

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

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

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. [Аветісян А.І.](#) Планування команд і конвейеризація циклів на сучасних архітектурах. *Праці інституту системного програмування*. 2012. С. 19-32.
2. Агєєв 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., Лебедев 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. [Вишневский 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. Дмітрієнко 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., Скорodelов 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_rezults.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. Середа 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. *Радіoeлектроніка 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. *Радіoeлектроніка 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. *Радіoeлектронні 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. Трубчанинова 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, Karlsruhe, 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.

