МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БЕРЕЗОВСЬКА ЮЛІЯ ВОЛОДИМИРІВНА

Гриф

Прим. № ____

УДК 621.396.4

ДИСЕРТАЦІЯ

МЕТОДИКА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНИХ МЕРЕЖ

Спеціальність 172 – телекомунікації та радіотехніка

Галузь знань 17 – електроніка та телекомунікації

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

Науковий керівник Вишнівський Віктор Вікторович, доктор технічних наук, професор

Київ – 2021

АНОТАЦІЯ

Березовська Ю.В. Методика забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем на основі програмно-конфігурованих мереж. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 – Телекомунікації та радіотехніка. – Державний університет телекомунікацій, Київ, 2021.

Сьогодні однією з найбільш важливих складових сучасного суспільства є інформаційні системи, що стрімко розвиваються. Відтак, бурхливими темпами відбувається і розвиток інформаційних мереж як в Україні, так і у інших країнах світу. Функціонування великих інформаційних систем (ІС) знаходиться в постійній взаємодії із зовнішніми впливами. При цьому, великий клас такої взаємодії представлений різними конфліктами, які суттєво впливають на успішне виконання загальносистемної мети. Такі інформаційні конфлікти стають причиною руйнування інформаційних ресурсів, порушення штатних інформаційних процесів, і як наслідок зриву виконання системних та прикладних функцій. Все це обумовлює наявність в інформаційних системах механізмів, які мають забезпечувати нову якість – здатність збереження і/або відновлення даних функцій (їхню стійкість) в умовах різного роду несприятливих впливів, а саме функціональної стійкості. Функціональна стійкість інформаційних систем являє собою інтегральну властивість, що включає надійність, живучість і безпеку. Відповідно, оцінка показників функціональної стійкості є складним науково-практичним завданням.

Однак, сучасні ІС потребують впровадження засобів управління з використанням протоколів, які не залежать від послуг і, у свою чергу, надаються різними операторами та/або провайдерами всією мережею, незалежно від типів технічних систем, що у ній використовуються.

Створення систем, апріорно орієнтованих для роботи в умовах неповної або нечіткої вихідної інформації, невизначеності зовнішніх впливів та робочого

середовища, вимагає використання інноваційних підходів з використанням нових методів і технологій. Очевидно, що за наявності різних видів невизначеності високий рівень автономності, адаптивності та надійності ІС повинен забезпечуватися шляхом збільшення їхніх можливостей, заснованих на обробці спеціальної інформації. Одним з головних критеріїв вибору повинна бути необхідна якість функціонування системи управління в умовах невизначеності із випадковим характером зовнішніх коливань, які включають непередбачені зміни у власних експлуатаційних показниках, параметрах середовища, цілях тощо.

Ефективність функціонування ІС значною мірою визначається часовими затримками при передачі даних між користувачами мережі. Мінімізація затримки в ІС з однорідним трафіком забезпечується на етапі проектування з використанням математичних моделей масового обслуговування з однорідним потоком заявок.

У даний час набувають поширення мультисервісні мережі, характерною рисою яких є неоднорідність трафіку. Неоднорідність трафіку полягає у передачі інформаційною мережею пакетів декількох типів, на які поширюються різні вимоги. Ці вимоги будуть сформульовані у вигляді обмежень щодо терміну доставки пакетів різного типу. Зазначений ліміт може бути врахований завдяки застосуванню спеціальних методів управління трафіком. Розв’язання цієї задачі вимагає використання моделей з неоднорідним потоком заявок, що дозволяють аналізувати властивості пріоритетних систем передачі даних.

Тому, для забезпечення функціональної стійкості ІС пропонується використовувати програмно-конфігуровані мережі (SDN). Головна ідея SDN полягає у відокремленні функцій передачі трафіку від функцій управління (включаючи контроль як самого трафіку, так і пристроїв, що здійснюють його передачу). При цьому суттєво підвищується рівень безпеки функціонування інформаційних систем.

Використання програмно-конфігурованих мереж дозволяє ввести в процес передачі пакетів поняття резерву часу. Істотний вплив на ефективність використання в інформаційних системах резервування, як одного з основних засобів забезпечення заданого рівня надійності, надає повнота апріорної інформації

про надійність її елементів та програмного забезпечення.

В Україні та інших країнах світу на даний час досить інтенсивно проводяться дослідження в галузі інформаційних мереж. Дослідження щодо забезпечення функціональної стійкості вивчаються рядом вчених, таких як О.А. Машков, В.І. Гостєв, О.В. Барабаш та інших. До речі, вперше поняття функціональної стійкості було введено професором Машковим О.А.

