, $\xi'(t_0) > 0$. Розклавши функцію $\xi(t)$ у ряд Тейлора біля точки t_0 та відкинемо, зважаючи на наведені вище припущення, всі його члени, що мають порядок більше двох:

$$\xi(t) = \xi(t_0) + \xi'(t_0)(t - t_0) + \frac{1}{2} \xi''(t)(t - t_0)^2. \quad (3.74)$$

Відмітимо, що $\xi(t_0) = \xi(t_0 - \tau) = C$, тоді отримаємо, що

$$\tau = -\frac{2\xi'(t)}{\xi''(t)}. \quad (3.75)$$

Отже необхідно обчислити спільну щільність ймовірності $W_0(\xi'_0, \xi''_0)$ для початкових похідних. Використовуючи співвідношення (3.74) і (3.75) для гаусового стаціонарного процесу, що має функцію кореляції $K(\tau) = \sigma^2 \cdot r(\tau)$, розрахуємо значення щільності ймовірності часу тривалості викидів для значень високих позитивних рівнів C :

$$P(\tau, C) = \frac{1}{4} \left(-\rho''_0 \right) \frac{C^2}{\sigma^2} \tau \exp \left[-\frac{1}{8} \left(-\rho''_0 \right) \frac{C^2 \cdot \tau^2}{\sigma^2} \right]. \quad (3.76)$$

Використання параболічної апроксимації для форми викидів дає змогу для знаходження розподілу викидів за площею:

$$S = \int_{t_0}^{t_0 + \tau} [\xi(t) - C] dt. \quad (3.77)$$

Враховуючи (3.75), отримуємо такий вираз для площі:

$$S = \frac{2}{3} \left(\xi'_0 \right)^3 \left(\xi''_0 \right)^2. \quad (3.78)$$

Якщо відома сумісна щільність ймовірності $W_0(\xi'_0, \xi''_0)$ для даних похідних при початку здійснення позитивного викиду для фіксованого рівня C щільність ймовірності розподілу викидів за площею буде дорівнювати

$$P(S, C) = \frac{1}{3} \lambda^{2/3} S^{-1/3} \exp \left[-\frac{1}{2} (\lambda S)^{2/3} \right], \quad (3.79)$$

де $\lambda = \frac{2}{3} \frac{C^2}{\sigma^3} \sqrt{-\rho''_0}$, $C \gg \sigma$. (3.80)

Отже, площа викиду може розглядатися у якості необхідної кількості буферних елементів черг, котру необхідно мати у вузлах комутації самовідновлювального сегмента з метою уникнення втрати пакетів при відсутності потрібної ширини смуги швидкості передачі, причому фіксований рівень C у даному випадку буде визначати швидкість передачі, яка є доступною. Пакети, котрі будуть затримані у цій пам'яті, можна передати у моменти, коли інтенсивність трафіка знижується нижче заданого фіксованого рівня, при цьому

значення допустимого часу затримки можна визначити виходячи із вимог до часової прозорості сегмента мережі, який розглядається [58], що буде гарантувати потрібну якість обслуговування користувачів відповідної служби. Для проведення більш детального аналізу отриманої формули (3.79), представимо її у такому вигляді:

$$\lambda^{-1}P(S, C) = \frac{1}{3}(\lambda S)^{-1/3} \exp\left[-\frac{1}{2}(\lambda S)^{2/3}\right]. \quad (3.81)$$

Залежність розподілу величини сумарної площі викидів S від значення λS для фіксованого рівня C показана на рис. 3.10.

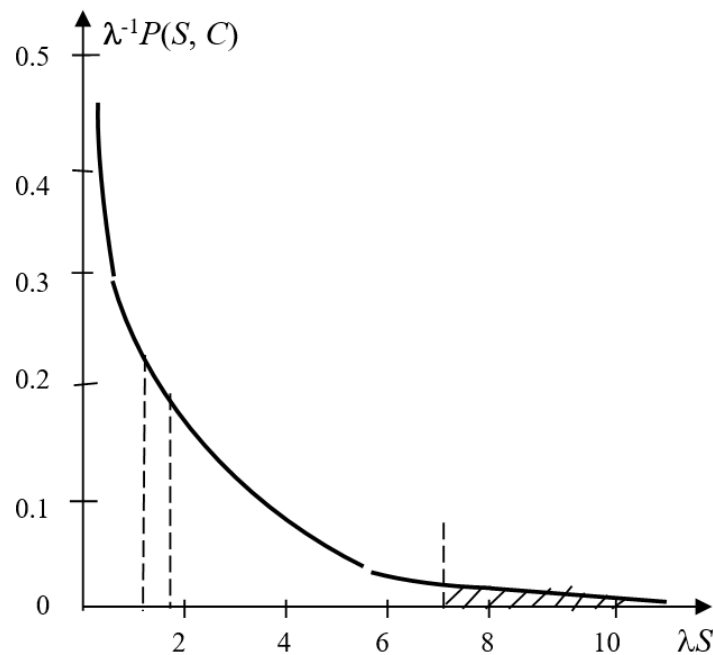


Рис. 3.10. Площа викидів S над фіксованим рівнем C

Можна визначити середню площу викиду

$$S_{сер} = [MP(C, S)] = \frac{1}{3} \int_0^{\infty} S \cdot \lambda^{2/3} S^{-1/3} \exp\left[-\frac{1}{2}(\lambda S)^{2/3}\right] ds = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \frac{3}{\lambda} \quad (3.82)$$

або, виходячи із (3.80),

$$S_{сер} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \frac{9\sigma^3}{2C^2 \sqrt{-\rho_0''}}. \quad (3.83)$$

Середня тривалість викиду, котра буде визначати розмір додаткової затримки через зберігання пакетів, що попали до зони викиду, в буферній пам'яті черг

$$\tau_{сер} = 2\pi\sigma^2 / \left(\sqrt{-\rho_o''} \cdot C \right). \quad (3.84)$$

Як конкретні вирази для розрахунку значення ρ будемо приймати найбільш поширені на практиці коефіцієнти кореляції, котрі приведені в табл. 3.1 для фрактальних процесів, у таблиці за Δf_e позначено розмір ефективної смуги, котру має частотний спектр трафіка.

Таблиця 3.1

Розрахунок коефіцієнтів кореляції

$\rho(\tau)$	$-\rho_o''$	$S(f)$	Δf_e	$\sqrt{-\rho_o''}$
$(1 + \alpha \tau)e^{-\alpha(\tau)}$	α^2	$\frac{4\alpha^3}{[\alpha^2 + (2\pi f)^2]^2}$	$\frac{\alpha}{8}$	$8\Delta f_e$
$e^{-\alpha\tau^2}$	2α	$\frac{\sqrt{\pi/\alpha} \times \exp(-\pi^2 f^2/\alpha)}$	$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}}$	$3,54 \times \Delta f_e$
$\left[\frac{1 + \alpha \tau }{3} + (\alpha\tau)^2 e^{-\alpha \tau } \right] / 3$	$\frac{1}{3}\alpha^2$	$\frac{16\alpha^5}{3[\alpha^2 + (2\pi f)^2]^3}$	$\frac{3}{32}\alpha$	$6,02 \times \Delta f_e$
$\left[1 + (\alpha\tau)^2 \right]^{-1}$	$2\alpha^2$	$\frac{\pi}{\alpha} \exp\left(-\frac{2\pi f}{\alpha}\right)$	$\frac{1}{2\pi}\alpha$	$8,85 \times \Delta f_e$
$\text{Sech}(\alpha\tau)$	α^2	$\frac{\pi}{2} \text{sech}\left(\frac{\pi^2 f}{\alpha}\right)$	$\frac{1}{2\pi}\alpha$	$6,28 \times \Delta f_e$

Найбільш часто аналізуючи фрактальний трафік використовують таке значення завантаження мережі під час викиду:

$$\rho(\tau) = e^{-\alpha\tau^2},$$

отже тоді відповідні характеристики можуть бути розраховані за такими виразами:

$$N(C) = a\Delta f_e \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(C-m)^2}{\sigma}\right]; \quad (3.85)$$

$$P(\tau, C) = 2b\Delta f_e \cdot C^2 \cdot \tau \exp\left[-B\Delta f_e \left(\frac{C\tau}{\sigma}\right)\right]; \quad (3.86)$$

$$\lambda = d \cdot \frac{C^2}{\sigma^3} \Delta f_e. \quad (3.87)$$

При цьому значення констант a, b, d в залежності від виду функцій кореляції змінюються в наступних межах:

$$a = 1,1 \div 2,9;$$

$$b = 0,4 \div 1,1;$$

$$d = 2,3 \div 5,9.$$

Отже вирази для середніх значень тривалості викиду та розміру його площі при функції кореляції, що має вигляд $r(\tau) = \sigma^2 e^{-\alpha\tau}$ можна представити наступним чином:

$$\tau_{сер} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{\sigma}{C \cdot \Delta f_e}; \quad (3.88)$$

$$S_{сер} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma^3}{\Delta f_e}. \quad (3.89)$$

Використовуючи вирази (3.88), (3.89), можемо знайти співвідношення між площею викиду та його тривалістю таким чином:

$$S_{сер} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{\sigma^2}{C} \cdot \tau_{сер}. \quad (3.90)$$

Зауважимо, що при ототожненні $\xi(t)$ зі швидкістю передачі інформації $r(t)$, а $S_{сер}$ – з потрібною кількістю буферних елементів черги ($S_{сер} = \bar{S}$), середня величина пам'яті залежить від середнього часу піку таким чином:

$$\bar{S} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{\sigma^2}{C} \tau_{сер} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{\sigma^2}{C} \cdot T_p. \quad (3.91)$$

Якщо довжина пакета є фіксованою, то можемо розрахувати оцінку нижньої границі необхідного числа місць у черзі, наприклад, при довжині пакета у 32 Кбіт потрібно у черзі мати не менш ніж

$$\bar{m}_0 = 0,6 \cdot \frac{\sigma^2}{C} \cdot T_p \text{ (місць)}. \quad (3.92)$$

Однак не завжди на практиці є доцільним зв'язувати обсяг буферної пам'яті із значенням середньої площі викиду, тому що дана умова ставить доволі жорсткі вимоги щодо системи зв'язку самовідновлювального сегмента. Тому можна визначити фіксований рівень у якості додаткового обмеження $C = C_n$ таким чином, щоб площа викиду із заданою імовірністю P_0 не перевищувала заданого значення S_n , яке є сумісним із ресурсними можливостями мережісегмента мережі.

На рис. 3.10 значення величини $(\lambda S)_n$ надає величину нижньої межі заштрихованої області і ймовірність того, що з'явиться викид, котрий має площу, яка є більшою, ніж задана величину, тобто,

$$P_0(S) = P(S \leq S_n) = 1 - \int_{+S_n}^{\infty} P(S, C) dS = 1 + e^{-\frac{1}{3} \lambda^{2/3} S_n^{2/3}}, \quad (3.93)$$

де λ визначається із формули (3.87).

На рис. 3.11 наводиться графік залежності даної ймовірності P_0 від величини площі викидів.

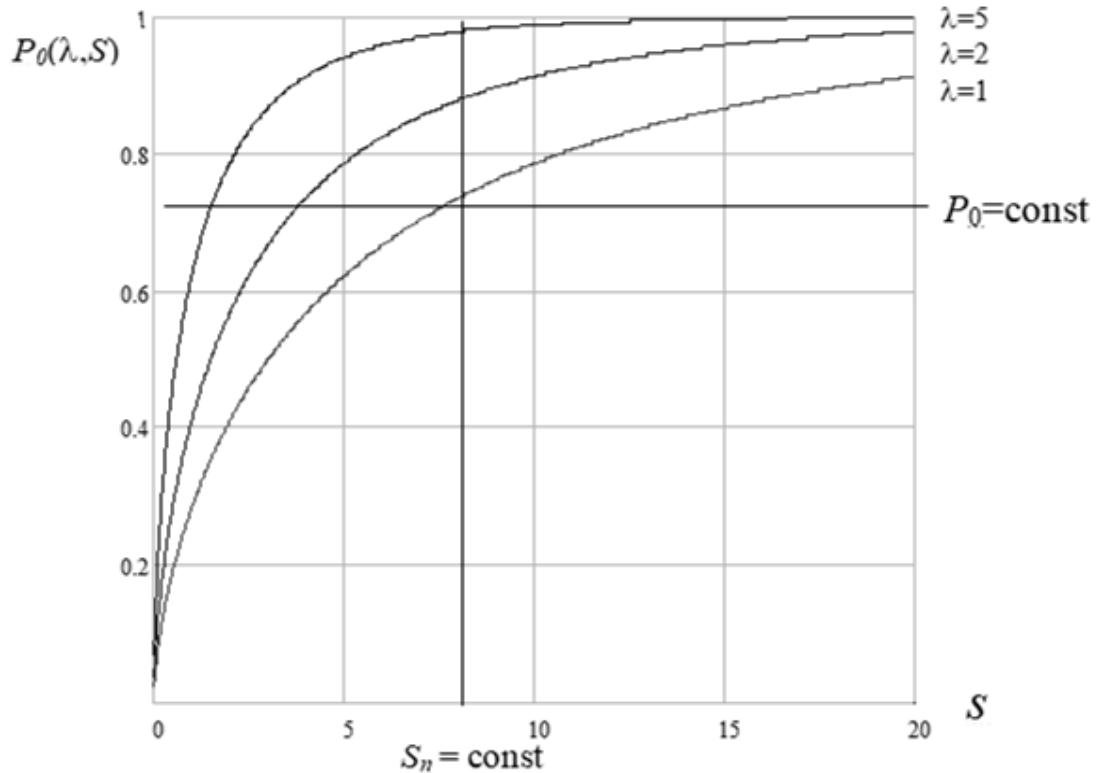


Рис. 3.11. Поріг допустимих швидкостей передачі

Лінії, що реалізують співвідношення (3.93) для $\lambda = \text{const}$, котрі показані на рис. 3.11, надають змогу визначити змінний поріг C_n , який задає значення допустимої швидкості передачі кожної окремої служби системи, орієнтуючись на величини P_0 та S_n , що дозволяють визначити цей параметр:

$$C_n = \sqrt{\lambda_n \cdot \sigma^3 / (d \cdot \Delta f_e)}, \quad (3.94)$$

де змінне значення порогу C_n треба відраховувати від середньої величини трафіка, отже $C_n = C - m$, це відповідає координатам точок графіка кривої $P_0(S)$, котрий проходить через точку перетину двох прямих, визначених фіксованими значеннями: $P_0 = \text{const}$ і $S_n = \text{const}$.

Послідовність дій при перерозподілі ресурсів для пульсуючого трафіка наведена на схемі рис. В.1 (додаток В).

Отже, у даному підрозділі розроблений метод визначення кількості буферних елементів черг самовідновлювального сегмента телекомунікаційної

мережі, який є необхідним для виконання умови щодо прийнятної ймовірності втрат пакетів при викидах трафіка.

Висновки за розділом 3

У розділі удосконалений і досліджений комплекс методів реконфігурації сегмента телекомунікаційної мережі, який відрізняється від відомих сумісним використанням властивостей локальної самовідновлюваності та горизонтальної масштабованості, що дозволяє виконати вимоги QoS щодо середнього часу затримки повідомлень, а також набув подальшого розвитку метод перерозподілу ресурсів автономного самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі при пульсуючому характері трафіка за рахунок використання спектральних властивостей процесу передачі даних, що дозволяє уникнути втрат пакетів при перевантаженні каналів зв'язку. Проведені в розділі дослідження дозволили отримати такі результати.

У підрозділі 3.1 запропонований метод розрахунку мінімальної середньої затримки повідомлень при реконфігурації самовідновлювального сегмента. Отримані аналітичні вирази дозволяють при заданій вартості для передачі умовної одиниці інформації обрати необхідну кількість буферних елементів черги і оптимальне значення для щільності інформаційного потоку, які забезпечують мінімальну усереднену затримку передачі повідомлень у самовідновлювальному сегменті телекомунікаційної мережі.

У підрозділі 3.2 запропонований метод визначення ширини смуги пропускання при проведенні реконфігурації самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі, якщо обмежені мережні ресурси, за критерієм забезпечення мінімального часу доставки інформації при заданій ймовірності втрат. Метод орієнтований на врахування специфічних властивостей самовідновлювальних систем. Отримані співвідношення надають можливість розрахувати ширину смуги пропускання і необхідний обсяг буферної пам'яті при відомій топології мережі і заданій матриці тяжіння, що забезпечують необхідні

значення ймовірності відмови і гарантують мінімальний час доставки повідомлень.

У підрозділі 3.3 реалізований метод визначення сгладжуючого впливу кількості буферних елементів черги на завантаження каналів самовідновлювального сегмента. За рахунок наявності достатнього запасу обсягу пам'яті можна компенсувати недостатню ширину смуги бітових швидкостей передачі за умови дотримання вимог часової прозорості мережі, які можуть порушуватися через додаткові затримки в буфері. Визначається необхідний ступінь зниження пропускнуої спроможності самовідновлювального сегмента за рахунок обмінних процесів.

У підрозділі 3.4 розроблений метод перерозподілу ресурсів автономного самовідновлювального сегмента при пульсуючому характері трафіка, який є необхідним для виконання умови щодо прийнятної ймовірності втрат пакетів. Метод базується на теорії викидів стохастичних процесів та дозволяє визначити наявні пікові викиди трафікового процесу. Пакети, обробка яких затримується, при зменшенні інтенсивності трафіка нижче фіксованого рівня вертаються із черги для подальшої обробки, при цьому значення допустимого часу затримки визначається із вимог часової прозорості самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі, що є гарантією встановлення необхідних значень якості обслуговування користувача, котрий користується послугами даної служби.

РОЗДІЛ 4

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РЕСУРСІВ У РЕКОНФІГУРОВАНОМУ САМОВІДНОВЛЮВАЛЬНОМУ СЕГМЕНТІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ

В розділі розглянуте шосте завдання дослідження: проведена порівняльна оцінка розроблених та існуючих моделей і методів реконфігурації самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі. Запропонований алгоритм розрахунку значень основних показників реконфігурованого самовідновлювального сегмента. Згідно з даним алгоритмом розглянуті такі приклади на основі сегмента, що має шість вузлів комутації: проведення реконфігурації самовідновлювального сегмента з повною топологією зв'язків між комутаційними вузлами; проведення реконфігурації самовідновлювального сегмента з топологією, що має регулярну структуру заданої зв'язності; розрахунок значень основних показників, що характеризують QoS для реконфігурованого самовідновлювального сегмента. Також запропонований підхід до використання гібридної комутації у сегменті, що розглядається, та після цього на реконфігурованому сегменті була проведена порівняльна оцінка розроблених та існуючих моделей і методів.