Врахування резерву часу для системи передачі даних дає можливість об'єктивно оцінити показники функціональної стійкості каналу передачі інформації мережі.

Питання, що стосуються удосконалення надійності систем детально розглянуті у роботах таких вчених: Б.П. Креденцер, М.К. Жердєв, Л.С. Стойкова, В.М. Цицарєв, В.В. Вишнівський та інші.

Дані результати можна використовувати на стадії проектування інформаційних систем при прогнозуванні їхньої поведінки. Вони виступають в якості обґрунтування передбачуваних показників якості функціонування для систем, які ще не існують в реальному виконанні.

Тому, на даний час існує необхідність вирішення актуального науково-практичного завдання, сутність якого полягає в розробці методики забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем на основі програмно-конфігурованих мереж.

У вступі міститься загальна характеристика роботи, обґрунтування актуальності досліджуваної задачі; виклад мети і питань дослідження, а також наукової новизни і практичної цінності отриманих результатів; відомості про апробацію та обсяг дисертації. Вказується, які основні положення роботи виносяться на захист.

У першому розділі проведено короткий аналіз сучасних інформаційних систем, дається аналіз функціональної стійкості та факторів апріорної невизначеності обумовлених недостовірність вихідних даних, формулюється завдання і основні питання дослідження, викладається загальний підхід до її вирішення.

У другому розділі удосконалено математичну модель системи передачі даних ІС, яка враховує тип пакетів, що передаються і дозволяє визначити максимальний час затримки каналу та оцінити ефективність, що досягається за рахунок використання пріоритетного управління трафіком.

Розроблено математичні моделі функціональної стійкості інформаційних систем з часовим резервуванням при моментних обмеженнях на функції розподілу випадкових величин. Вони дозволяють визначити гарантовані оцінки показників функціональної стійкості системи передачі даних ІС.

У третьому розділі на основі отриманих оцінок проводиться аналітичне дослідження гарантованих оцінок показників функціональної стійкості інформаційних систем з резервом часу при різних режимах роботи. Розроблено методику забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем на основі програмно-конфігурованих мереж. Методика ґрунтується на визначенні гарантованих оцінок показників функціональної стійкості системи передачі даних, враховує резерв часу, режими роботи інформаційних систем та дозволяє визначати верхні та нижні оцінки показників функціональної стійкості.

У четвертому розділі проводиться дослідження ефективності роботи ІС з резервом часу на основі гарантованих оцінок показників функціональної стійкості і розглядаються питання їхньої практичної реалізації.

У висновку роботи наводяться основні наукові і практичні результати роботи із зазначенням висновків і рекомендацій по темі дослідження.

Обраний напрям досліджень відповідає тематиці науково-дослідних робіт Державного університету телекомунікацій, що проводилися протягом 2017-2021 рр. Результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі Державного університету телекомунікацій. Впровадження результатів досліджень підтверджуються відповідними актами.

Ключові слова: функціональна стійкість, інформаційна система, програмно-конфігуруванні мережі, телекомунікаційна мережа, віртуалізація, хмарне середовище, хмарні технології, віртуальна машина, реконфігурація, надійність, резерв часу, структурний резерв.

ANNOTATION

Berezovska Yu. Methods of Providing Functional Stability of Information Systems on the Base of Software-Defined Networking. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 172 – Telecommunications and Radio Engineering. – State University of Telecommunications, Kyiv, 2021.

Today, one of the most important components of modern society is rapidly evolving information systems. Therefore, the development of information networks in Ukraine and in other countries of the world is proceeding at a rapid pace. The operation of large information systems (IS) is in constant interaction with external influences. At the same time, a large class of such interaction is represented by various conflicts that significantly affect the successful implementation of the system-wide goal. Such information conflicts cause the destruction of information resources, disruption of regular information processes, and as a consequence of disruption of system and application functions. All this leads to the presence in information systems of mechanisms that should provide a new quality – the ability to preserve and/or restore these functions (their stability) in the face of various adverse effects, namely functional stability. Functional stability of information systems is an integral property that includes reliability, survivability and security. Accordingly, the assessment of functional stability indicators is a complex scientific and practical task.

However, modern ISs require the implementation of management tools using protocols that do not depend on services and, in turn, are provided by different operators and/or providers throughout the network, regardless of the types of technical systems used in it.

Creating systems that are a priori oriented to work in conditions of incomplete or unclear source information, uncertainty of external influences and the working environment, requires the use of innovative approaches using new methods and technologies. It is obvious that in the presence of different types of uncertainty, a high

level of autonomy, adaptability and reliability of IS should be ensured by increasing their capabilities based on the processing of special information. One of the main selection criteria should be the required quality of operation of the control system in conditions of uncertainty with the random nature of external fluctuations, which include unforeseen changes in their own performance, environmental parameters, goals and more.

The efficiency of the IS is largely determined by time delays in data transfer between network users. Minimization of delay in IS with homogeneous traffic is provided at the design stage using mathematical models of queuing with a uniform flow of applications.

Currently, multiservice networks are becoming widespread, the characteristic feature of which is the heterogeneity of traffic. The heterogeneity of traffic is the transmission by the information network of packets of several types, which are subject to different requirements. These requirements will be formulated in the form of restrictions on the delivery time of packages of different types. This limit can be taken into account through the use of special traffic management methods. Solving this problem requires the use of models with a heterogeneous flow of applications that allow you to analyze the properties of priority data systems.

Therefore, to ensure the functional stability of the IS, it is proposed to use software-defined networks (SDN). The main idea of SDN is to separate the functions of traffic transmission from management functions (including control of both the traffic itself and the devices that transmit it). This significantly increases the level of security of information systems.

The use of software-defined networks allows you to introduce the concept of time reserve in the process of packet transmission. Significant influence on the efficiency of use in information systems of reservation, as one of the main means of ensuring a given level of reliability, has the completeness of a priori information about the reliability of its elements and software.

Research in the field of information networks is currently being carried out quite intensively in Ukraine and other countries of the world. Studies to ensure functional stability are studied by a number of scientists, such as O. Mashkov, V. Gostev, O. Barabash and others. By the way, for the first time the concept of functional stability

was introduced by Professor O. Mashkov.

Taking into account the time reserve for the data transmission system makes it possible to objectively assess the indicators of the functional stability of the network information transmission channel.

Issues related to improving the reliability of systems are considered in detail in the works of the following scientists: B. Kredentser, M. Zherdev, L. Stoykova, V. Tsitsarev, V. Vyshnivsky and others.

These results can be used at the stage of designing information systems in predicting their behavior. They serve as a justification for the expected performance indicators for systems that do not yet exist in reality.

Therefore, at present there is a need to solve an urgent scientific and practical problem, the essence of which is to develop methods for ensuring the functional stability of information systems based on software-defined networks.

The introduction contains a general description of the work, justification of the relevance of the research problem; statement of the purpose and questions of research, and also scientific novelty and practical value of the received results; information on approbation and volume of the dissertation. It is indicated what the main provisions of the work are for protection.

The first section provides a brief analysis of modern information systems, provides an analysis of functional stability and factors of a priori uncertainty due to the inaccuracy of the original data, formulates tasks and main research issues, outlines a general approach to its solution.

The second section improves the mathematical model of the IS data transmission system, which takes into account the type of packets transmitted and allows to determine the maximum delay time of the channel and evaluate the efficiency achieved through the use of priority traffic management.

Mathematical models of functional stability of information systems with time redundancy at moment restrictions on functions of distribution of random variables are developed. They allow to determine the guaranteed estimates of the indicators of functional stability of the IS data transmission system.

In the third section on the basis of the received estimations the analytical research of the guaranteed estimations of indicators of functional stability of information systems with a time reserve at various operating modes is carried out. A method for ensuring the functional stability of information systems based on software-defined networks has been developed. The methodology is based on the definition of guaranteed estimates of indicators of functional stability of the data transmission system, takes into account the time reserve, modes of operation of information systems and allows to determine the upper and lower estimates of indicators of functional stability.

In the fourth section the research of efficiency of work of IS with a time reserve on the basis of the guaranteed estimations of indicators of functional stability is carried out and questions of their practical realization are considered.

The conclusion of the work provides the main scientific and practical results of the work, indicating the conclusions and recommendations on the research topic.

The chosen area of research corresponds to the research topics of the State University of Telecommunications, conducted during 2017–2021. The results of the dissertation are used in the educational process of the State University of Telecommunications. The implementation of research results is confirmed by relevant acts.