4.1 Алгоритм розрахунку значень основних показників реконфігурованого самовідновлювального сегмента

При проведенні реконфігурації автономного самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі зазвичай виконується так послідовність дій [71, 103]:

1) виконання процедур реконфігурації топологічної структури автономного сегмента, які мають бажану обчислювальну ефективність та зберігають властивість самовідновлюваності;

2) вибір способу комутації;

3) розрахунок пропускних спроможностей засобів зв'язку, котрі забезпечують необхідні якісні показники мережі, зокрема всі вимоги, що потрібні для виконання умов QoS;

4) проведення оцінки потреби в обсягах пам'яті мультиплексних вузлів автономного сегмента, що забезпечують згладжування трафіка і підвищують показники QoS до потрібних значень;

5) дослідження статистичних властивостей і методів перетворення трафіка з метою узгодження його характеристик з параметрами сегмента мережі.

При цьому потрібно оцінити такі показники реконфігурованого сегмента:

- пропускні спроможності засобів зв'язку, $\|V_{ij}\|$;
- розподіл подорожних потоків мережею, X_p ;
- загальна кількість типових засобів зв'язку в кожному напрямку, n_{ij} ;
- кількість буферних елементів черг до всіх засобів зв'язку, m_{ij} ;
- час середньої затримки пакетів, $T_{затр}$;
- ймовірність відмови в обслуговуванні, $P_{відм}$;
- вартість реконфігурованого сегмента мережі, D .

Для здійснення розрахунку показників реконфігурованої мережі необхідно виконати дії відповідно до такого алгоритму:

1. Поставити вихідні дані у вигляді матриці тяжінь між комутаційними вузлами із зазначенням географічних координат вузлів комутації $\|\lambda_{ij}\|$, а також необхідних характеристик класів трафіку.

2. Сформуванати початкову топологію мережі у вигляді повного графа.

3. Побудувати план статичного розподілу подорожніх потоків за найкоротшими маршрутами між окремими вузлами «джерело-одержувач» з наявністю непересічних з найкоротшими альтернативних маршрутів для реалізації вимоги самовідновлювальності.

4. Виконати перехід від топологічної структури із повним графом до регулярної структури із заданою зв'язністю.

5. Розрахувати допустиме завантаження засобів зв'язку шляхом вирішення задачі оптимізації.

6. Оцінити необхідну кількість буферних елементів для черг в вузлах комутації, а також кількість необхідних каналів.

7. Обчислити величину мінімальної середньої затримки.

8. Розрахувати значення джиттера для класів трафіку, чутливих до параметрів часової прозорості.

9. Визначити допустимий рівень відмов в обслуговуванні.

10. Визначити можливість зниження вартості засобів зв'язку.

Більш детально даний алгоритм розберемо на конкретному прикладі.

4.2 Реконфігурація самовідновлювального сегмента з повною топологією зв'язків між комутаційними вузлами

У цьому підрозділі будемо розглядати самовідновлювальний сегмент, у якому всі комутаційні вузли з'єднані один з одним засобами зв'язку, тобто граф, який відповідає топологічній структурі сегмента (на рівні комутаційних вузлів) є повним графом з навантаженими ребрами. Для цього виконаємо три перших кроки наведеного вище алгоритму.

Нехай сегмент має 6 комутаційних вузлів, серед яких є джерело S , приймач t та чотири подорожніх вузла.

На першому кроці задаємо вхідні дані як вхідні даних потоки в гілках у вигляді зваженої матриці суміжності (табл. 4.1), тобто матриці тяжінь таким чином, щоб дотримувалися закони збереження потоку для кожного вузла. Закон збереження потоку для вузлів S і t буде дотримуватися при $F_0 = 12073$ ум. од.

На другому кроці будемо розглядати шостивузловий сегмент мережі, у якому виділені вузли S і t , а чотири інших є транзитними, тобто

$$n = 6; \quad m = n - 2 = 4.$$

Таблиця 4.1

Матриця тяжінь (значення в ум. од.)

	<i>S</i>	1	2	3	4	<i>t</i>
<i>S</i>	-	4830	2512	1738	1448	1545
1		-	1160	1351	870	1448
2			-	1064	967	1642
3				-	580	3575
4					-	3863
<i>t</i>						-

На третьому кроці будемо складати план статичного розподілу потоків. Для даної моделі рівняння (2.1) у відповідності до формул (2.3) мають вигляд:

$$\begin{aligned}
 F_{S1} &= \underline{X}_1 + \underline{X}_2 + \underline{X}_3 + \underline{X}_4; \\
 F_{S2} &= X_5 + \underline{X}_6 + \underline{X}_7 + \underline{X}_8; \\
 F_{S3} &= X_9 + X_{10} + \underline{X}_{11} + \underline{X}_{12}; \\
 F_{S4} &= X_{13} + X_{14} + X_{15} + \underline{X}_{16};
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

$$\begin{aligned}
 F_{1t} &= X_1 + X_5 + X_9 + X_{13}; \\
 F_{2t} &= X_2 + X_6 + X_{10} + X_{14}; \\
 F_{3t} &= X_3 + X_7 + X_{11} + X_{15}; \\
 F_{4t} &= X_4 + X_8 + X_{12} + X_{16}.
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

$$\begin{aligned}
 F_{st} &= X_0; \\
 F_{12} &= X_2 - X_5; \\
 F_{13} &= X_3 - X_9; \\
 F_{14} &= X_4 - X_{13}; \\
 F_{23} &= X_7 - X_{10}; \\
 F_{24} &= X_8 - X_{14}; \\
 F_{34} &= X_{12} - X_{15}.
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

Закони збереження потоку для кожного вузла відповідно до (2.4) мають такий вигляд:

$$\begin{aligned}
\text{вузол } S &\rightarrow F_{St} + F_{S1} + F_{S2} + F_{S3} + F_{S4} = F_0; \\
\text{вузол } t &\rightarrow F_{St} + F_{1t} + F_{2t} + F_{3t} + F_{4t} = -F_0; \\
\text{вузол } 1 &\rightarrow F_{S1} - F_{1t} - F_{12} - F_{13} - F_{S4} = 0; \\
\text{вузол } 2 &\rightarrow F_{S2} + F_{12} - F_{2t} - F_{23} - F_{24} = 0; \\
\text{вузол } 3 &\rightarrow F_{S3} + F_{13} + F_{23} - F_{St} - F_{34} = 0; \\
\text{вузол } 4 &\rightarrow F_{4t} - F_{S4} - F_{14} - F_{24} - F_{S4} = 0.
\end{aligned} \tag{4.4}$$

Виключаємо, наприклад, систему (4.2), як лінійну комбінацію рівнянь (4.1, 4.3) з урахуванням (4.4).

Як базисні змінні оберемо підкреслені змінні X_1, X_6, X_{11}, X_{16} , а в якості вільних – розташовані лівіше і нижче головної діагоналі в системі (4.1), тобто $X_5, X_9, X_{10}, X_{13}, X_{14}, X_{15}$.

Перевіримо умови (2.2), (2.6) и (2.7).

$$\text{Загальна кількість подорожніх потоків: } N_p = 1 + \sum_{z=1}^2 A_4^z = 17.$$

$$\text{Кількість базисних змінних: } N_{\sigma} = \frac{4^2 + 4 + 2}{2} = 11.$$

$$\text{Кількість вільних змінних: } N_{\epsilon} = N_p - N_{\sigma} = 17 - 11 = 6.$$

Це не суперечить зробленому вибору. Визначимо базисні змінні через вільні таким чином:

$$\begin{aligned}
X_0 &= F_{st}; \\
X_1 &= F_{1t} - (X_5 + X_9 + X_{13}); \\
X_2 &= F_{12} + X_5; \\
X_3 &= F_{13} + X_9; \\
X_4 &= F_{14} + X_{13}; \\
X_6 &= F_{2t} - F_{12} - (X_5 + X_{10} + X_{14}); \\
X_7 &= F_{23} + X_{10}; \\
X_8 &= F_{24} + X_{14}; \\
X_{11} &= F_{S3} - F_{34} - (X_9 + X_{10} + X_{15}); \\
X_{12} &= F_{34} + X_{15};
\end{aligned} \tag{4.5}$$

$$X_{16} = F_{s4} - (X_{13} + X_{14} + X_{15}).$$

Якщо забезпечити виконання умов (2.13):

$$F_{1t} - F_{12} > 0 \text{ та } F_{S3} - F_{34} > 0, \quad (4.6)$$

тоді при $X_e = 0$ рішення буде допустимим при значеннях потоків

$$F_{ij} > 0, \quad (4.7)$$

тобто якщо все потоки в гілках спрямовані від S до t .

Вимагатимемо, щоб максимальна кількість інформації передавалося потоками, що містять в не більше одного транзитного вузла, тобто цільова функція відповідно до виразів (2.10) і (2.11):

$$\begin{aligned} L(X) = X_0 + X_1 + X_6 + X_{11} + X_{16} = F_0 - F_\Sigma - \\ -2(X_5 + X_9 + X_{10} + X_{13} + X_{14} + X_{15}) = F_0 - F_\Sigma - 2\Sigma X_{ce} \rightarrow \max \end{aligned} \quad (4.8)$$

де

$$F_\Sigma = F_{12} + F_{13} + F_{14} + F_{23} + F_{24} + F_{34}.$$

При використанні симплекс-методу, який дозволяє знаходити мінімум цільової функції, перетворимо вираз (4.8) до вигляду:

$$L^{min}(X) = -L(X) = (F_\Sigma - F_0) - 2\Sigma(-X_{ce}) \rightarrow \min. \quad (4.9)$$

Рівняння (4.5 і 4.9) містять допустиме і оптимальне рішення, якщо виконуються умови (4.6 і 4.7), оскільки всі коефіцієнти при X_e є від'ємними та дорівнюють -1 .

Якщо покладемо $X_5 = X_9 = X_{10} = X_{13} = X_{14} = X_{15} = 0$, то отримаємо таке рішення сформульованої задачі лінійного програмування:

$$\begin{aligned} L(x) &= F_0 - F_\Sigma; \\ X_0 &= F_{st}; X_1 = F_{1t}; X_2 = F_{12}; \\ X_3 &= F_{13}; X_4 = F_{14}; X_5 = 0; \\ X_6 &= F_{2t} - F_{12}; X_7 = F_{23}; X_8 = F_{24}; X_9 = 0; X_{10} = 0; \\ X_{11} &= F_{S3} - F_{34}; X_{12} = F_{34}; X_{13} = 0; \\ X_{14} &= 0; X_{15} = 0; X_{16} = F_{s4}. \end{aligned} \quad (4.10)$$

Розраховані значення колійних потоків, отримані відповідно до табл. 4.1 і формул (4.10), наведені нижче:

$$X_0 = 0,655; X_1 = 0,614; X_2 = 0,492;$$

$$X_3 = 0,471; X_4 = 0,368; X_6 = 0,204;$$

$$X_7 = 0,45; X_8 = 0,41; X_{11} = 0,491;$$

$$X_{12} = 0,246; X_{16} = 0,614.$$

У табл. 4.2 наведена матриця потоків, що отримана з табл. 4.1, із урахуванням фіксованої довжини пакета (53 ум. од.), значення потоків в Гбіт/с.

Таблиця 4.2

Матриця потоків

	<i>S</i>	1	2	3	4	<i>t</i>
<i>S</i>	-	2,048	1,065	0,737	0,614	0,655
1		-	0,492	0,573	0,369	0,614
2			-	0,451	0,41	0,696
3				-	0,246	1,516
4					-	1,638
<i>t</i>						-

При цьому початковий потік є таким: $F_0 = 5,119$ Гбіт/с.

Граф, що ілюструє модель системи зв'язку самовідновлювального сегмента, наведений на рис. 4.1.

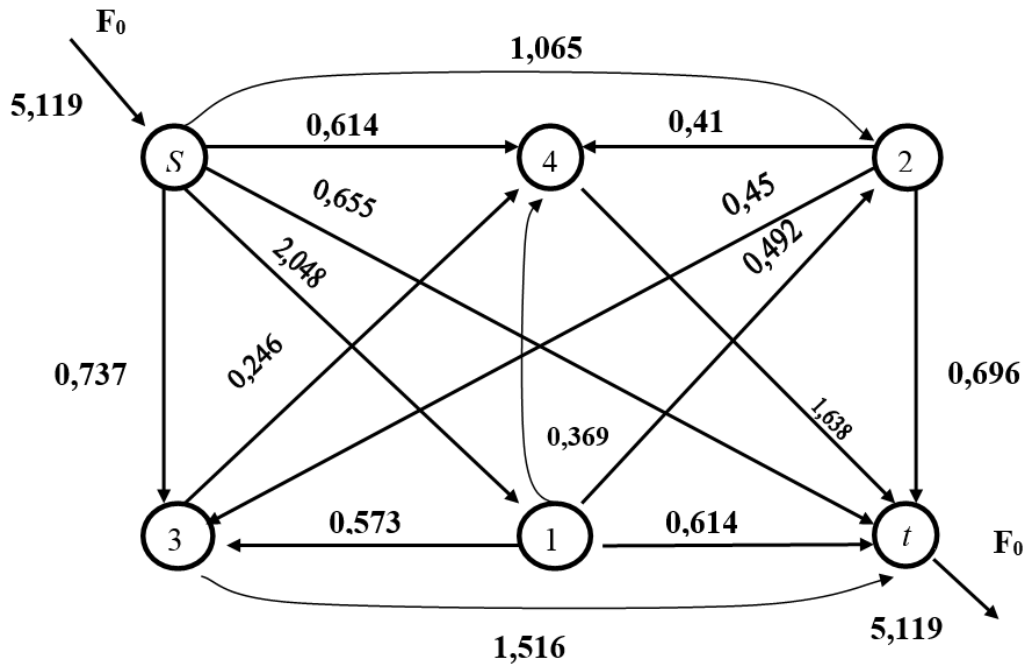


Рис. 4.1. Модель системи зв'язку

Визначимо по формулі (4.9) значення

$$L(X) = 5,119 - 2,57 = 2,549 \text{ Гбіт/с.}$$

Таким чином, по шести найкоротших маршрутах буде передаватися половина всієї інформації. На рис. 4.2 представлені розраховані маршрути передачі даних.

Очевидно, що для отримання повної картини розподілу потоків в сегменті мережі, необхідно аналогічне завдання вирішити для кожної пари виділених вузлів зі своїми початковими потоками F_0^k .

Отримані значення F_{ij}^{kl} для кожного варіанта рішення задачі повинні бути підсумовані за всіма $k, l = 1, n$, після чого можуть розглядатися, як результуючі навантаження на відповідні засоби зв'язку. Якщо при цьому початкові потоки F_0^k генеруються кожним вузлом k , а не надходять ззовні, то їх значення повинні відповідати матриці тяжіння $\|\lambda_{ij}\|$, елементи якої, як правило, задаються в якості вихідних даних.

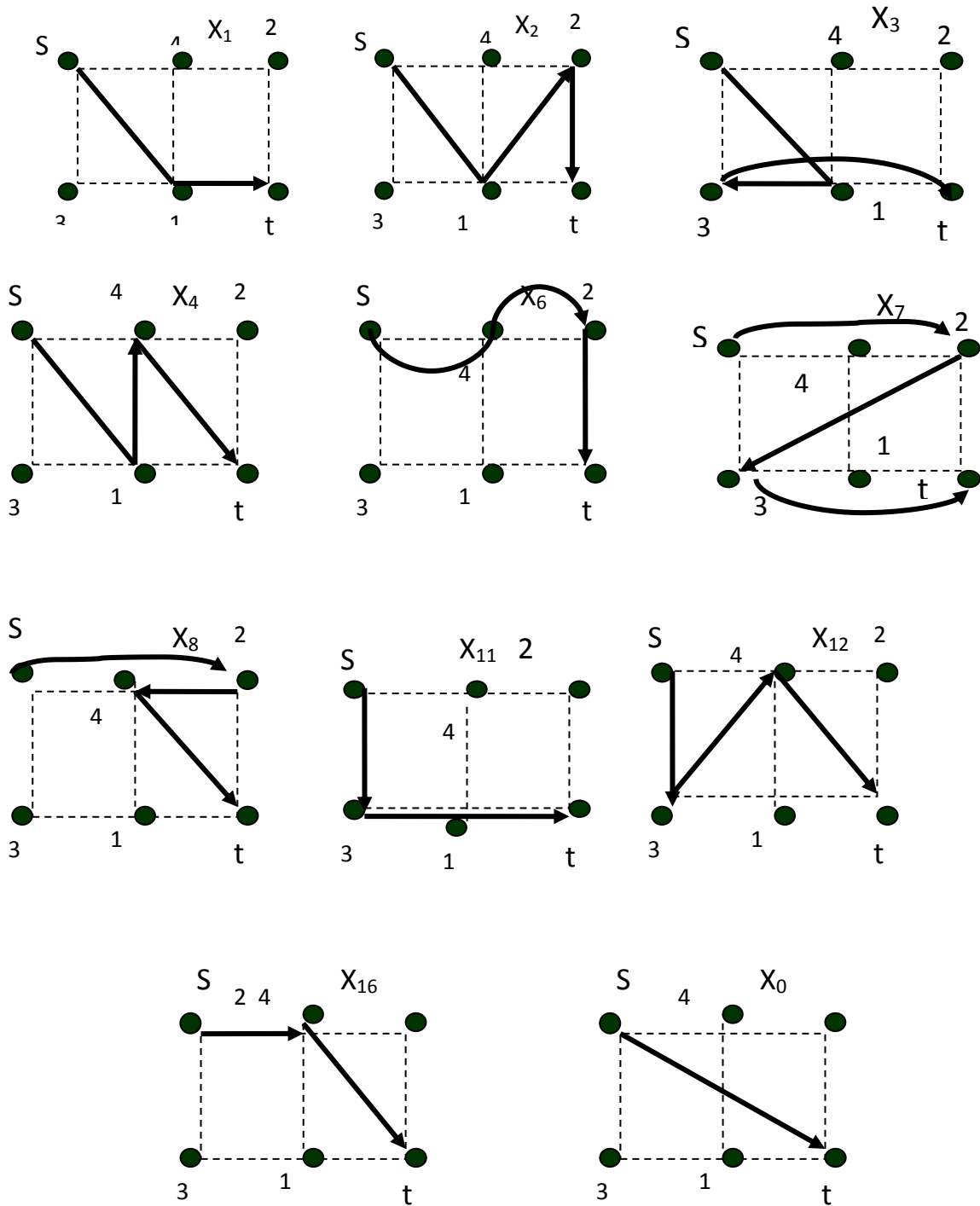


Рис. 4.2. Маршрути передачі даних

У тому випадку, якщо розглянута структура є сегментом деякої глобальної мережі, початкові потоки можуть бути використані для об'єднання окремих фрагментів через спеціальні шлюзи в більш широкую структуру з дотриманням закону збереження для кожної пари суміжних вузлів, що належать різним фрагментам сегмента.

4.3 Реконфігурація самовідновлювального сегмента з топологією, що має регулярну структуру заданої зв'язності

У цьому підрозділі будемо орієнтуватися на самовідновлювальний сегмент, у якому граф з'єднань комутаційних вузлів має регулярну структуру заданої зв'язності. Для цього виконаємо з четвертого по шостий кроки наведеного у підрозділі 4.1 алгоритму.

Скориставшись результатами попереднього підрозділу почнемо з четвертого кроку алгоритму – виконаємо перехід від топологічної структури із повним графом до регулярної структури із заданою зв'язністю.

Отримані співвідношення (4.10) і результати дослідження в підрозділі 2.2 описують статичний розподіл потоків у сегменті, що має топологічну структуру із повним графом. Виконаємо метод упорядкованого виключення гілок для одержання регулярної структури з заданими властивостями, який задовольняє вимогу по надійності (зв'язності). Зменшимо зв'язність шостивузлової мережі на дві одиниці, виключивши зв'язку між усіма вузлами, які утворюють зовнішній гамільтонів цикл. Відповідно до (2.15), рівняння (4.4) при цьому значно спростяться. Оскільки $F_{st} = F_{s1} = F_{4t} = F_{12} = F_{23} = F_{34} = 0$, то звертаються в нуль і все подорожні потоки, які в сумі утворюють відповідний потік у гілці:

$$\begin{aligned} X_0 &= X_1 = X_2 = X_3 = X_4 = X_5 = X_7 = \\ &= X_8 = X_{10} = X_{12} = X_{15} = X_{16} = 0. \end{aligned}$$

Природно в цьому випадку необхідно вимагати виконання закону збереження потоку.

Оскільки відбувається різке скорочення кількості подорожніх потоків (змінних), система рівнянь, що залишилася, виявляється однозначною, тобто має єдине рішення.

На рис. 4.3 наведено перетворений регулярний граф.

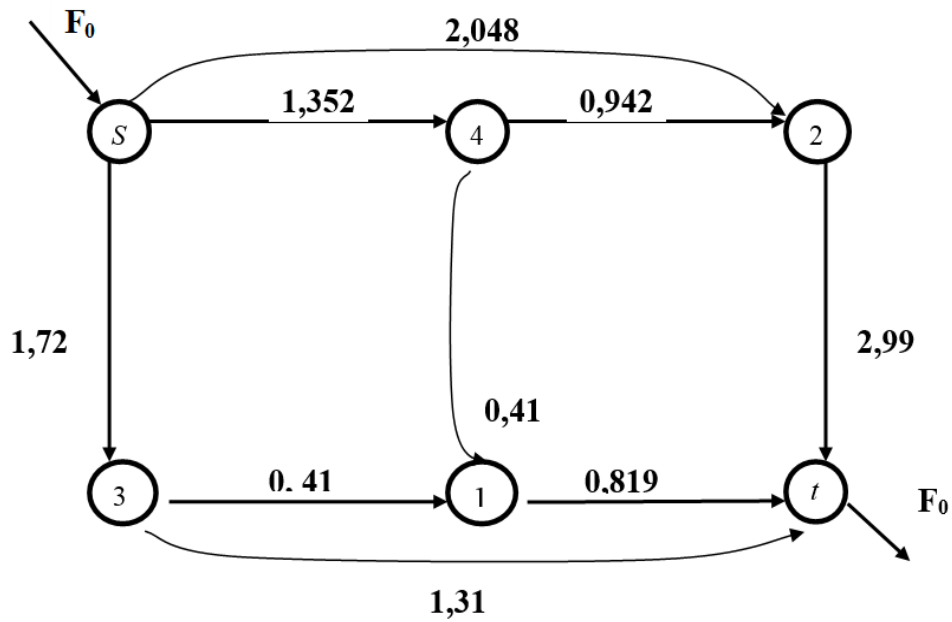


Рис. 4.3. Перетворений регулярний граф

Решта ненульових подорожніх потоків

$$X_6 \neq 0; X_9 \neq 0; X_{11} \neq 0; X_{13} \neq 0; X_{14} \neq 0 \quad (4.11)$$

виконують альтернативну маршрутизацію і використовуються для передачі інформації між вузлами S і t .

Вимагатимемо виконання закону збереження потоку для кожного вузла:

$$\begin{aligned} \text{вузол } S: F_{s2} + F_{s3} + F_{s4} &= F_0; \\ \text{вузол } t: F_{1t} + F_{2t} + F_{3t} &= F_0; \\ \text{вузол } 1: F_{1t} - F_{13} - F_{14} &= 0; \\ \text{вузол } 2: F_{s2} + F_{42} - F_{2t} &= 0; \\ \text{вузол } 3: F_{s3} - F_{13} - F_{3t} &= 0; \\ \text{вузол } 4: F_{s4} - F_{14} - F_{42} &= 0. \end{aligned} \quad (4.12)$$

Задамо початковий потік на попередньому рівні $F_0 = 12073$ ум. од. Перерозподілимо цей потік за рештою гілок, що виходять з вузла S таким чином (відповідно до табл. 4.1 і рис. 4.3):

$$F_{s2} = 4830 \text{ ум. од.}; \quad F_{s3} = 4056 \text{ ум. од.}; \quad F_{s4} = 3187 \text{ ум. од.}$$

Решта із п'яти рівнянь дозволяють однозначно визначити потоки в гілках, розраховані значення яких наведені в табл. 4.3, що виражає приведену матрицю тяжіння.

Таблиця 4.3

Приведена матриця тяжіння

	<i>S</i>	1	2	3	4	<i>t</i>
<i>S</i>	-	0	4830	4056	3187	0
1		-	0	967	967	1932
2			-	0	2222	7052
3				-	0	3090
4					-	0
<i>t</i>						-

Нижче наведені розраховані відповідно до (2.15) значення подорожних потоків з урахуванням фіксованої довжини пакета:

$$X_6 = 2,048 \text{ Гбіт/с}; \quad X_9 = 0,410 \text{ Гбіт/с}; \quad X_{11} = 1,31 \text{ Гбіт/с};$$

$$X_{13} = 0,410 \text{ Гбіт/с}; \quad X_{14} = 0,942 \text{ Гбіт/с},$$

які передають 5,119 Гбіт/с інформації із вузла *S* до вузла *t*.

У табл. 4.4 представлена приведена матриця потоків, а на рис. 4.4 – нові маршрути передачі.

Таблиця 4.4

Приведена матриця потоків (Гбіт/с)

	<i>S</i>	1	2	3	4	<i>t</i>
<i>S</i>	-	0	2,048	1,72	1,352	0
1		-	0	0,410	0,410	0,819
2			-	0	0,942	2,99
3				-	0	1,31
4					-	0
<i>t</i>						-

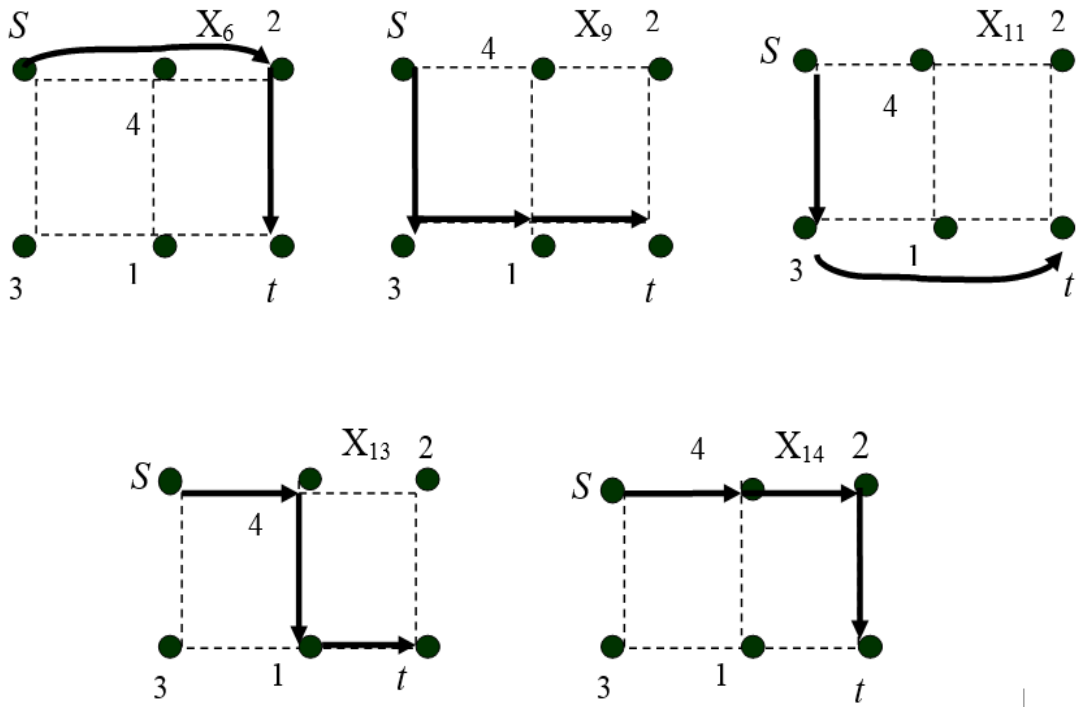


Рис. 4.4. Маршрути передачі інформації

Отже, отримавши регулярну топологічну структуру заданої зв'язності для самовідновлювального сегмента, можемо перейти до п'ятого кроку алгоритму: розрахувати допустиме завантаження засобів зв'язку, використовуючи отримані у попередньому розділі основні співвідношення, що дозволяють визначати оптимальні значення коефіцієнта завантаження каналів.

Прийнятним значенням χ_i^{onm} є тільки ті, які визначаються з виразу:

$$\frac{n_i!}{(n_i \cdot \chi_i)^n} \cdot \sum_{\alpha=0}^{n_i} \frac{(n_i \cdot \chi_i)^\alpha}{\alpha!} = \sum_{\alpha=1}^{m_i} \left[\frac{\alpha(m_i \cdot \alpha)}{n_i} - \chi_i \right] \chi_i^{\alpha-1}, \quad i = \overline{1, k}, \quad (4.13)$$

Кожне рівняння системи (4.13) є функцією змінної χ_i , що дає можливість визначити прийнятні оптимальні значення ${}^{np} \chi_i^{onm}$ для кожної ланки сегмента мережі незалежно від інших:

$${}^{np} \chi_i^{onm} = \frac{\lambda_i}{n_i \mu_i} = \frac{L \cdot \lambda_i}{n_i \cdot L \cdot \mu_i} = \frac{F_i}{V_i n_i}, \quad (4.14)$$

причому для ізотропного сегмента мережі ${}^{np} \chi^{onm} = f(m_i, n_i)$ та не залежить від номера гілки.

Рішення рівняння (4.13) графічним методом дозволяє отримати наближені результати і окремі випадки обчислення коренів в залежності від співвідношення величин m і n .

Більш точні і загальні результати для будь-яких діапазонів m і n (тобто розрахунок мережі будь-якої складності) можна виконати за допомогою програм на одній з мов програмування. Одним з можливих способів пошуку коренів рівняння (4.13), є метод Ньютонa, для якого і була виконана програмна реалізація на мові програмування C++. При цьому використовується процес послідовних наближень, який припиняється при виконанні умови $|\chi_j - \chi_{j-1}| < \varepsilon$.

Вибирається початкове наближення χ_0 , обчислюються коріння рівнянь таким чином:

$$\chi_j = \chi_{j-1} - \frac{f(\chi_{j-1})}{f'(\chi_{j-1})}, \quad j = 1, 2, 3, \dots$$

Початкове наближення χ_0 вибрано таким чином, що виконується умова:

$$f(\chi_0) \cdot f''(\chi_0) > 0,$$

тоді збіжність отриманої послідовності до кореня рівняння гарантована. Так як нас цікавлять тільки позитивні корені, початкове наближення підбирається, починаючи з 0,01 з кроком 0,1, враховуючи зазначену вище умову. Коріння рівняння обчислюються з точністю ε . У програмах функція (4.13) представлена як $f(\chi) = g(\chi) - h(\chi)$, де

$$g(\chi) = n! \sum_{\alpha=0}^n \frac{(n \cdot \chi)^{\alpha-n}}{\alpha!},$$

$$g'(\chi) = \frac{n!}{\chi \cdot (n \cdot \chi)^n} \sum_{\alpha=0}^n \frac{(\alpha - n)(n \cdot \chi)^\alpha}{\alpha!},$$

$$g''(\chi) = \frac{n!}{\chi^2 \cdot (n \cdot \chi)^n} \sum_{\alpha=0}^n \frac{(\alpha - n)(\alpha - n - 1)(n \cdot \chi)^\alpha}{\alpha!},$$

$$h(\chi) = \sum_{\alpha=1}^{m-1} \left[\frac{\alpha(m-\alpha)}{n} - \chi \right] \chi^{\alpha-1},$$

$$h'(\chi) = \sum_{\alpha=1}^{m-1} \left[\frac{\alpha(m-\alpha)(\alpha-1)}{m} - \chi \right] \chi^{\alpha-2},$$

$$h''(\chi) = \sum_{\alpha=1}^{m-1} \left[\frac{\alpha(m-\alpha)(\alpha-1)(\alpha-2)}{n} - \chi \right] \chi^{\alpha-3}.$$

Чергові значення функцій обчислюються з попередніх ітераційно:

$$h_j = h_{j-1} + \delta_1, \quad j=1,2,\dots, \quad \text{де} \quad \delta_1 = \frac{h_1(\chi)}{h_0(\chi)},$$

$$g_j = g_{j-1} + \delta_2, \quad j=1,2,\dots, \quad \text{де} \quad \delta_2 = \frac{g_1(\chi)}{g_0(\chi)}.$$

Програми та чисельні результати наведені в додатку Д (рис. Д.1 – Д.4 та табл. Д.1), а результати обчислення коренів представлені графічно на рис. 4.5.

Вирішивши відповідну оптимізаційну задачу та знайшовши допустиме завантаження засобів зв'язку можемо перейти до наступного, шостого кроку алгоритму: провести оцінку необхідної кількості буферних елементів для черг в вузлах комутації, а також кількість необхідних каналів.

Криві залежності, що відповідають формулами (4.13) і (4.14), представлені на рис. 4.6 у суміщеній системі координат:

$$\chi_{onm} = f(n, m) \quad \text{та} \quad \chi_{onm} = f(F, V).$$

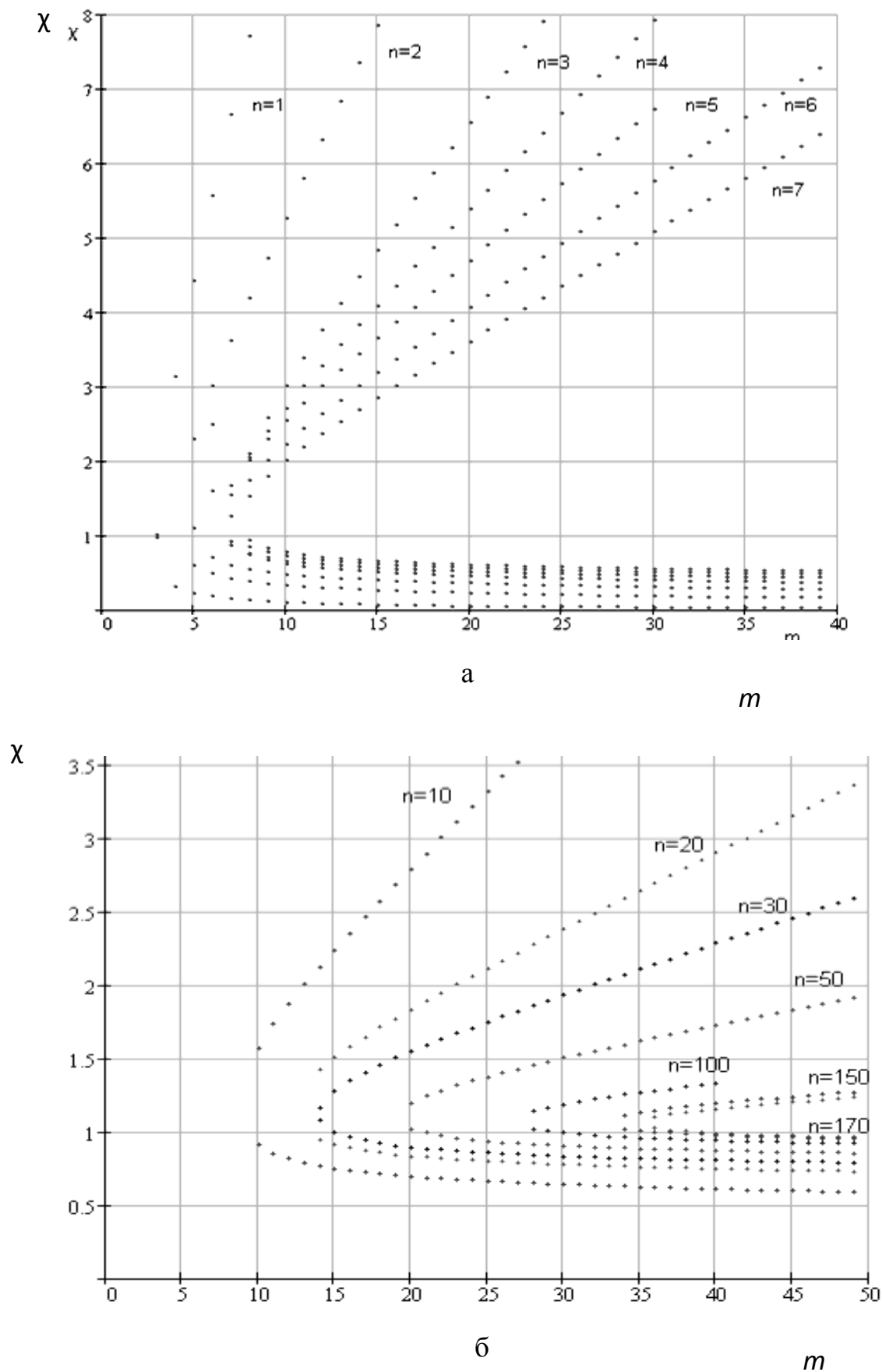


Рис. 4.5. Графіки залежностей завантаження каналу $\chi(n, m)$ при:
 а – $n = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$; б – $n = 10, 20, 30, 50, 100, 150, 170$