Keywords: functional stability, information system, software-defined networks, telecommunication network, virtualization, cloud environment, cloud technologies, virtual machine, reconfiguration, reliability, time reserve, structural reserve.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті в періодичних наукових виданнях інших держав, які входять до Організації економічного співробітництва та розвитку та/або Європейського Союзу

1. Березовська Ю.В. Оцінка показників надійності інформаційних систем при обмеженій апріорній інформації / [В. В. Вишнівський, Ю. В. Каргаполов, Ю. В. Березовська та інші] // Sciences of Europe. – Praha, Czech Republic, 2021. –

Vol. 1, No. 63. – PP. 8–14.

2. Березовська Ю.В. Математичне моделювання топологій мереж VANET / В. В. Вишнівський, О. В. Зінченко, Ю. В. Березовська, М. Ю. Березівський // The scientific heritage. – Budapest, Hungary, 2021. – Vol. 1, No. 59. – PP. 26–29.

Статті в наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України

3. Березовська Ю.В. Функціональна стійкість інформаційних мереж при наявності обмеженої апріорної інформації про надійність / С. М. Іщеряков, С. В. Прокопов, Ю. В. Каргаполов, Ю. В. Березовська // Зв'язок. – К.: ДУТ, 2020. – № 6(148). – С. 42–46.

4. Березовська Ю.В. Забезпечення функціональної стійкості інформаційної системи при обмеженій вихідній інформації про визначальні випадкові величини / Ю. В. Березовська // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – К.: ДУТ, 2020. – № 4(69). – С. 69–78.

5. Березовська Ю.В. Підвищення ефективності застосування хмарних сервісів шляхом упровадження IEEE 802.11ax / В. В. Вишнівський, Ю. І. Катков, Ю. В. Каргаполов, Ю. В. Березовська, С. О. Благодир // Зв'язок. – К.: ДУТ, 2020. – № 5(147). – С. 3–11.

6. Березовська Ю.В. Деякі практичні аспекти реалізації мультипрограмного вирішення балансування навантаження на сервери інформаційного ресурсу / О. О. Ільїн, Д. С. Коваленко, М. П. Гніденко, Ю. В. Березовська // Зв'язок. – К., 2019. – № 2(138). – С. 17–22.

7. Березовська Ю.В. Основні напрямки підвищення функціональної стійкості системи управління центру обробки даних / [В. В. Василенко, О. О. Ільїн, Ю. В. Березовська та ін.] // Зв'язок. – К., 2019. – № 1(137). – С. 35–39.

8. Березовська Ю.В. Особливості безпроводових самоорганізованих мереж / Г. О. Гринкевич, В. В. Жебка, В. В. Василенко, Ю. В. Березовська // Наукові записки УНДІЗ. – К., 2018. – № 4(52). – С. 40–45.

9. Березовська Ю.В. Дослідження та аналіз пропускної здатності каналів передачі в телекомунікаціях / Ю. В. Хмельницький, В. О. Браун, Ю. В. Березовська, О. А. Філіпчук // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К., 2016. – № 52. – С. 147–152.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

10. Березовська Ю.В. Інформаційні системи безперервного використання з часовим резервуванням / Ю. В. Березовська // Сучасні досягнення компанії Hewlett Packard Enterprise в галузі ІТ та нові можливості їх вивчення і застосування: тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції, 16 грудня 2020 р. – К.: ДУТ, 2020. – С. 6–8.

11. Березовська Ю.В. Забезпечення функціональної стійкості системи управління центру обробки даних / В. В. Василенко, Ю. В. Березовська, Р. В. Космінський, Ю. В. Каргаполов // Проблеми інформатизації: Матеріали тринадцятої міжнародної науково-технічної конференції, 11-12 квітня 2019 р. – Київ: ДУТ, 2019. – С. 167.

12. Березовская Ю.В. Модель смешанного технического обслуживания (ТО) сложных объектов радиоэлектронной техники: ТО по ресурсу и ТО по состоянию / Ю. В. Березовская, В. Н. Цыцарев // Молодіжна військова наука у Київському національному університеті імені Тараса Шевченка: Тези доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених, ад'юнктів, слухачів, курсантів і студентів, 24 квітня 2015 року. – К.: ВІКНУ, 2015. – С. 61.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ 15
ВСТУП 16
РОЗДІЛ 1 ДОСЛІДЖЕННЯ СТАНУ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНИХ МЕРЕЖ 22
1.1 Стан і перспективи розвитку сучасних інформаційних систем 23
1.1.1 Аналіз ефективності сучасних інформаційних систем 23
1.1.2 Аналіз завдань, які вирішують сучасні інформаційні системи 25
1.2 Аналіз стану забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем 27
1.3 Забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем на основі програмно-конфігурованих мереж 29
1.3.1 Аналіз особливостей функціонування інформаційної мережі на основі програмно-конфігурованих мереж 29
1.3.2 Архітектура SDN 36
1.3.3 Стандартизація програмно-конфігурованих мереж 39
1.4 Постановка наукового завдання 43
1.5 Висновки до розділу 1 45
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ ДЛЯ ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНИХ МЕРЕЖ 47
2.1 Обґрунтування структури функціонально стійких інформаційних систем 47
2.1.1 Методи забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем 47
2.1.2 Загальний підхід до побудови математичної моделі інформаційних мереж 57