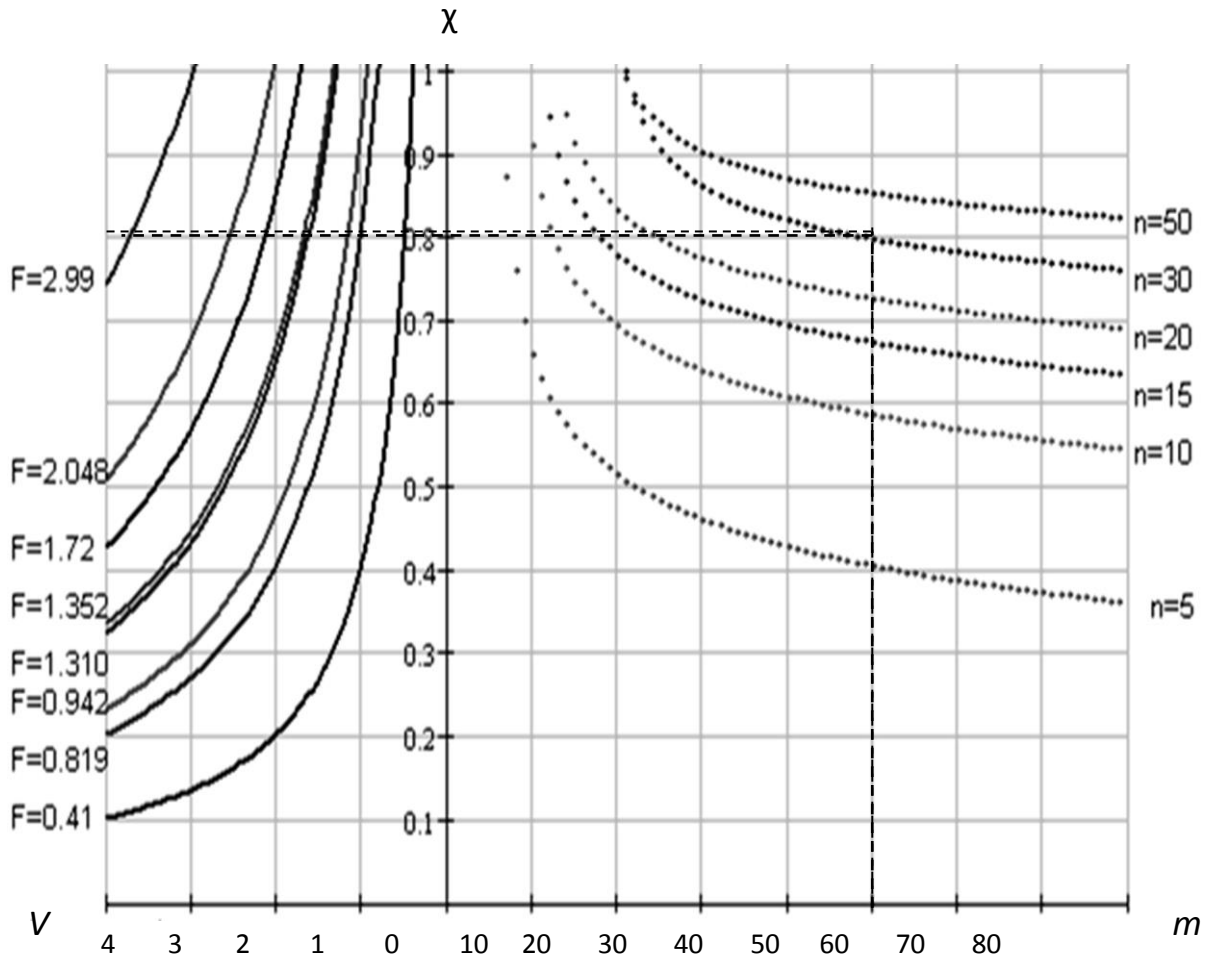


Рис. 4.6. Суміщені графіки залежностей $\chi_{onm} = f(n, m)$ та $\chi_{onm} = f(F, V)$

Ці криві представляють собою номограму, що дозволяє визначити графічно значення необхідних оптимальних пропускних спроможностей і кількість елементів буферної пам'яті, які забезпечують найкраще в сенсі мінімуму часу затримки і необхідного значення ймовірності відмови розподілу потоків по галузях у відповідності з потоками (табл. 4.4).

Відповідні значення кількості елементів буферної пам'яті m визначається з правої частини номограми для заданого значення n . Так, наприклад, при ${}^{np}\chi^{onm} = 0,8$ для $n = 30$ число елементів буфера $m = 50$, а для $n = 10$ – $m = 12$.

При значенні коефіцієнта завантаження каналу ${}^{np}\chi^{onm} = 0,8$ і $m = 50$, значення пропускних спроможностей у сегменті (рис. 4.3) наведені в табл. 4.5, а в табл. 4.6 – ${}^{np}\chi^{onm} = 0,78$ і $m = 70$.

Таблиця 4.5

Пропускні спроможності (Гбіт/с), $np \chi^{onm} = 0,8$ і $m = 50$

	S	1	2	3	4	t
S	-	0	2,55	2,15	1,7	0
1		-	0	0,5	0,5	1
2			-	0	1,15	3,75
3				-	0	1,65
4					-	0
t						-

Таблиця 4.6

Пропускні спроможності (Гбіт/с), $np \chi^{onm} = 0,78$ і $m = 70$

	S	1	2	3	4	t
S	-	0	2,65	2,12	1,75	0
1		-	0	0,55	0,55	1,05
2			-	0	1,2	3,8
3				-	0	1,66
4					-	0
t						-

Аналіз показує, що для визначення числа елементів буферної пам'яті, необхідно знати загальну кількість стандартних каналів в кожному напрямку передачі. Нехай архітектура сегмента мережі передбачає призначений для користувача інтерфейс, який представляє канали 3 типів:

тип В – невелика швидкість, але є можливість формувати групу таких каналів кількістю до 31;

тип D - зі середньою швидкістю;

тип Н – високошвидкісні канали з високою (Н0), вищою (Н11) та надвисокою (Н12) швидкостями передачі. Також врахуємо вимоги до типів інтерфейсу, що підтримуються самовідновлювальним сегментом.

Варіант розподілу каналів для значень пропускних спроможностей з таблиці 4.5 наведені в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7

Варіант розподілу каналів

	<i>S</i>	1	2	3	4	<i>t</i>
<i>S</i>	-	0	31B+D	H12	H11	0
1		-	0	6B+D	6B+D	12B+D
2			-	0	14B+D	H11+H12
3				-	0	23B+D
4					-	0
<i>t</i>						-

4.4 Розрахунок значень основних показників реконфігурованого самовідновлювального сегмента

Методи розрахунку числових показників, що характеризують якість функціонування реконфігурованого самовідновлювального сегмента, наведені з сьомого по десятій кроки алгоритму, наданого у підрозділі 4.1.

Скористуємося тими результатами, що були отримані у попередніх підрозділах.

На сьомому кроці оцінюється значення часу мінімальної середньої затримки. Криві залежності при $n = \text{const}$, представлені на рис. 4.7. Оскільки трафік є таким, що

$$\gamma = \sum_{i,j=1}^k F_{ij},$$

то відповідно до табл. 4.1 $\gamma = 28593$ ум. од.

З рис. 4.7 для $m = 50$ і $n = 30$ отримуємо для одиничного трафіку

$$\bar{T}_{зад}^{\min} = 24 \text{ мс},$$

тоді

$$\bar{T}_{зад}^{\min} = \frac{1}{\gamma} 24 = \frac{1}{28593} 24 \approx 0,8394 \text{ мс}.$$

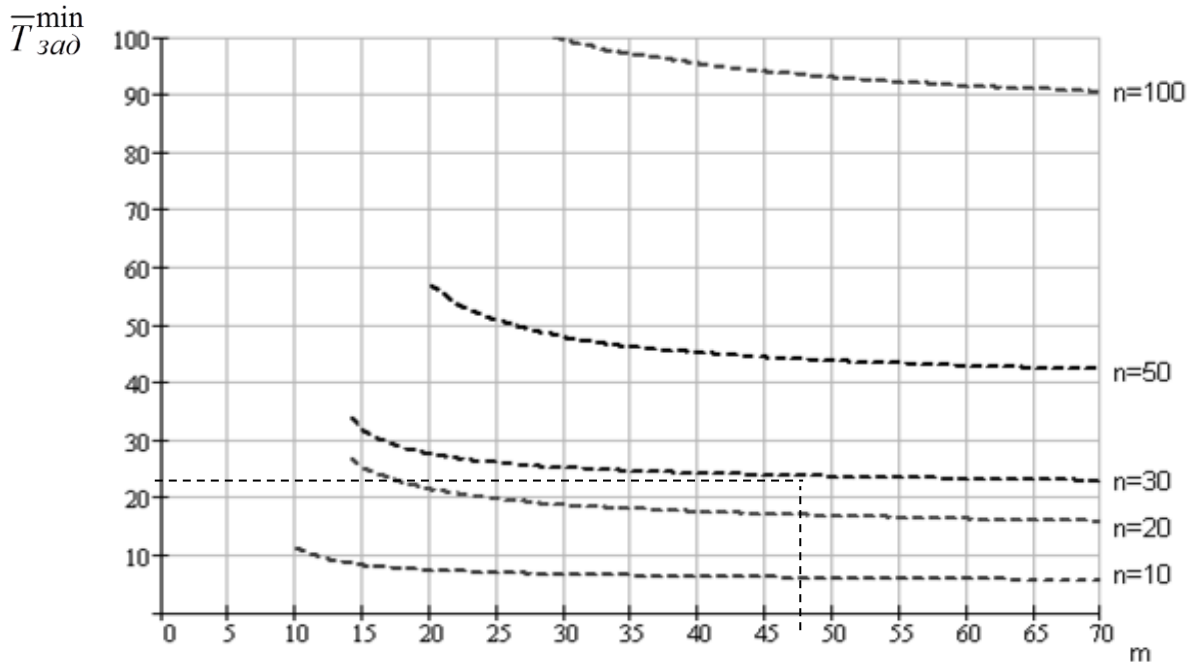


Рис. 4.7. Залежності $\bar{T}_{зад}^{\min} = f(m)$ для $n = 10, 20, 30, 50, 100$

На восьмому кроці оцінюється джитер затримки, тобто допустиме відхилення часу затримки від номінальної величини. Джитер затримки визначається чергами в комутаційних пристроях. В умовах сильного завантаження час перебування в буфері залежить від інтенсивності вхідного трафіку.

Таким чином при передачі трафіку реального часу, чутливого до коливань затримки виникають проблеми, пов'язані з порушенням масштабу часу. Для усунення негативного впливу джитера затримки в процесі доставки повідомлень в кінцевому обладнанні здійснюють додаткову затримку пакетів.

Якщо джиттер затримки буде перевершувати встановлену величину додаткової затримки $\tau_{\text{дод}}$, то такі пакети не включаються в процес депакетизації і вважаються втраченими, тобто умова допустимого значення джиттера є такою:

$$\tau_{\text{дж}} \leq \tau_{\text{дод}}. \quad (4.17)$$

Надалі розраховується дуже важливий показник – значення ймовірності відмови (це дев'ятий, передостанній крок алгоритму, наведеного у підрозділі 4.1. Графіки ймовірності відмови $P_{\text{відм}} = f(m)$ при $n = \text{const}$ наведені на рис. 4.8 і побудовані за формулами, коті були наведені у попередньому розділі.

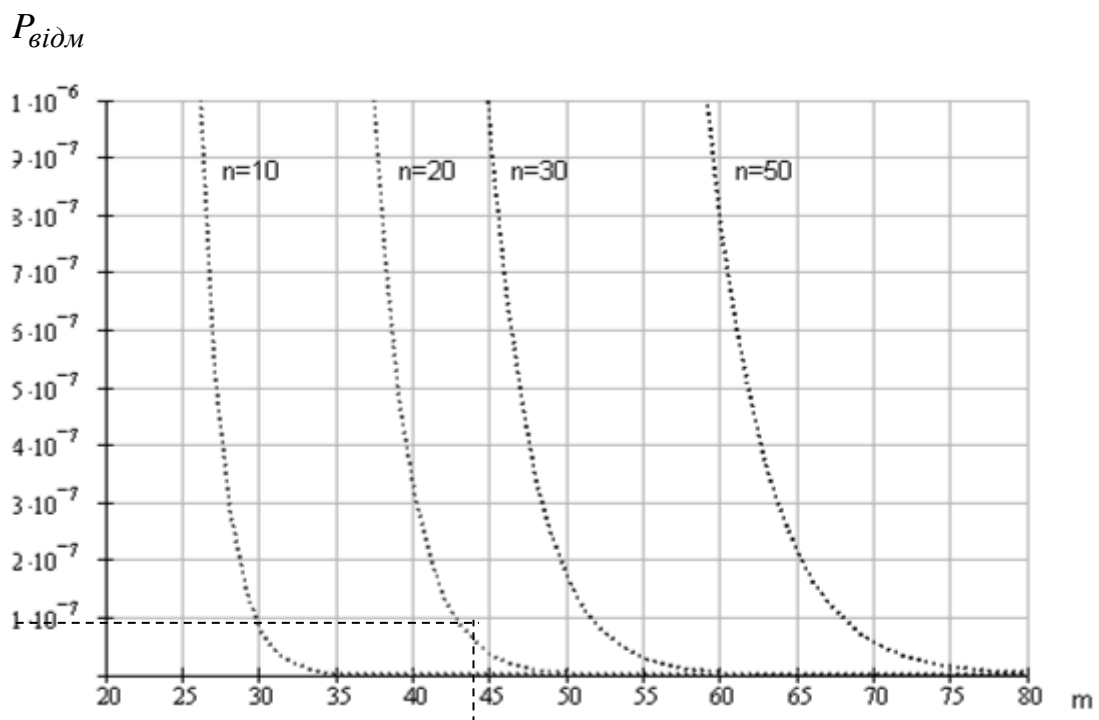


Рис. 4.8. Залежність ймовірності відмови $P_{\text{відм}} = f(m)$ для фіксованих $n = 10, 20, 30, 50$

Наприклад, для $n = 30$ та $m = 50$ отримаємо $P_{\text{відм}} = 1,7 \cdot 10^{-7}$, яка є необхідною ймовірністю відмови $P_{\text{відм}}^{\text{нотр}}$.

І наприкінці, у останньому, десятому кроці, визначається можливість зниження вартості засобів зв'язку. Враховуючи дані, отримані в табл. 4.5, 4.6 визначимо загальну вартість, наприклад, для $n = 30$ (в умовних одиницях):

$$D_1 = v \sum_{ij=1}^k V'_{ij} = 14,95v \text{ для } m = 50; D_2 = v \sum_{ij=1}^k V''_{ij} = 15,41v \text{ для } m = 70. \quad (4.18)$$

Так як значення пропускних спроможностей в табл. 4.6 отримані за рахунок реалізації обмінних процесів, то вартість D_2 фактично є вартістю засобів зв'язку, ємність яких може бути досягнута за рахунок реального збільшення їх пропускної здатності. Тому для збереження основних якісних показників мережі на постійному рівні фактична вартість засобів зв'язку реконфігурованого самовідновлювального сегмента дорівнює D_1 .

Таким чином, відносне зниження вартості засобів зв'язку за рахунок обміну буферів на пропускну здатність, у відсотковому відношенні, складе

$$\frac{D_2 - D_1}{D_1} \cdot 100\% = v \cdot \left(\sum_{i,j=1}^k V''_{ij} - \sum_{i,j=1}^k V'_{ij} \right) / \left(v \sum_{i,j=1}^k V'_{ij} \right) \approx 3\%. \quad (4.19)$$

Для високошвидкісного трафіка цей вигравш буде істотно вище за рахунок збільшення протяжності понад пологою ділянкою кривих $f(F, V)$ на рис. 4.6.

4.5 Оцінка ефективності гібридної комутації у реконфігурованому самовідновлювальному сегменту

Необхідна кількість буферних елементів черги повинна бути мінімальною, але достатньою для забезпечення обмінних процедур. Але безконтрольна витрата буферної пам'яті веде до зростання затримок обслуговування [78, 109]. Розбиття на пакети дуже довгих повідомлень може призводити до ситуацій, коли ці повідомлення будуть дуже довго передаватися. Тому для самовідновлювальних сегментів, де час виконання запитів є критичним [115], доцільним є використання гібридної комутації, а при врахуванні поточного стану сегменту – методу адаптивної комутації. Гібридна комутація заснована на інтеграції комутаційного обладнання, необхідного для реалізації кожного методу комутації.

Перевага використання пропонуємого гібридного методу - запобігання

блокувань мережі, підвищення ефективності використання каналів зв'язку при заданому рівні відмов в обслуговуванні і збереження масштабу часу при передачі довгих повідомлень.

Поставлена мета досягається тим, що в результаті діалогу з'ясовується довжина повідомлення (L) і порівнюється з граничним значенням

$$L_{гран} = k \cdot L_{кр} + b, \quad (4.20)$$

де $L_{кр}$ – заздалегідь встановлена для кожного конкретного сегмента мережі критична довжина повідомлення; k – коефіцієнт пропорційності, що враховує ступінь зайнятості обсягу пам'яті; b – величина, що відображає динаміку зміни трафіку. Якщо довжина повідомлення перевищує порогове значення $L > L_{гран}$, то встановлюють реальне з'єднання і повідомлення передають в спеціальному режимі, а якщо $L \leq L_{гран}$, то розбивають його на пакети та встановлюють віртуальне з'єднання.

Таким чином, повідомлення центру комутації про довжину підлягає передачі повідомлення в фазі встановлення з'єднання, дозволяє запобігти колізії в мережі, пов'язаної з переповненням пам'яті вузлів комутації, підвищує ефективність використання засобів зв'язку за рахунок передачі дуже довгих повідомлень в реальному масштабі часу і зменшує загальну кількість повідомлень, які отримують відмову в з'єднанні через відсутність вільних буферів пам'яті. При цьому зберігання довгих повідомлень покладено на абонента, причому час зберігання не повинно перевищувати деякої величини T .

Структурна схема пристрою, що реалізує даний спосіб, представлена на рис. 4.9, де позначено: МУ – модуль управління; МІ – модуль ідентифікації; МПП – модуль проміжної пам'яті; МД – модуль доступу; МС модуль сполучення засобів зв'язку з центром комутації; 1 – вхідна лінія; 2 – вихідні лінії; 3 – магістраль сегмента.