2.2 Моделі управління передачі інформації в інформаційних мережах 60
2.3 Математичне моделювання мережі передачі інформації інформаційних систем 63
2.3.1 Загальний підхід до моделювання мережі передачі інформації 63
2.3.2 Оцінка показників функціональної стійкості інформаційної мережі 67
2.3.2.1 Постійний резерв часу 68
2.3.2.2 Резерв часу – випадкова величина з відомим законом розподілу 74
2.3.2.3 Резерв часу – випадкова величина з невідомим законом розподілу 78
2.4 Висновки до розділу 2 84
РОЗДІЛ 3 МЕТОДИКА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ 85
3.1 Функціональна стійкість великих інформаційних систем 85
3.2 Розробка функціональної схеми інформаційної системи на основі програмно-конфігурованих мереж 87
3.2.1 Функціональна схема інформаційної системи 87
3.2.2 Побудова гарантованих оцінок функціональної стійкості інформаційних систем 89
3.3 Двосторонні оцінки показників функціональної стійкості систем з резервом часу при відомих моментах розподілу випадкових величин . . 91
3.3.1 Системи безперервного використання з часовим резервуванням . . . 91
3.3.2 Системи епізодичного використання з часовим резервуванням 96
3.4 Методика забезпечення функціональної стійкості інформаційної системи 98
3.5 Висновки до розділу 3 100
РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ЇХ ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ 102
4.1 Обґрунтування тестового стенду віртуального хмарного середовища . . 102

4.1.1 Розробка структурної схеми тестового стенду віртуального хмарного середовища 103
4.1.2 Оцінка ефективності методики забезпечення функціональної стійкості віртуального хмарного середовища на основі програмно-конфігурованих мереж 107
4.2 Аналіз ефективності часового резервування при наявності обмеженої апріорної інформації 109
4.3 Визначення величини резерву часу для системи передачі даних при неповній інформації. 113
4.4 Висновки до розділу 4 116
ВИСНОВКИ 118
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 120
ДОДАТОК А 132
ДОДАТОК Б 135

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ІС – інформаційна система

ПЗ – програмне забезпечення

ФС – функціональна стійкість

ЦОД – центр обробки даних

SDN – Software-Defined Networking (програмно-конфігуровані мережі)

ВСТУП

Серйозної революції сьогодні зазнає сектор телекомунікації та радіотехніки. Це є поштовхом до формування сучасних способів проектування, розгортання та експлуатації інформаційних систем, мереж і послуг, які необхідні користувачу. Відтак, бурхливими темпами відбувається і розвиток інформаційних систем як в Україні, так і у інших країнах світу.

Функціонування великих інформаційних систем (ІС) знаходиться в постійній взаємодії із зовнішніми впливами. При цьому, великий клас такої взаємодії представлений різними конфліктами, які суттєво впливають на успішне виконання загальносистемної мети. Такі інформаційні конфлікти стають причиною руйнування інформаційних ресурсів, порушення штатних інформаційних процесів, і як наслідок зриву виконання системних та прикладних функцій. Все це обумовлює наявність в інформаційних системах механізмів, які мають забезпечувати нову якість – здатність збереження і/або відновлення даних функцій (їхню стійкість) в умовах різного роду несприятливих впливів, а саме функціональної стійкості (ФС). Функціональна стійкість інформаційних систем являє собою інтегральну властивість, що включає надійність, живучість і безпеку. Відповідно, оцінка показників функціональної стійкості, необхідна для порівняння різних варіантів проектування, є складним науково-практичним завданням. Ще складніше провести пошук найкращого варіанту, який досягає оптимальних показників функціональної стійкості з певними обмеженнями.

Однак, сучасні ІС потребують впровадження засобів управління з використанням протоколів, які не залежать від послуг і, у свою чергу, надаються різними операторами та/або провайдерами всією мережею, незалежно від типів технічних систем, що у ній використовуються.

Створення систем, апріорно орієнтованих для роботи в умовах неповної або нечіткої вихідної інформації, невизначеності зовнішніх впливів та робочого середовища, вимагає використання інноваційних підходів до управління з використанням нових методів і технологій. Очевидно, що за наявності різних видів

невизначеності високий рівень автономності, адаптивності та надійності ІС повинен забезпечуватися шляхом збільшення їхніх можливостей, заснованих на обробці спеціальної інформації. Одним з головних критеріїв вибору повинна бути необхідна якість функціонування системи управління в умовах невизначеності із випадковим характером зовнішніх впливів, які включають непередбачені зміни у власних експлуатаційних показниках, параметрах середовища, цілях тощо.

Ефективність функціонування ІС значною мірою визначається часовими затримками при передачі даних між користувачами мережі. Мінімізація затримки в ІС з однорідним трафіком забезпечується на етапі проектування.

Актуальність теми. У даний час набувають поширення мультисервісні мережі, характерною рисою яких є неоднорідність трафіку. Неоднорідність трафіку полягає у передачі інформаційною мережею пакетів декількох типів (текстових пакетів, повних пакетів, відеопакетів і аудіопакетів тощо), на які поширюються різні вимоги. Ці вимоги будуть сформульовані у вигляді обмежень щодо терміну доставки пакетів різного типу. При цьому, обмеження можуть бути двох типів: імовірнісні у вигляді допустимої вірогідності перевищення встановлених обмежень часу затримки пакетів в інформаційній мережі та середні у вигляді обмеження на середній час затримки. Зазначений ліміт може бути врахований завдяки застосуванню спеціальних методів управління трафіком. Розв’язання цієї задачі вимагає використання моделей з неоднорідним потоком заявок, що дозволяють аналізувати властивості пріоритетних систем передачі даних та сформулювати рекомендації для проектування пріоритетних мереж.

Тому, для забезпечення функціональної стійкості ІС пропонується використовувати програмно-конфігуровані мережі (SDN). Головна ідея SDN полягає у відокремленні функцій передачі трафіку від функцій управління (включаючи контроль як самого трафіку, так і пристроїв, що здійснюють його передачу). При цьому суттєво підвищується рівень безпеки функціонування інформаційних систем.

Використання програмно-конфігурованих мереж дозволяє ввести в процес передачі пакетів поняття резерву часу. Істотний вплив на ефективність

використання в інформаційних системах резервування, як одного з основних засобів забезпечення заданого рівня надійності, надає повнота апріорної інформації про надійність її елементів та програмного забезпечення.

В Україні та інших країнах світу на даний час досить інтенсивно проводяться дослідження в галузі інформаційних мереж. Дослідження щодо забезпечення функціональної стійкості вивчаються рядом вчених, таких як О.А. Машков, В.І. Гостєв, О.В. Барабаш та інших. До речі, вперше поняття функціональної стійкості було введено професором Машковим О.А.

Питання, що стосуються удосконалення надійності систем детально розглянуті у роботах таких вчених: Б.П. Креденцер, М.К. Жердєв, Л.С. Стойкова, В.М. Цицарєв, В.В. Вишнівський та інші.

Врахування резерву часу для системи передачі даних дає можливість об’єктивно оцінити показники функціональної стійкості каналу передачі інформації мережі.

Дані результати можна використовувати на стадії проектування інформаційних систем при прогнозуванні їхньої поведінки. Вони виступають в якості обґрунтування передбачуваних показників якості функціонування для систем, які ще не існують в реальному виконанні.

Тому, на даний час існує необхідність вирішення актуального науково-практичного завдання, сутність якого полягає в розробці методики забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем на основі програмно-конфігурованих мереж.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Обраний напрям досліджень відповідає тематиці науково-дослідних робіт Державного університету телекомунікацій, що проводилися протягом 2017–2021 рр., а саме: “Дослідження надійності телекомунікаційних мереж” (РК № 0114U000404), “Методика розробки безпроводової мережі високої щільності на базі технології Aruba Instans” (РК № 0118U004553), “Методика підвищення ефективності систем управління безпроводовими мережами на основі векторного синтезу” (РК № 0118U004552).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення функціональної стійкості інформаційних систем на основі застосування програмно-конфігурованих мереж та визначенні гарантованих оцінок показників функціональної стійкості системи передачі даних з резервом часу.