Приклад реалізації модуля ідентифікації представлений на рис. 4.10, де граничне значення $L_{гран}$ може бути розраховане за формулою:

$$L_{гран} = L_{кр} \left(1 - \frac{m_3(t)}{m} \right) + \beta_1 \frac{dm_3(t)}{dt}, \quad (4.2)$$

де m – загальний обсяг пам'яті; $\frac{dm_3(t)}{dt}$ – похідна за часом від зайнятого обсягу пам'яті; $m_3(t)$ – поточне значення зайнятого обсягу пам'яті; β_1 – коефіцієнт пропорційності.

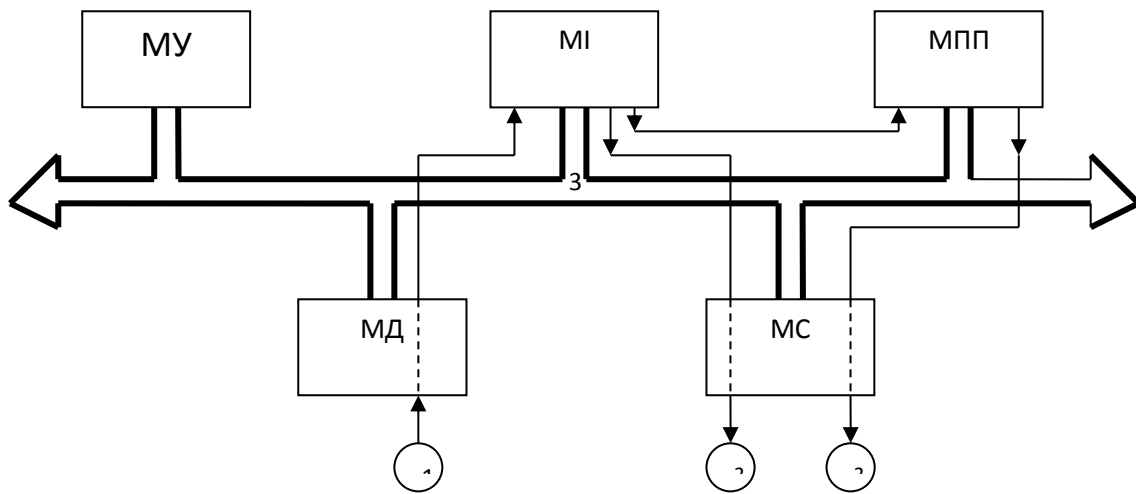


Рис. 4.9. Модульна структура центра комутації

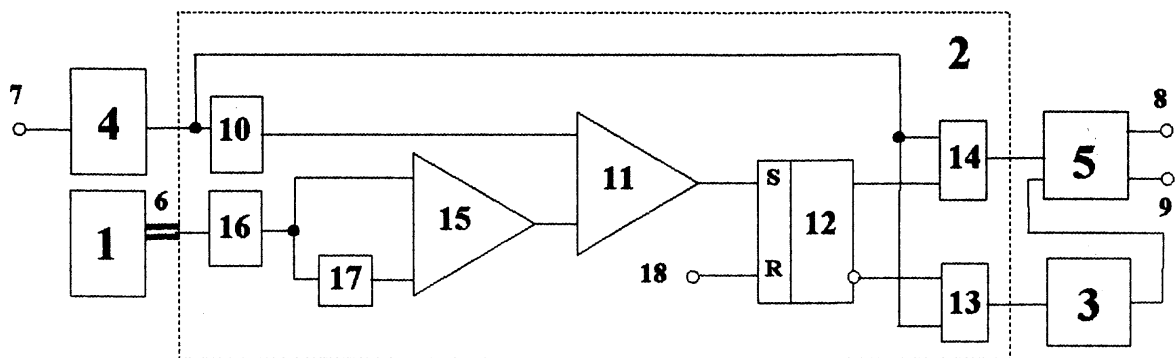


Рис. 4.10. Реалізація модулю ідентифікації:

1 – МУ; 2 – МІ; 3 – МПП; 4 – МД; 5 – МС; 10, 16 – перший і другий цифро-аналоговий перетворювач; 11 – схема порівняння; 12 – тригер; 13, 14 – елементи "І" (логічного множення); 15 – підсумковий підсилювач, 17 – диференціюючий елемент, 18 – клемма "Установка"

При проведенні реконфігурації самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі було необхідно досягнути такого зниження завантаження на магістральні канали (МК) між вузлами комутації сегмента, при якому будуть виконані умови QoS, але витрати на додаткове обладнання будуть мінімальними. При цьому автономний сегмент повинен не втратити властивість локальної самовідновлюваності. При моделюванні процесу реконфігурації сегмента, що розглядається, були використані запропоновані у роботі методи, включаючи масштабування в глибину і в штирину та гібридну комутацію. На рис. 4.11 наведені результати порівняння за критерієм відсоткового додаткового збільшення завантаження МК при збільшенні вузлів комутації сегмента мережі передачі даних (СМПД) для стандартної реконфігурованої структури та сформованої з використанням запропонованих методів.

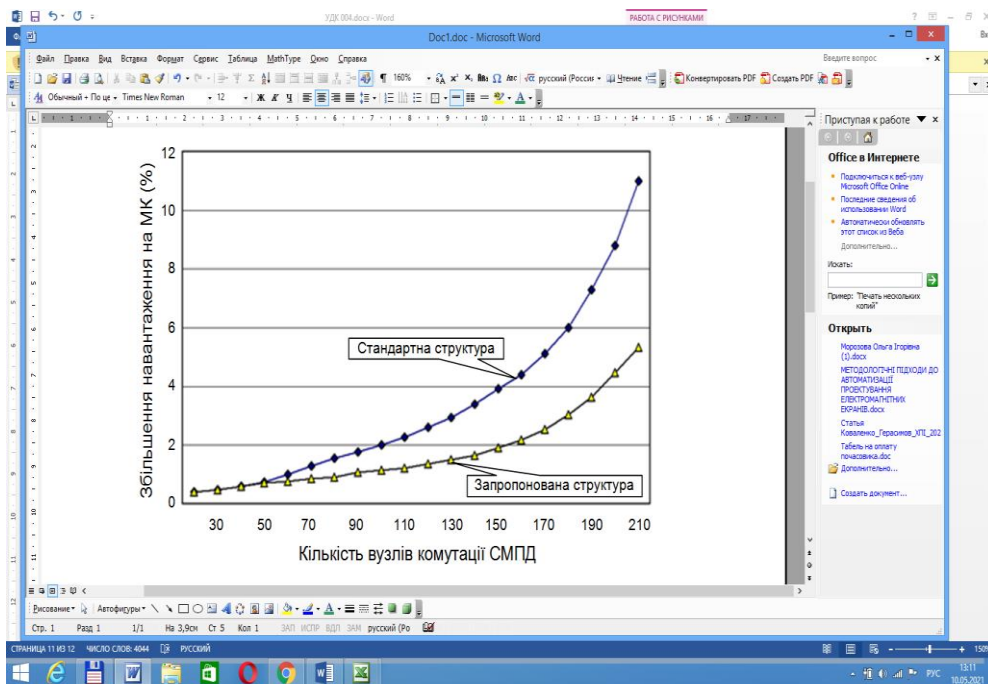


Рис. 4.10. Порівняння структур за критерієм завантаження МК

Результати моделювання показали перевагу запропонованого підходу за критерієм завантаження МК, котра зростає при збільшенні кількості комутаційних вузлів. Так, при їхній кількості, що перевищує 200, таке

навантаження зменшується практично в два рази. Слід зауважити, що при цьому поліпшуються всі показники QoS.

Висновки за розділом 4

У розділі проведена порівняльна оцінка розроблених та існуючих моделей і методів реконфігурації самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі, при цьому були отримані такі результати.

У підрозділі 4.1 запропонований десятикроковий алгоритм розрахунку значень основних показників реконфігурованого самовідновлювального сегмента, згідно якого виконуються процедури реконфігурації топологічної структури автономного сегмента, обирається спосіб комутації засобів зв'язку та розраховуються їхні пропускні спроможності, що повинні забезпечити необхідні якісні показники сегмента, що розглядається, проводяться оцінки кількості буферних елементів черг та оцінюються показники ефективності процесу реконфігурації.

У підрозділі 4.2 розглянутий процес реконфігурації самовідновлювального сегмента з повною топологією зв'язків між комутаційними вузлами відповідно до запропонованого алгоритму на прикладі сегмента, що має шість вузлів комутації. Сформовані найкоротші маршрути передачі даних між комутаційними вузлами та відповідно до кожного з них альтернативний маршрут, котрий не має з основним загальних подорожніх вузлів.

У підрозділі 4.3 на основі результатів попереднього підрозділу розглянутий процес проведення реконфігурації самовідновлювального сегмента з топологією, що має регулярну структуру заданої зв'язності. Після переходу до регулярної структури розраховане допустиме завантаження засобів зв'язку, що дозволило визначати оптимальні значення коефіцієнтів завантаження каналів. Проведена оцінка необхідної кількості буферних елементів для черг в вузлах комутації, а також кількість необхідних каналів для засобів зв'язку реконфігурованого сегмента.

У підрозділі 4.4 розраховуються значення основних показників, що характеризують QoS для реконфігурованого самовідновлювального сегмента. Розрахунки використовують результати попередніх підрозділів. Показано, що при високошвидкісному трафіку запропоновані методи реконфігурації надають більш суттєві переваги. Проведено оцінку вартості засобів зв'язку при реконфігурації і отримано відносне зниження вартості мережі (біля 3%) за рахунок використання процесів обміну обсягу буферної пам'яті на каналну ємність засобів зв'язку реконфігурованого сегмента.

У підрозділі 4.5 пропонується та обґрунтовується підхід до використання гібридної комутації у сегменті, що розглядається, який поєднує декілька різних режимів комутації з адаптивною границею між цими режимами в залежності від стану системи зв'язку реконфігурованого самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі. Проведено порівняння різних методів за критерієм завантаження магістральних каналів сегмента. Результати моделювання показали перевагу запропонованого підходу за критерієм завантаження магістральних каналів, котра зростає при збільшенні кількості комутаційних вузлів. Так, при їхній кількості, що перевищує 200, таке навантаження зменшується практично в два рази. Слід зауважити, що при цьому поліпшуються всі показники QoS.

ВИСНОВКИ

Сукупність отриманих у дисертаційній роботі результатів вирішує актуальне науково-прикладне завдання, яке полягає в розробці моделей та методів реконфігурації самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі з метою підвищення ефективності розподілу обчислювальних ресурсів для виконання вимог щодо якості обслуговування.

У дисертаційній роботі отримані такі наукові та практичні результати:

1. Проведено аналіз сучасного стану і тенденцій розвитку методів розподілу обчислювальних ресурсів у самовідновлювальних мережах та їх компонентах. Показано, що основним завданням залишається ефективне використання вузлових і каналних ресурсів сегмента при забезпеченні необхідної якості обслуговування користувачів. Його вирішення вимагає, в першу чергу, розробки математичної моделі топологічної структури сегмента і методів підвищення ефективності використання обчислювальних ресурсів з урахуванням особливостей самовідновлення.

2. Обґрунтовано критерій оцінки якості розподілу ресурсів у самовідновлювальних мережах та їх компонентах. Для цього сформульовані і обґрунтовані основні принципи реконфігурації, що використовуються як основа для математичного моделювання структурно-мережних параметрів у таких мережах. Сформований критерій мінімізації середнього часу затримки дозволяє визначити потрібну продуктивність самовідновлювальної телекомунікаційної мережі або її складових, значення якої визначається, в першу чергу, пропускнуою здатністю засобів зв'язку.

3. Розроблений комплекс моделей топологічної структури самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі, який, на відміну від існуючих, враховує особливості самовідновлювальних мережних компонент, дозволяє сформувати регулярну структуру сегмента заданої зв'язності та базується на використанні модифікованого метода Туега-Стейгліца. Це дозволяє

виконати вимоги QoS щодо надійності та реалізувати процес нарощування структури при нестачі обчислювальних ресурсів.

4. Удосконалено комплекс методів реконфігурації самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі, який складається із таких методів: розрахунку мінімальної середньої затримки повідомлень, визначення ширини смуги пропускання та сгладжуючого впливу кількості буферних елементів черг на завантаження каналів. Даний комплекс відрізняється від відомих сумісним використанням властивостей локальної самовідновлюваності та горизонтальної масштабованості, що дозволяє виконати вимоги QoS щодо середнього часу затримки повідомлень та зменшити його у порівнянні з існуючими методами у середньому до 8%.

5. Набув подальшого розвитку метод перерозподілу ресурсів самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі при пульсуючому характері трафіка за рахунок використання спектральних властивостей процесу передачі даних, що дозволяє уникнути втрат пакетів при перевантаженні каналів зв'язку та зменшити ймовірність спотворення повідомлень на 5%.

6. Проведено порівняльну оцінку розроблених та існуючих моделей і методів реконфігурації самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі, що дозволило показати ефективність роботи розроблених моделей і методів. Проведена оцінка вартості процесу реконфігурації і отримано відносне зниження її вартості (близько 3%) за рахунок використання процесів обміну обсягу буферної пам'яті на каналну ємність мережі.

7. Практичні результати, які отримані, підтверджені актами впровадження та доводять коректність теоретичних положень дисертаційної роботи, високу ефективність розроблених моделей та методів; результати дисертаційної роботи впроваджено у Державному підприємстві «Південний державний проектно-конструкторський та науково-дослідний інститут авіаційної промисловості», у Державному підприємстві «Український державний інститут по проектуванню заводів важкого машинобудування» та в навчальному процесі Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».

Запропоновані моделі та методи реконфігурації самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі з метою підвищення ефективності розподілу обчислювальних ресурсів для виконання вимог щодо якості обслуговування були застосовані при вдосконаленні існуючих телекомунікаційних мереж та в ході виконання науково-дослідних робіт у проектно-конструкторських та проектно-дослідних установах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аветісян А.І. Планування команд і конвейеризация циклів на сучасних архітектурах. *Праці інституту системного програмування*. 2012. С. 19-32.
2. Агеєв Д. В. Проектування сучасних телекомунікаційних систем з використанням багаторівневих графів. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2010. Т.4. № 2(46). С. 75-77.
3. Алнаері Фрхат Алі, Срібна І. М, Кучук Г. А., Лебедєв О. Г. Синтез топологічної структури самовідновлюваного та масштабованого сегмента мережі передачі даних. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2020. № 4 (69). С. 95-106.
4. Алнаері Фрхат Алі, Кучук Н. Г., Шефер О. В., Чернева Г. П. Визначення пропускних здатностей самовідновлювального сегмента мережі. *Сучасні інформаційні системи*. 2021. Т. 5, № 2. С. 114-119.
5. Алнаері Фрхат Алі, Коломійцев О. В., Петровська І. Ю. Метод розрахунку розміру буферної пам'яті самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава: НУ «Полтавська політехніка ім. Ю. Кондратюка», 2021. Вип. 2(64). С. 144-147.
6. Алнаері Фрхат Алі, Шефер О. В. Метод побудови регулярної структури з заданою зв'язністю. *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління: Тези доповідей сьомої міжнародної науково-технічної конференції, 14 – 15 квітня 2017 р.* С. 51.
7. Алнаері Фрхат Алі, Шефер О. В., Головка Г. В., Лучко М. О., Чайка Є. А. Особливості початкової інформації для роботи з комп'ютерними мережами. *Електронні та мехатронні системи: теорія інновації, практика: Зб. наук. праць за матеріалами VI Всеукраїнської науково-практ. конф., 6 листопада 2020 р.*, Полтава: НУПП, 2020. С. 221-223.
8. Бертсекас Д., Галлагер Р. Сети передачи данных. М.: Мир, 1989. 544 с.
9. Бесслер, Р., Дейч А. http://79.120.87.158/cgi-bin/irbis64r_91/cgiirbis_64.exe?Z21ID=&I21DBN=EK&P21DBN=EK&S21STN=1&S21REF=&S21FMT=&C21CO

[M=S&S21CNR=&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=M=&S21STR=](#)Проектирование сетей связи. М.: Радио и связь, 1988. 267 с.

10. Братченко Г. Д., Перелигін Б. В., Банзак О. В. Методи та засоби обробки сигналів. Одеса: Плутон, 2014. 452 с.

11. Вартанян В. М., Штейнбрехер Д. О. Комплексний метод оцінки ефективності системи управління знаннями в проектному середовищі. *Сучасні інформаційні системи*. 2019. Т. 3, №. 2. С. 64-68. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.1.09>

12. Вегешна Ш. Качество обслуживания в сетях IP. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. 386 с.

13. Величко В. В., Субботин Е. А., Шувалов В. П., Ярославцев А. Ф. Телекоммуникационные системы и сети. М.: Горячая линия-Телеком, 2005. 592 с.

14. Вишневикий В. М., Семенова О. В. Системы поллинга: теория и применение в широкополосных беспроводных сетях. М.: Техносфера, 2007. 380 с.

15. Глоба Л., Зщманов С., Суліма С. Метод реконфігурації мережі зв'язку з віртуалізованими ресурсами. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Збірник наукових праць. Полтава: ПНТУ, 2019. Т. 1 (53). С. 137-141. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2019.1.137>.

16. Гургенидзе А. Т., Кореш В. И. Мультисервисные сети и услуги широкополосного доступа. М.: Наука и техника, 2003. 400 с.

17. Дмитрієнко В. Д., Кучук Г. А. Моделювання процесу управління потоковою передачею фрактального трафіка мультисервісних мереж. *Системи управління, навігації та зв'язку*. К. ЦНДІ НіУ, 2009. Вип. 4 (12). С. 161-166.

18. Дробот О. А. Метод забезпечення гарантованої якості обслуговування інформаційного трафіка для інфокомунікаційної мережі військового призначення. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2012. № 2 (8). С. 115–119.

19. Зайченко Ю. П. Комп'ютерні мережі. Київ : Видавництво Слово, 2003. 283 с.

20. Іванущак Н. М., Пасічник В. В. Моделювання розвитку структур

комп'ютерних мереж. *Східно–Європейський журнал передових технологій*. 2013. Т. 3, № 2 (63). С. 13–19.

21. Іранська Н., Улько С. Основні аспекти створення мобільних додатків та вибір інструментів їх розробки. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Збірник наукових праць. Полтава: ПНТУ, 2020. Т. 1 (59). С. 74-78. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.1.074>.

22. Клейнрок Л. *Вычислительные системы с очередями*. М.: Мир, 1979. 600 с.

23. Коваленко А. А., Кучук Г. А. Методи синтезу інформаційної та технічної структур системи управління об'єктом критичного застосування. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 1. С. 22–27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>.

24. Коваленко А., Ляшенко О., Даниленко О. Поведінка черг під час використання ієрархічної моделі. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Збірник наукових праць. Полтава: ПНТУ, 2019. Т. 2 (54). С. 110-113. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2019.2.110>.

25. Конахович Г.Ф., Чуприн В.М. Сети передачи пакетных данных. Киев : МК-Пресс, 2006. 272 с.

26. Коновалов Г.В. Многомерные сети – будущее инфокоммуникационных сетей. *Электросвязь*. 2008. № 4. С. 28-32.

27. Крамаренко В.В. Інформаційні системи та структури даних. Дніпропетровськ : Системні технології, 2000. 188 с.

28. Кульгин М.Б. Технологии корпоративных сетей. С.-Пб. : Питер, 2000. 704 с.

29. Куроуз Д., Росс К. Компьютерные сети. СПб. : Питер, 2004. 765 с.

30. Кучук Н. Г. Мерлак В. Ю., Скороделов В. В. Метод зменшення часу доступу до слабкоструктурованих даних. *Сучасні інформаційні системи* : щоквартальний науково-технічний журнал. 2020. Т. 4, № 1. С. 97-102.

31. Кучук Н. Г. Синтез мережевої моделі комп'ютерної системи на гіперконвергентній платформі. *Системи управління, навігації та зв'язку*.

Полтава : ПНТУ, 2020. Вип. 1(59). С. 86-93.

32. Лаврут О. О. Дослідження якості управління потоками інформації у телекомунікаційній системі критичного призначення. *Системи озброєння і військова техніка* :науковий журнал. 2014. № 4(40). С. 89-93.

33. Лебеденко Т., Холодкова А. Дослідження методу активного управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів телекомунікаційних мереж. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава: ПНТУ, 2019. Т. 4 (56). С. 57-62. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2019.4.057>.

34. Лемешко О. В. Добришкін Ю. Н., Дробот О. А. Дослідження моделі управління трафіком з урахуванням поставлених пріоритетів для багатопродуктового випадку. *Проблеми телекомунікацій*. 2010. № 2 (2). С. 33-41. URL: http://pt.journal.kh.ua/2010/2/2/102_lemeshko_results.pdf.

35. Лосєв Ю. І., Руккас К. М. Порівняльний аналіз математичного апарату моделювання телекомунікаційних мереж. *Системи обробки інформації*. Харків : ХУПС, 2007. Вип. 8(66). С. 55-60.

36. Макогон О. А., Мусаєв Р. Г., Дичко О. О. Дослідження процесу обміну інформацією в локальних мережах установ за допомогою використання математичного апарату теорії масового обслуговування. *Сучасні інформаційні системи*. 2019. Т. 3, №. 1. С. 63-70. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.1.14>

37. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем / За заг. ред. В. В. Попівського. Харків : ТОВ «Компанія СМІТ». 2006. 564 с.

38. Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П. Д., Пасічник В. В. Комп'ютерні мережі : навч. посіб. Львів : «Магнолія 2006», 2013. 256 с.

39. Морозова О. І. Аналіз використання інформаційних технологій в системах з дуальними процесами. *Сучасні інформаційні системи*. 2019. Т. 3, №. 2. С. 60-63. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.2.10>.

40. Олифер В. Г., Олифер Н. А. Компьютерные сети: принципы, технологии, протоколы. 5-е изд. СПб. : Питер, 2016. 992 с.

41. Павленко М., Шило С., Дмитрієв О. Напрями розробки інтелектуальних моделей та методів обробки інформації для управління процесом інформаційної підтримки прийняття рішень в автоматизованих системах управління повітряним рухом. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2018. – Т. 5 (51). – С. 24-28. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2018.5.024>.

42. Парфьонов Ю. Е. Вибір математичного апарату при розробленні імітаційних моделей інформаційних систем. *Системи обробки інформації*. 2011. Вип. 3 (93). С. 69-72.

43. Польщиков К. А., Одарущенко О. Н. Метод оцінки ефективності управління інформаційними потоками в телекомунікаційній мережі спеціального призначення. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи* : науково-технічний журнал. 2008. № 6(33). С. 269-276.

44. Пылькин А. Н., Благодаров А. В., Скуднев Д. М. Моделирование и синтез оптимальной структуры сети Ethernet. М.: Горячая Линия-Телеком, 2011. 112 с.

45. Риз Дж. Облачные вычисления. СПб. : БХВ-Петербург, 2011. 288 с.

46. Роїк О. М., Шиян А. А, Нікіфорова Л. О. Системний аналіз. Вінниця: ВНТУ, 2015. 83 с.

47. Рубан І. В., Кучук Г. А., Давікоза О. П. Концептуальний підхід до синтезу структури інформаційно-телекомунікаційної мережі. *Системи обробки інформації*. Харків : ХУПС, 2013. Вип. 7(114). С. 106-112.

48. Самборська О. М., Шелестовський Б. Г. Числові методи. Тернопіль: ТДТУ імені Івана Пулюя, 2008. 140с.

49. Семенов С. Г., Кассем Халіфе. Комплекс математичних моделей процесу розробки програмного забезпечення. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. Вінниця: ВНТУ, 2017. Вип. 3(40). С. 61-68.

50. Серєда Х. В. Вимоги до програмно-технологічних платформ для побудови і підтримки освітніх порталів. URL : <https://www.slideserve.com/salvador-spencer/6562706> (дата звернення:: 22.01.2020).

51. Стеклов В. К., Беркман Л. Н. Телекоммуникаційні мережі К.: Техніка, 2001. 392 с.
52. Столлингс В. Беспроводные линии связи и сети. М. : Вильямс, 2003. 640 с.
53. Стрихалюк Б.М. Фрактальний аналіз потоків в мультисервісних мережах. *Радіоелектроніка та телекомунікації. Вісник НУ «Львівська політехніка»*. 2009. № 6. С. 88 – 94.
54. Субач І. Ю. Управління розподілом потоків даних в інформаційно-телекомунікаційних мережах. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*, 2012. № 3(9). С. 127-129.
55. Суліма С. В. Метод відновлення мережі у віртуалізованому середовищі. *Радіоелектроніка та інформатика*. 2017. № 4(79). С. 4–8.
56. Талалаєв В. О., Грицький Р. В., Кучер С. В. Мобільні телекомунікаційні мережі критичного застосування: інформаційно–понятійна модель предметної області. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2006. № 5(17). С. 185-192.
57. Теоретичні основи формування та деградації складних організаційно-технічних систем : монографія / Є. Б. Смірнов. [та ін.]; ХНУРЕ. Харків: ХНУРЕ, 2018. 162 с.
58. Трубочанинова К. А., Ковтун І. В., Рубльов В. О., Соболевська Н. В., Дослідження значення величини середньої затримки пакета даних інформаційних потоків у мережах передачі даних. *Інформаційно–керуючі системи на залізничному транспорті*. 2017. № 5. С. 16-25.
59. Чаузов О.М. Моделі розподілу інформаційного ресурсу в АСУ спеціального призначення. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава : ПНТУ, 2015. Вип. 4(36). С. 100-102.
60. Abdullah, A., Candrawati, R. and Bhakti, M.A.C. (2009) Multi-Tiered Bio-Inspired Self-Healing Architectural Paradigm for Software Systems. *Jurnal Teknologi Maklumat & Multimedia*, 5, 1-24.
61. Abrams N. Combining Cloud Networks and Course Management. *Journal*

of *Chemical Education*. 2012. Vol. 89(4). P. 482-486.

62. Abry P., Baraniuk R., Flandrin P., Riedi R., Veitch D. The multiscale nature of network traffic: Discovery, analysis, and modelling. *IEEE Signal Processing Magazine*. 2002. No. 19. Pp. 28-46.

63. Agarwal S., Kodialam M., Lakshman T. Traffic engineering in software defined networks. *Proceedings of IEEE INFOCOM 2013* (April 14-19, 2013, Turin). Turin, Italy, 2013. P. 2211–2219. <http://dx.doi.org/10.1109/INFOCOM.2013.6567024>. (дата звернення: 20.01.2020).

64. Al-Ali Hafid A., Rana O., Walker D. An approach for QoS adaptation in service-oriented grids. *Concurrency and Computation: practice and experience journal*. 2004. № 16(5). P. 401-412.

65. Ala'a Z. Al-Howaide, Ahmad S. Doulat, Yaser M. Khamayseh Performance evaluation of different scheduling algorithms in WiMax. *IJCSEA International Journal of Computer Science, Engineering and Applications*. 2011. Vol. 1, No. 5. P. 81 – 94.

66. Alhihi M. Method of Distribution Network Resources after Restoration, the Networks MPLS-TE Use of Various Telecommunications Technologies to Construct Backbone Networks. *International Journal of Communications, Network and System Sciences*. 2017. Vol. 10. Pp. 251-260.

67. AlnaeriFrhat Ali, Shefer O. V. Optimum flow distribution in the network with adaptive data transfer. *Electronics and Control Systems*. 2020. No. 4(66). P. 45-50.

68. AlnaeriFrhat Ali, Oleksandr Shefer, Galina Cherneva, Self-recovering telecommunication network element topological structure optimization by cost criterion. *Mechanics, Transport, Communications*. The republic of bulgaria, Sofia: Todor Kableshkov University of Transport, article № 2071.

69. Alnaeri Frhat Ali. Analytical solution of the problem of optimal distribution of flows. *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління: Тези доповідей шостої міжнародної науково-технічної конференції, 9 – 10 квітня 2016 р. С. 46.*

70. Alnaeri Frhat Ali, Shefer O. Noise-immunity of the system with the non-stability of the frequency with the action of gaussian noises. *Proceeding of the XVI International Scientific and Technical Conference*, 11-12.12.2020, Kyiv: NAU, 2020. P. 80.
71. Al-Shaer E., Hamed H., Boutaba R., Hasan M. Conflict classification and analysis of distributed firewall policies. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2005. Vol. 23(10). Pp. 2069-2084.
72. Al Zaghoul, F., Rababah, O. and Fakhouri, H. (2014) Website Search Engine Optimization: Geographical and Cultural Point of View, Computer Modelling and Simulation (UKSim). 2014 UKSim-AMSS 16th International Conference.
73. Anand, M., Chouhan, K., Ravi, S. and Ahmed, S.M. (2011) Context Switching Semaphore with Data Security Issues using Self-Healing Approach. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2011.020608>
74. Amin Salih M., Yuvaraj D., Sivaram M., Porkodi V. Detection And Removal Of Black Hole Attack In Mobile Ad Hoc Networks Using Grp Protocol. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*. 2018. Vol. 9, No 6. P. 1–6, DOI: <http://dx.doi.org/10.26483/ijarcs.v9i6.6335> (дата звернення: 20.01.2020).
75. Annadurai C. Review of Packet Scheduling Algorithms in Mobile Ad Hoc Networks. *International Journal of Computer Applications*. 2011. Vol. 15, No. 1. P. 7-10.
76. Athanasopoulos, D., Zarras, A.V., Vassiliadis, P. and Issarny, V. (2011) Mining Service Abstractions: NIER Track. 2011 33rd International Conference on Software Engineering, Honolulu, 21-28 May 2011, 944-947.
77. Ayodeji J. Akande, Colin Fidge, Ernest Foo. Limitations of Passively Mapping Logical Network Topologies. *International Journal of Computer Network and Information Security (IJCNIS)*. 2017. Vol. 9, No. 2. P. 1-11. DOI: <http://dx.doi.org/10.5815/ijcnis.2017.02.01>.
78. Baki A. Continuous monitoring of smart grid devices through multi-

protocol label switching. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2014. Vol. 5(3). P. 1210-1215. <http://dx.doi.org/10.1109/TSG.2014.2301723>.

79. Bogdan P. Mathematical modeling and control of multifractal workloads for data-center-on-a-chip optimization. *Proceedings of the 9th International Symposium on Networks-on-Chip* (September 28-30, 2015, Vancouver). Vancouver, Canada, 2015. Pp. 173-180.

80. Chan C., Armony M., Bambos N. Maximum weight matching with hysteresis in overloaded queues with setups. *Queueing Systems: Theory and Applications*. 2016. Vol. 82. Pp. 315-351.

81. Dannewitz C., Kutscher D., Ohlman B., Farrell S., Ahlgren B., Karl H. Network of Information (NetInf)—An information-centric networking architecture. *Computer Communications*. 2013. Vol. 36, №. 7. P. 721-735.

82. Dustdar, P.S. (2011) A Survey on Self-Healing Systems: Approaches and Systems. 91, 43-73.

83. Ehlers, J., van Hoorn, A., Waller, J. and Hasselbring, W. (2011) Self-Adaptive Software System Monitoring for Performance Anomaly Localization. ICAC'11, Karls-ruhe, 14-18 June 2011.

84. El-Hassany A., Tsankov P., Vanbever L., Vechev M. Network-wide configuration synthesis. Ithaca : Cornell University, 2016. 24 p. URL : <http://arxiv.org/abs/1611.02537> (дата звернення: 17.11.2020).

85. El-Sherif A., Mohamed A. Joint routing and resource allocation for delay minimization in cognitive radio based mesh networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2014. Vol. 13(1). Pp. 186-197.

86. Fiems D., Dorsman J., Rogiest W. Analysing queueing behaviour in void-avoiding fibre-loop optical buffers. *Performance Evaluation*. 2016. Vol. 103. Pp. 23-40.

87. Frei, R. (2010) Self-Organisation in Evolvable Assembly Systems. PhD Thesis. Department of Electrical Engineering, Faculty of Science and Technology, Universidade Nova de Lisboa, Portugal.

88. Frei, R., McWilliam, R., Derrick, B., Purvis, A., Tiwari, A. and Serugendo,

G.D.M. (2013) Self-Healing and Self-Repairing Technologies. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 69, 1033-1061. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5070-2>

89. Fuad, M.M., Deb, D. and Baek, J. (2012) Self-Healing by Means of Runtime Execution Profiling. Proceedings of 14th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT 2011), Dhaka, 22-24 December 2011, 202-207.

90. George D., Xia C., Squillante M. Exact-Order Asymptotic Analysis for Closed Queueing Networks. *Journal of Applied Probability*. 2012. Vol. 49(2). Pp. 503-520. <http://dx.doi.org/10.1239/jap/1339878801>.

91. Gomez-Corral A., Garcia M. Maximum queue lengths during a fixed time interval in the M/M/c retrial queue. *Applied Mathematics and Computation*. 2014. Vol. 235. Pp. 124-136.

92. Gorla, A., Pezzè, M. and Wuttke, J. (2010) Achieving Cost-Effective Software Reliability through Self-Healing. *Computing and Informatics*, 2, 1001-1022.

93. Hang L., Yuan L., Zhen L. Research on network traffic combination prediction method based on wavelet multi-scale analysis. *Microelectronics & Computer*. 2008. Vol. 25(1). Pp. 130-133.

94. Honnappa H., Jain R., Ward A. A queueing model with independent arrivals, and its fluid and diffusion limits. *Queueing Systems*. 2015. Vol. 80(1-2). Pp. 71-103.

95. Hudaib, A.A. and Fakhouri, H.N. (2016) An Automated Approach for Software Fault Detection and Recovery. *Communications and Network*, 8.

96. Janssen, T., Arjan, R.A., van Gemund, J.C. and Zoltar, A. (2009) Spectrum-Based Fault Localization Tool. SINTER'09, Amsterdam, 25 August 2009.

97. Jiao Z., Zhang B., Gong W., Mouftah H. A virtual queue-based back-pressure scheduling algorithm for wireless sensor networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. 2015. Vol. 2015(35). Pp. 1-9.

98. Katti, A., Di Fatta, G., Naughton, T. and Engelmann, C. (2015) Scalable and Fault Tolerant Failure Detection and Consensus. EuroMPI'15, Bordeaux, 21-23

September 2015.

99. Kesidis G. An introduction to communication network analysis. New Jersey : A John Wiley & Sons Inc. Publication, 2007. 231 p.

100. Khurshid A., Zou X., Zhou W., Caesar M., Godfrey P. VeriFlow: Verifying Network-wide Invariants in Real Time. *Proceedings of the 10th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation* (April 2-5, 2013, Lombard). Lombard, IL, USA, 2013. Pp. 15-27.

101. Koldehofe, B., Mayer, R., Umakishore, Rothermel, K. and Völz, M. (2013) Rollback-Recovery without Checkpoints in Distributed Event Processing Systems. DEBS'13, Arlington, 29 June-3 July 2013.

102. Kosenko V. Mathematical model of optimal distribution of applied problems of safety-critical systems over the nodes of the information and telecommunication network. *Сучасні інформаційні системи*. 2017. Т. 1, № 2. С. 4-9. doi:<https://doi.org/10.20998/2522-9052.2017.2.01>.

103. Kuchuk N., Donets V., Shmatkov S. Development of software of e-learning information system synthesis modeling process. *Сучасні інформаційні системи* : науково-технічний журнал. 2018. Т. 2, № 2. С. 117-121.

104. Kuchuk N., Hani A., Mohammad R., Shmatkov S. E-Health Communication System with Multiservice Data Traffic Evaluation Based on a G/G/1 Analysis Method. *Current Signal Transduction Therapy*. 2020. Vol. 14, No. 1. P. 1-7.

105. Kuchuk N., Nechausov A., Mamusuc I. Synthesis of the air pollution lever control system on the basis of hyperconvergent ifrustructures. *Сучасні інформаційні системи* : науково-технічний журнал. 2017. Т. 1, № 2. С. 21-26.

106. Li, D., Tran, A.H. and Halfond, W.G.J. (2014) Making Web Applications More Energy Efficient for OLED Smartphones. ICSE'14, 31 May-7 June 2014, Hyderabad.

107. Liang L., Gao D., Leung V. Queue-based congestion detection and multistage rate control in event-driven wireless sensor networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2014. Vol. 14(8). Pp. 818-830.