Для досягнення мети поставлено і вирішено такі науково-прикладні завдання:

досліджено стан і перспективи розвитку сучасних інформаційних систем, функціональної стійкості інформаційних систем;

досліджено функціональну стійкість інформаційних систем на основі програмно-конфігурованих мереж;

удосконалено математичну модель системи передачі даних;

розроблено математичні моделі функціональної стійкості інформаційних систем з часовим резервуванням;

розроблено методику забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем на основі програмно-конфігурованих мереж;

проведено імітаційне моделювання для підтвердження достовірності отриманих результатів та ефективності розроблених моделей.

Об'єкт дослідження – процес передачі даних інформаційних систем.

Предмет дослідження – моделі та методи забезпечення функціональної стійкості системи передачі даних інформаційних систем.

Методи досліджень. Для досягнення поставлених в дисертаційній роботі задач використано методи теорії інформації, теорії ймовірності та математичної статистики, непараметричні методи оцінки надійності, методи імітаційного моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів роботи полягає у наступному:

Удосконалено математичну модель системи передачі даних, наукова новизна якої полягає в тому, що вона враховує тип пакетів, що передаються, і дозволяє визначити максимальний час затримки каналу та оцінити ефективність, що досягається за рахунок використання пріоритетного управління трафіком.

Розроблено математичні моделі функціональної стійкості інформаційних систем з часовим резервуванням, наукова новизна яких полягає в тому, що при

моментних обмеженнях на функції розподілу випадкових величин вони дозволяють визначити гарантовані оцінки показників функціональної стійкості.

Розроблено методику забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем на основі програмно-конфігурованих мереж, наукова новизна якої полягає в тому, що вона ґрунтується на визначенні гарантованих оцінок показників функціональної стійкості системи передачі даних, враховує резерв часу, режими роботи інформаційних систем та дозволяє визначати верхні та нижні оцінки показників функціональної стійкості.

Проведені наукові дослідження дають можливість розв’язати наукові завдання отримання гарантованих оцінок показників функціональної стійкості системи передачі даних інформаційних систем з урахуванням їх режимів роботи.

Практична цінність отриманих результатів.

Результати дисертаційної роботи впроваджені в практичну діяльність компаній, які працюють на ринку України, а саме: Державного спеціалізованого підприємства “Укрспецторг”, Державного науково-дослідного інституту хімічних продуктів, ТОВ “СИТЕС-СЕК’ЮРИТИ”. Теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі Державного університету телекомунікацій. Впровадження результатів досліджень підтверджуються відповідними актами, наведеними в додатку Б до дисертаційної роботи.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційне дослідження є самостійно виконаною роботою, в якій відображено особистий авторський підхід та особисто отримані теоретичні та прикладні результати, які відносяться до вирішення актуального науково-практичного завдання розробки методики забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем на основі програмно-конфігурованих мереж. Формулювання мети та задавань дослідження проводилось спільно з науковим керівником.

Основні положення і результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно та опубліковані у наукових працях. У спільних наукових працях автору належить наступне: [13] – розроблена імітаційна статистична модель за допомогою

якої можна оцінити потенційний вплив на очікувані показники надійності і вартості об’єкта, що проектується; [31] – розроблено мультипрограмне рішення балансування навантаження на сервери інформаційного ресурсу; [32, 73] – досліджені особливості функціонування та принципи передачі даних в телекомунікаційних мережах зі змінною топологією; [36, 72] – проведено дослідження з питань забезпечення функціональної стійкості системи управління центру обробки даних, розроблено алгоритм визначення реального технічного стану системи; [56] – розроблено модель стану пристрою, яка дозволяє розглянути топології мережі в кожний момент часу; [76, 92] – отримані оцінки показників надійності інформаційних систем; [77] – досліджені методи підвищення ефективності інформаційної системи, яка здатна надавати хмарні послуги.

Наукові положення, що виносяться на захист, висновки і рекомендації дисертації належать автору.

Апробація результатів дисертації. Основні теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на науково-технічних конференціях та семінарах професорсько-викладацького складу і наукових співробітників Державного університету телекомунікацій.

Публікації. На тему дисертаційної роботи опубліковано 12 наукових праць (додаток А), у тому числі 2 статті у періодичних наукових виданнях інших держав, які входять до Організації економічного співробітництва та розвитку та/або Європейського Союзу статей, 7 статей (з них 1 одноосібно) у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України, 3 матеріали доповідей (з них 1 одноосібно) у збірниках наукових праць на науково-практичних та науково-технічній конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи складає 140 сторінок друкованого тексту, у тому числі містить 18 рисунків та 13 таблиць. Список використаних джерел на 12 сторінках містить 104 найменувань.