108. Liu Y., Whitt W. A network of time-varying many-server fluid queues with customer abandonment. *Operations Research*. 2011. Vol. 59(4). Pp.835-846.
109. Panwar Li Y., Liu C.J. S. On the Performance of MPLS TE Queues for QoS Routing. *Simulation series*. 2004. Vol. 36; part 3. P. 170-174.
110. Park, J., Youn, H. and Lee, E. (2009) An Automatic Code Generation for Self-Healing. *Journal of Information Science and Engineering*, 25, 1753-1781.
111. Pasier, H. and Dustdar, S. (2011) A Survey on Self-Healing Systems: Approaches and Systems. *Computing*, 91, 43-73.
112. Perez, C.-R., Stelios, S., Laadan, O., Viennot, N., Keromytis, A. and Nieh, J. (2009) Automatic Self-Healing and Present and Future. 23 June 2009.
113. Peterson L., Davie B. *Computer Networks: A Systems Approach*. 4th edition. San Francisco : Morgan Kaufmann, 2007. 805 p.
114. Ruban I., Kuchuk H., Kovalenko A. Redistribution of base stations load in mobile communication networks. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. 2017. No 1 (1). P. 75-81.
115. Sánchez, J., Ben Yahia, I.G. and Crespi, N. (2014) POSTER: Self-Healing Mechanisms for Software-Defined Networks, arXiv:1507.02952.
116. Schramm C., Bieszczad A., Pagurek B. Application-oriented network modeling with mobile agents *Network Operations and Management Symposium, NOMS 98.*, IEEE. IEEE, 1998. Vol. 2. P. 696-700.
117. Schneider, C., Barker, A. and Dobson, S. (2013) A Survey of Self-Healing Systems Frameworks. *Software: Practice and Experience*, 45, 1375-1398. <https://doi.org/10.1002/spe.2250>
118. Sivakumar R., Kumar E., Sivaradje G. Prediction of Traffic Load in Wireless Network Using Time Series Model. *Proceedings of 2011 International Conference on Process Automation, Control and Computing* (July 20-22, 2011, Coimbatore). Coimbatore, India, 2011. Pp. 284-296.
119. Stoev S., Michailidis G., Vaughan J. On Global Modeling of Backbone Network Traffic. *Proceedings of IEEE INFOCOM 2010* (March 15-19, 2010, San Diego). San Diego, California, USA, 2010. Pp. 196-200.

120. Tanenbaum A. *Computer Networks*. Prentice Hall, 2010. 960 p.
121. Toueg S., Steiglitz K. The desing of small diameter networks by local search. *IEEE Trans. Comput.* 1979. No. 28. P. 537–542.
122. Vieira F., Lee L. An admission control approach for multifractal network traffic flows using effective envelopes. *International Journal of Electronics and Communications*. 2010. No. 64. Pp. 629-639.
123. Weyns, D., Haesevoets, R., Van Eylen, B., Helleboogh, A., Holvoet, T. and Joosen, W. (2008) Endogenous versus Exogenous Self-Management. SEAMS'08, Leipzig, 12-13 May 2008.
124. Whitt W. The Queuing Network Analyzer. *Bell Labs Technical Journal*. 1983. Vol. 62(9). Pp. 2779-2815.
125. Wu Y., Williamson C. Impacts of data call characteristics on multiservice CDMA system capacity. *Performance Evaluation*. 2015. Vol. 62(1-4). Pp. 83–99. <http://dx.doi.org/10.1016/j.peva.2005.07.011>.
126. Xi N., Sun C., Ma J., Shen Y. Secure service composition with information flow control in service clouds. *Future Generation Computer Systems*. 2015. Vol. 49. Pp. 142-148. <http://dx.doi.org/10.1016/j.future.2014.12.009>.
127. Yong S., Guangwei B., Lu Z. Network traffic prediction based on Gamma wavelet model. *Computer Engineering*. 2011. Vol. 37(9). Pp. 187-189.
128. Yu Z., Xu H., Yang Z., Guo B. Personalized travel package with multi-point-of-interest recommendation based on crowdsourced user foot-prints. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*. 2016. Vol. 46(1). Pp. 151-158.
129. Zhou, J. and Wunderlich, H.-J. (2006) Software-Based Self-Test of Processors under Power Constraints. Proceedings of Design, Automation and Test in Europe, Vol. 1, Munich, 6-10 March 2006, 1-6.

**Акти впровадження результатів
наукових досліджень дисертаційної роботи**

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Директор Державного підприємства
«Південний державний проектно-
конструкторський та науково-
дослідний інститут авіаційної
промисловості»

к.т.н.

Р.В. АРТЮХ

«26» СІЧНЯ 2021 р.

Акт впровадження

**результатів наукових досліджень АЛНАЕРІ ФРХАТ АЛІ,
отриманих під час виконання дисертаційної роботи**

Комісія Державного підприємства "Південний державний проектно-конструкторський та науково-дослідний інститут авіаційної промисловості" у складі: голова комісії: Чмихун Костянтин Євгенійович - головний інженер; члени комісії: Чорний Віктор Олексійович - заступник директора з виробництва; Топольницька Олена Олександрівна - головний архітектор проекту, констатує, що в ході виконання науково-дослідної роботи за темою «Проектування аеродромів, вертодромів, аеропортів і об'єктів їх інфраструктури» використано результати дисертаційних досліджень отриманих Алнаері Фрхат Алі, а саме:

- комплекс методів реконфігурації сегмента телекомунікаційної мережі, який відрізняється від відомих сумісним використанням властивостей локальної самовідновлюваності та горизонтальної масштабованості, що дозволяє виконати вимоги щодо зменшення середнього часу затримки повідомлень;

- метод перерозподілу ресурсів автономного самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі при пульсуючому характері трафіка, що дозволяє уникнути втрат пакетів при перевантаженні каналів зв'язку.

У результаті впровадження наукових положень та результатів дисертаційної роботи Алнаері Фрхат Алі отримано науково-технічний ефект, пов'язаний з підвищенням ефективності базової телекомунікаційної системи з елементами самовідновлення, а саме, зменшено середній час затримки повідомлень у порівнянні з існуючими методами у середньому до 8%. Зокрема, запропоновані у роботі Алнаері Фрхат Алі моделі та методи реконфігурації самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі реалізовані при формуванні програмної платформи комп'ютерної системи управління об'єктами інфраструктури.

Голова комісії:

Чмихун К.Є.

Члени комісії:

Чорний В.О.

Топольницька О.О.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Державного підприємства
"Український державний інститут по
проектуванню заводів важкого
машинобудування"

Оксана СИТНИК

"18" березня 2021 р.



АКТ

реалізації результатів дисертаційних досліджень
Алнаері Фрхат Алі

Комісія у складі:

голови комісії – Ситник О.Б. директор ДП «УКРДІПРОВАЖМАШ»
та членів комісії:

Лодяний В.Д. – заступник директора

Шаповалов Г.М. – заступник директора з фінансово-економічних питань,

склала цей акт про те, що результати наукових досліджень, присвячені моделям та методам реконфігурації самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі, отримані Алнаері Фрхат Алі особисто, а саме:

- комплекс моделей топологічної структури самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі, який враховує особливості самовідновлювальних мережних компонент і базується на використанні модифікованого метода Туега-Стейгліца, що дозволяє виконати вимоги щодо якості послуг, які надає телекомунікаційна мережа, та реалізувати процес нарощування структури при нестачі обчислювальних ресурсів;

- метод перерозподілу ресурсів автономного самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі при пульсуючому характері трафіка, що дозволяє уникнути втрат пакетів при перевантаженні каналів зв'язку.

Результати дисертаційних досліджень Алнаері Фрхат Алі було реалізовано при модифікації базової телекомунікаційної системи підтримки проектування заводів важкого машинобудування, а саме, при формуванні вимог до розширення HARDWARE з можливістю проведення автоматичного самовідновлення, що дозволяє після проведення модифікації уникнути втрат пакетів при перевантаженні каналів зв'язку та зменшити ймовірність спотворення повідомлень до 5%.

Голова комісії:

Директор

О.Б.Ситник

Члени комісії:

Заступник директора

В.Д. Лодяний

Заступник директора з фінансово
– економічних питань

Г.М.Шаповалов

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової та міжнародної
роботи

Національного університету

«Полтавська політехніка

імені Юрія Кондратюка»,

кандидат економічних наук, доцент



Світлана СІВЦЬКА

17 02 2021 року

АКТ

**реалізації матеріалів дисертаційної роботи Алнаері Фрхат Алі на тему:
«Моделі та методи реконфігурації самовідновлювального сегмента
телекомунікаційної мережі» на здобуття наукового ступеня кандидата
технічних наук**

Цей акт складено комісією: голова комісії – завідувач кафедри автоматики, електроніки та телекомунікацій, доктор технічних наук, доцент Шефер О.В.

Члени комісії – заступник завідувача кафедри автоматики, електроніки та телекомунікацій, кандидат технічних наук, доцент Галай В.М.; професор кафедри автоматики, електроніки та телекомунікацій, доктор технічних наук, професор Леві Л.І. в тому, що результати дисертаційної роботи, а саме:

– комплекс моделей топологічної структури самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі, який враховує особливості самовідновлювальних мережних компонент і базується на використанні модифікованого метода Туега-Стейгліца, що дозволяє виконати вимоги QoS щодо надійності та реалізувати процес нарощування структури при нестачі обчислювальних ресурсів;

– удосконалений комплекс методів реконфігурації сегмента телекомунікаційної мережі, який відрізняється від відомих сумісним використанням властивостей локальної самовідновлюваності та горизонтальної масштабованості, що дозволяє виконати вимоги QoS щодо середнього часу затримки повідомлень;

– метод перерозподілу ресурсів автономного самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі при пульсуючому характері трафіка за рахунок використання спектральних властивостей процесу передачі даних, що дозволяє уникнути втрат пакетів при перевантаженні каналів зв'язку

реалізовані в навчальному процесі Навчально-наукового інституту інформаційних технологій і механотроніки Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», при викладанні дисциплін «Телекомунікаційні та інформаційні мережі», «Системи передачі даних», «Автоматизовані системи управління телекомунікацій», а також під час виконання магістерських і бакалаврських кваліфікаційних робіт та курсового проектування.

Голова комісії
Зав. кафедри автоматики,
електроніки та телекомунікацій,
д. т. н., доцент



Олександр ШЕФЕР

Члени комісії:

д. т. н., професор



Леонід ЛЄВІ

к. т. н., доцент



Василь ГАЛАЙ

**Список публікацій здобувача
та відомості про апробацію результатів дисертації**

1. Frhat Ali Alnaeri, Shefer O. V. Optimum flow distribution in the network with adaptive data transfer. *Electronics and Control Systems*. 2020. No. 4(66). P. 45-50.
2. Алнаері Фрхат Алі, Срібна І. М., Кучук Г. А., Лебедєв О. Г. Синтез топологічної структури самовідновлюваного та масштабованого сегмента мережі передачі даних. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2020. № 4 (69). С. 95-106.
3. Алнаері Фрхат Алі, Кучук Н. Г., Шефер О. В., Чернева Г. П. Визначення пропускних здатностей самовідновлювального сегмента мережі. *Сучасні інформаційні системи*. 2021. Т. 5, № 2. С. 114-119.
4. Алнаері Фрхат Алі, Коломійцев О. В., Петровська І. Ю. Метод розрахунку розміру буферної пам'яті самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава: НУ «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2021. Випуск 2(64). С. 144-147.
5. AlnaeriFrhat Ali, Oleksandr Shefer, Galina Cherneva, Self-recovering telecommunication network element topological structure optimization by cost criterion. *Mechanics, Transport, Communications*. The republic of bulgaria, Sofia: Todor Kableshkov University of Transport, article № 2071.
6. Alnaeri Frhat Ali. Analytical solution of the problem of optimal distribution of flows. *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління: Тези доповідей шостої міжнародної науково-технічної конференції, 9 – 10 квітня 2016 р.* С. 46.
7. Алнаері Фрхат Алі, Шефер О. В. Метод побудови регулярної структури з заданою зв'язністю. *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління: Тези доповідей сьомої міжнародної науково-технічної конференції, 14 – 15 квітня 2017 р.* С. 51.
8. Алнаері Фрхат Алі, Шефер О. В., Головка Г. В., Лучко М. О., Чайка Є. А. Особливості початкової інформації для роботи з комп'ютерними мережами. *Електронні та мехатронні системи: теорія інновації, практика: Зб. наук. праць за матеріалами VI Всеукраїнської науково-практ. конф., 6 листопада 2020 р., Полтава: НУПП, 2020. С. 221-223.*
9. Alnaeri Frhat Ali, Shefer O. Noise-immunity of the system with the non-stability of the frequency with the action of gausis noises. *Proceeding of the XVI International Scientific and Technical Conference, 11-12.12.2020, Kyiv: NAU, 2020. P. 80.*

**Послідовність дій при реалізації методів підвищення ефективності
використання обчислювальних ресурсів**

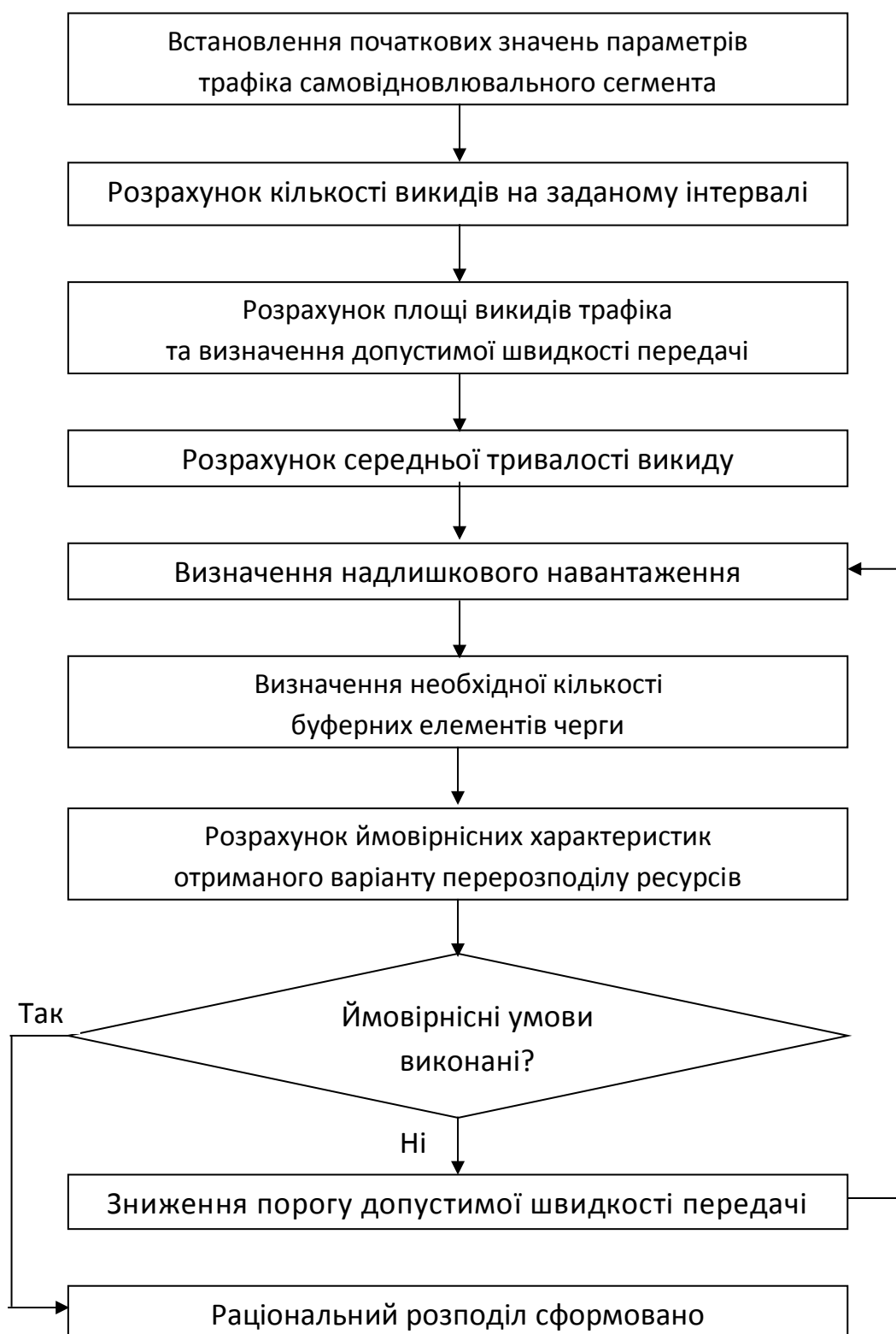


Рис. В.1. Послідовність дій при перерозподілі ресурсів для пульсуючого трафіка

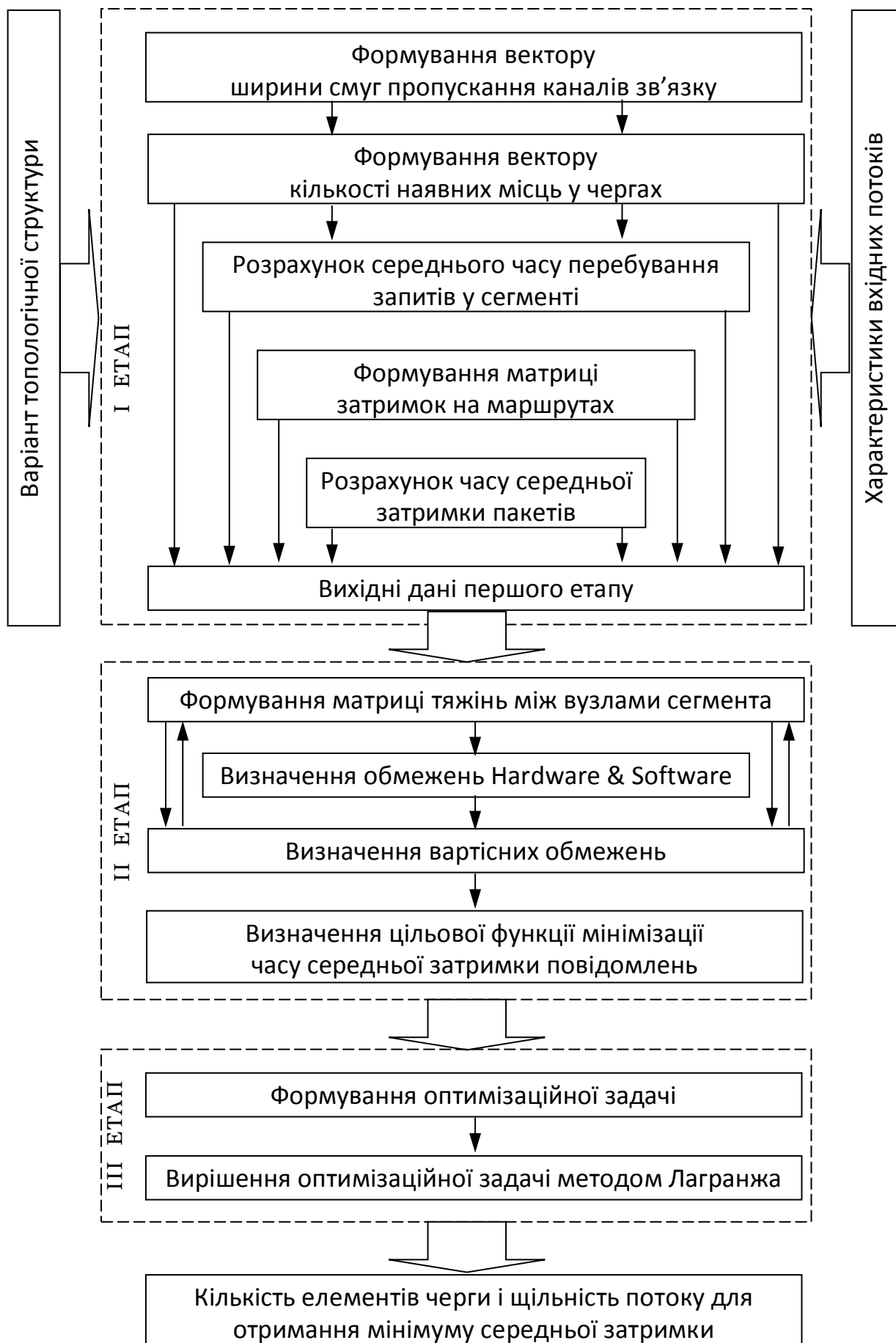


Рис. В.2. Послідовність дій для розрахунку мінімальної середньої затримки



Рис. В.3. Послідовність дій при визначенні ширини смуги пропускання

**РОЗРАХУНОК ЗАВАНТАЖЕННЯ ЗАСОБІВ ЗВ'ЯЗКУ
САМОВІДНОВЛЮВАЛЬНОГО СЕГМЕНТА**

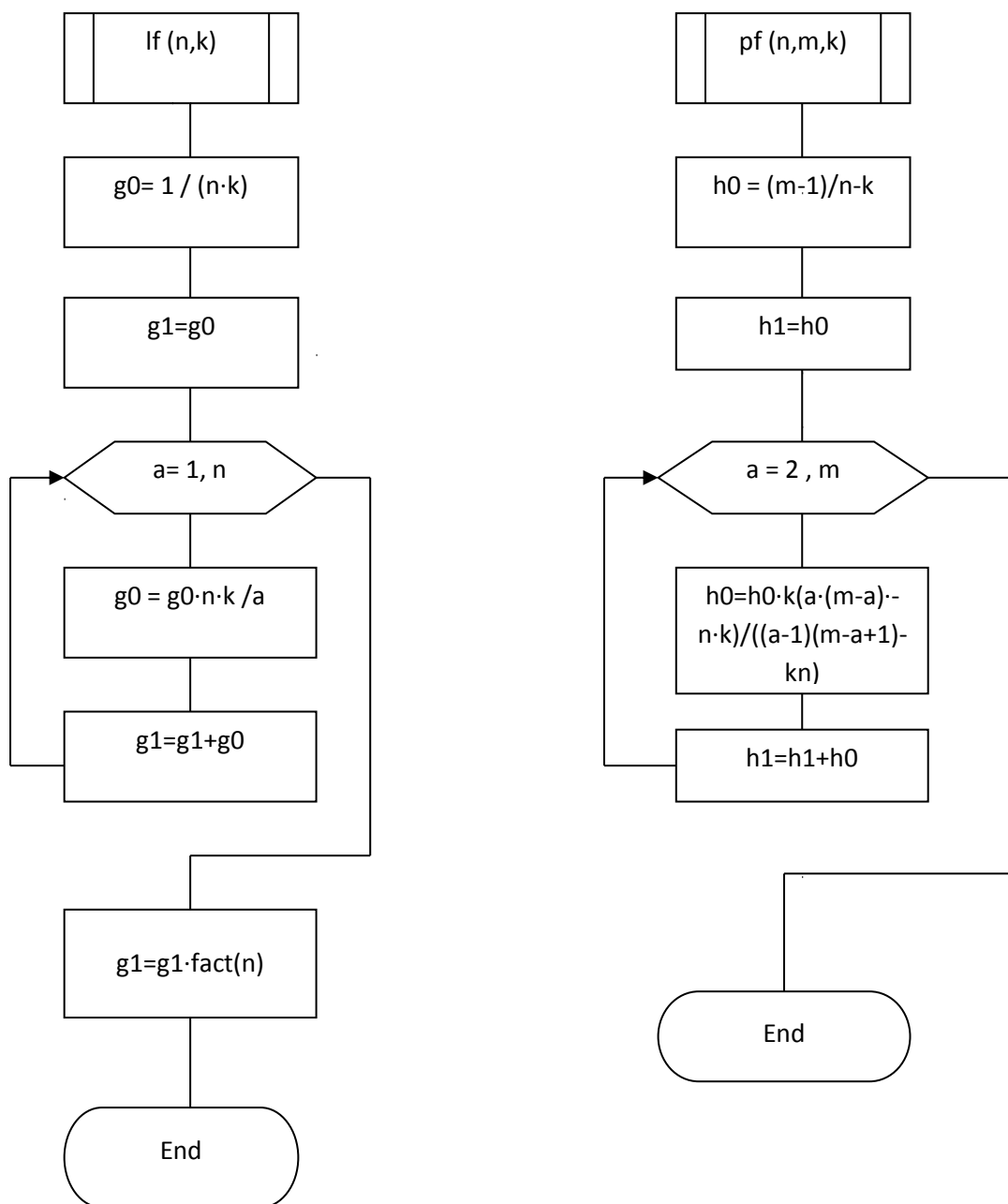


Рис. Г.1. Алгоритми розрахунку $g(\chi)$ и $h(\chi)$

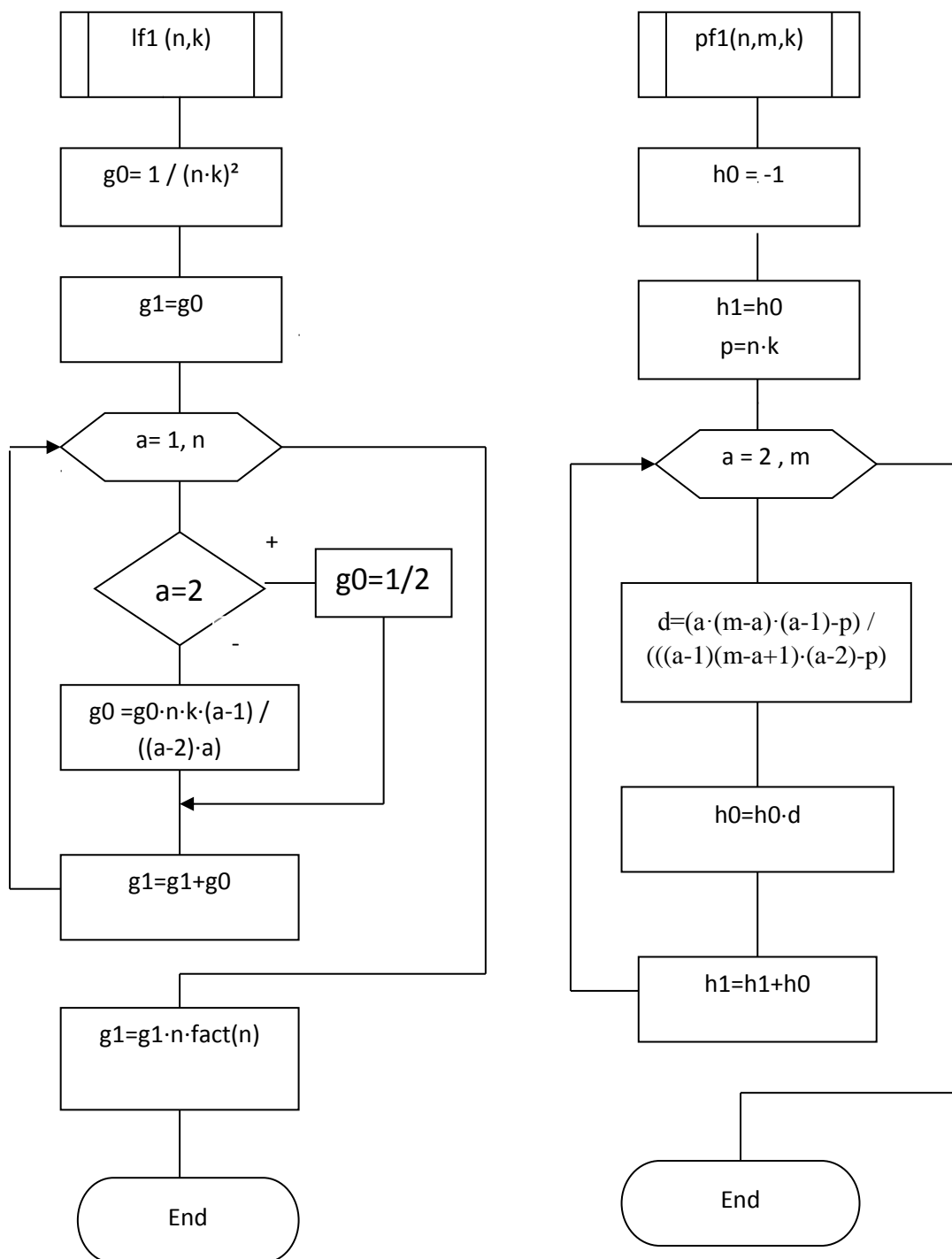
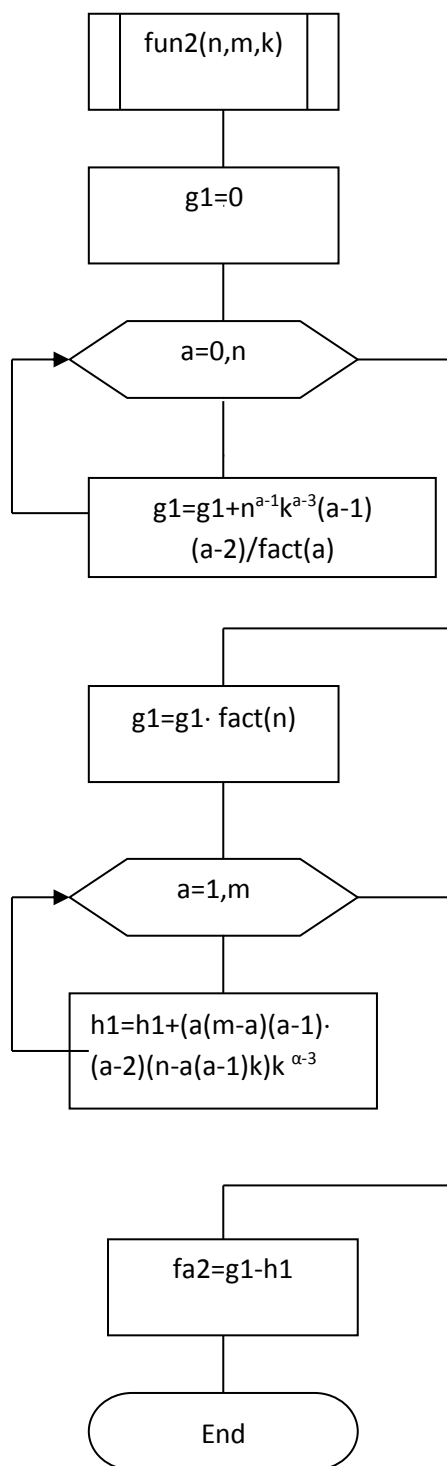


Рис. Г.2. Алгоритми розрахунку $g(\chi)$ і $h(\chi)$

Рис. Г.3. Алгоритм розрахунку $f'(\chi)$

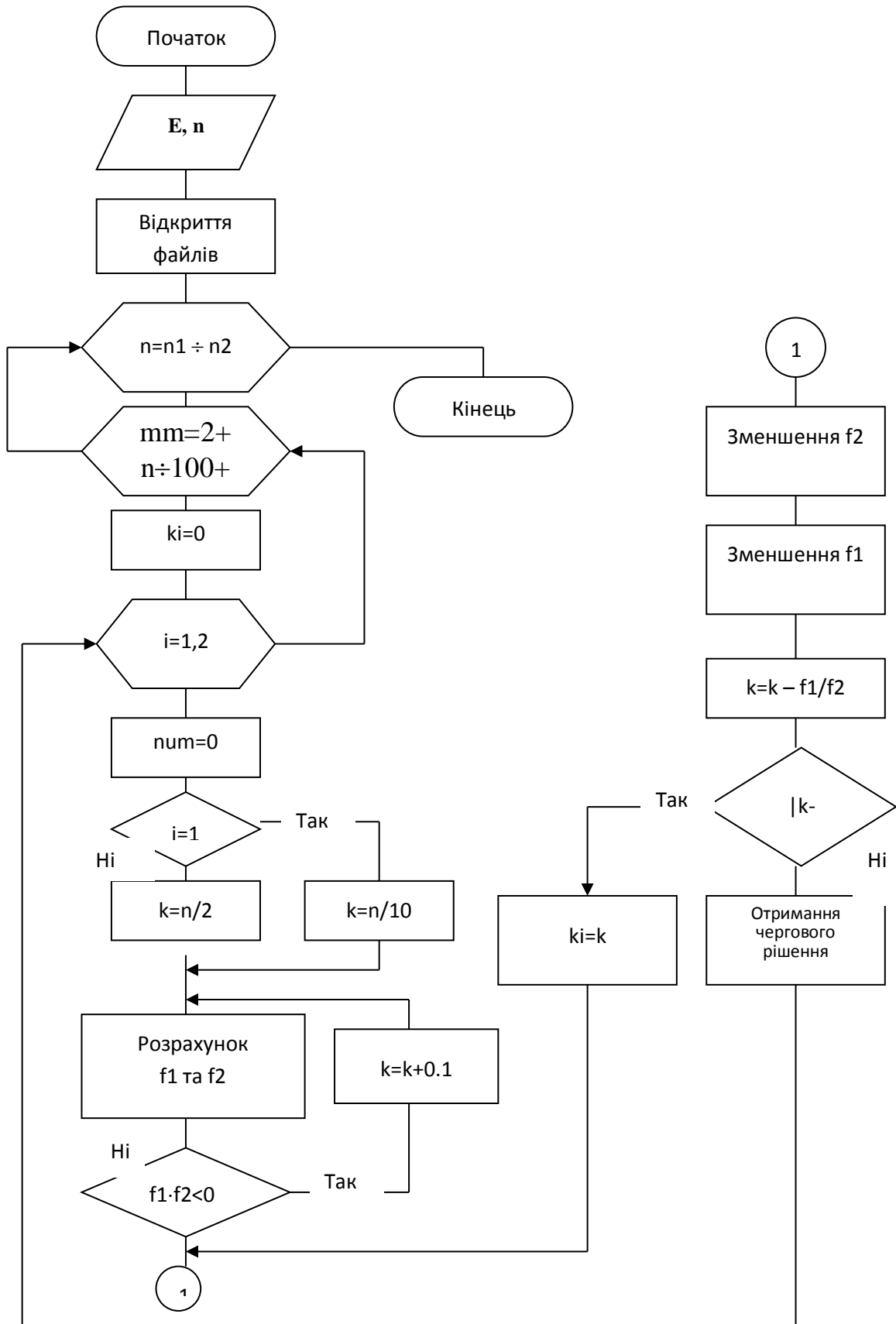


Рис. Г.4. Алгоритм знаходження наближеного значення

Прийнятні оптимальні значення ступеня завантаження

каналу $\chi_i^{\text{опт}}$ для $n = 1, 2, 3, 4$

m	$n = 1$		$n = 2$		$n = 3$		$n = 4$	
	χ_1	χ_2	χ_1	χ_2	χ_1	χ_2	χ_1	χ_2
1...3	-	-	-	-	-	-	-	-
4	0.320	1.6428	-	-	-	-	-	-
5	0.226	2.1357	0.611	1.417	-	-	-	-
6	0.180	2.4853	0.486	1.774	-	-	-	-
7	0.150	2.7636	0.424	2.019	-	-	-	-
8	0.130	3.0004	0.385	2.213	-	-	-	-
9	0.114	3.2102	0.356	2.378	1.500	2.500	-	-
10	0.102	3.4012	0.333	2.523	0.510	2.004	-	-
11	0.093	3.578	0.315	2.655	0.482	2.132	0.538	2.053
12	0.085	3.7436	0.300	2.778	0.460	2.246	0.521	2.181
13	0.078	3.9001	0.286	2.892	0.441	2.350	0.506	2.262
14	0.072	4.0488	0.275	3.000	0.426	2.447	0.494	2.337
15	0.067	4.191	0.265	3.103	0.413	2.537	0.483	2.409
16	0.063	4.3274	0.256	3.201	0.401	2.623	0.473	2.478
17	0.059	4.4588	0.247	3.295	0.390	2.704	0.464	2.544
18	0.056	4.5856	0.240	3.386	0.381	2.782	0.456	2.607
19	0.053	4.7084	0.233	3.474	0.372	2.857	0.448	2.668
20	0.050	4.8275	0.227	3.559	0.365	2.930	0.441	2.727

21	0.048	4.9433	0.221	3.642	0.357	3.000	0.435	2.785
22	0.046	5.056	0.216	3.722	0.351	3.068	0.429	2.841
23	0.044	5.1658	0.211	3.800	0.345	3.134	0.423	2.895
24	0.042	5.273	0.206	3.877	0.339	3.198	0.418	2.948
25	0.040	5.3778	0.202	3.951	0.333	3.261	0.413	3.000
26	0.039	5.4803	0.198	4.024	0.328	3.322	0.408	3.051
27	0.037	5.5807	0.194	4.095	0.323	3.382	0.403	3.100
28	0.036	5.6791	0.191	4.165	0.319	3.440	0.399	3.149
29	0.035	5.7755	0.187	4.234	0.315	3.497	0.395	3.197
30	0.033	5.8702	0.184	4.301	0.311	3.553	0.391	3.244
31	0.032	1.6428	0.181	1.417	0.307	3.608	0.387	3.290
32	0.031	2.1357	0.178	1.774	0.303	3.662	0.384	3.335
33	0.030	2.4853	0.175	2.019	0.299	3.715	0.381	3.379
34	0.029	2.7636	0.173	2.213	0.296	3.767	0.377	3.423
35	0.029	3.0004	0.170	2.378	0.293	3.819	0.374	3.466
36	0.028	3.2102	0.168	2.523	0.290	3.869	0.371	3.508
37	0.027	3.4012	0.165	2.655	0.287	3.919	0.368	3.550
38	0.026	3.578	0.163	2.778	0.284	3.968	0.365	3.591
39	0.026	3.7436	0.161	2.892	0.281	4.016	0.363	3.632
40	0.025	3.9001	0.159	3.000	0.279	4.064	0.360	2.181