РОЗДІЛ 1 ДОСЛІДЖЕННЯ СТАНУ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНИХ МЕРЕЖ

Інформаційна система – це система обробки інформації, разом із відповідними організаційними ресурсами, такими як людські, технічні та фінансові ресурси, що забезпечує та розповсюджує інформацію [3]. У [4] зазначено, що IT-система – це набір одного або декількох комп'ютерів, відповідного програмного забезпечення, периферійних пристроїв, терміналів, людських операцій, фізичних процесів, засобів передачі інформації, які утворюють автономне ціле, здатне виконувати обробку інформації та/або передачу інформації. У [2] визначається, що ІС є автоматизованою організаційно-технічною системою, яка реалізує технології обробки інформації з використанням технічних і програмних засобів.

Сучасні ІС являють собою складні технічні системи, які є об'єднанням робочих місць користувачів, приладів доступу до інформаційної мережі, фізичної мережі та управляючої системи, а також програмного забезпечення. Тобто ІС являє собою організовану відповідним чином сукупність технічних засобів для оптимізації інформації (передавання, зберігання, обробки) з метою забезпечення виконання основних функцій мережі з високою якістю за принципом 24/7, для забезпечення ефективної роботи, що в свою чергу є складною науково-технічною проблемою [77, 92].

Одним з основних показників якості ІС є функціональна стійкість, яка залежить від багатьох чинників [9, 11, 59]. Надійність та ефективне управління виступають переважними чинниками для ФС. Більше того, забезпечення надійності та можливість усунення несправності ІС повинно проводитись таким чином, щоб це не впливало на якість надання інформаційних послуг споживачеві. Зокрема, необхідно зазначити, що особливої уваги викликають питання складності оцінки показників надійності обладнання ІС, що виготовлені різними виробниками, а також питання пов'язані з ефективністю управління. Розробники використовують різноманітні методики для оцінки роботи ІС, яка повинна

забезпечити якість надання послуг кінцевому користувачу та працювати цілодобово. Також необхідно пам’ятати й про різноманітні природні впливи на інформаційну мережу. Вирішення даних завдань покладено на засоби забезпечення функціональної стійкості ІС.

Сучасний етап розвитку науки та техніки дає можливість створення нової методики, яка визначить основні принципи побудови ІС на основі використання програмно-конфігурованих мереж для розробки методів і засобів функціональної стійкості. Необхідно дослідити й визначити методику забезпечення функціональної стійкості ІС при відносно невеликих економічних затратах з необхідними показниками ефективності.

Даний розділ присвячений обґрунтуванню важливості й актуальності вирішення наукового завдання методики забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем на основі програмно-конфігурованих мереж.

У розділі проведено короткий аналіз сучасних інформаційних систем, дається аналіз функціональної стійкості та факторів апріорної невизначеності обумовлених недостовірність вихідних даних, формулюється завдання і основні питання дослідження, викладається загальний підхід до її вирішення.

1.1 Стан і перспективи розвитку сучасних інформаційних систем

1.1.1 Аналіз ефективності сучасних інформаційних систем.

Бурхливими темпами відбувається розвиток ІС у світі. Принциповою відмінністю сучасних ІС від існуючих є те, що вони здатні забезпечити нові інформаційні та телекомунікаційні послуги, які важко реалізувати за допомогою наявних мережевих технологій. При побудові ІС важлива роль відводиться визначенню вимог до систем, які потребують зміни архітектури ІС, аж до розробки та прийняття нових архітектурних рішень [25, 78, 94].

Таким чином, є потреба детального розгляду окремих цільових груп, які доцільно розбити на основні завдання, що пов’язані з архітектурою ІС. Так, на рисунку 1.1 наведені основні завдання при створенні ІС [83, 91]:

інформованість послуг визначається різноманітністю послуг, віртуалізацією ресурсів, мобільністю, функціональною стійкістю, ефективним управлінням, безпекою тощо. ІС надаватиметься величезна кількість послуг/додатків для задоволення практично будь-яких запитів споживачів, які мають тенденцію зростати, а за прогнозами сектору стандартизації телекомунікацій Міжнародного союзу електрозв'язку (МСЕ-Т) число послуг та їхній обсяг будуть швидко зростати. При цьому буде надаватися перевага впровадження нових послуг, що не потребують істотних капіталовкладень, збільшення експлуатаційних витрат, але таких, що забезпечують високу надійність та ефективність управління;

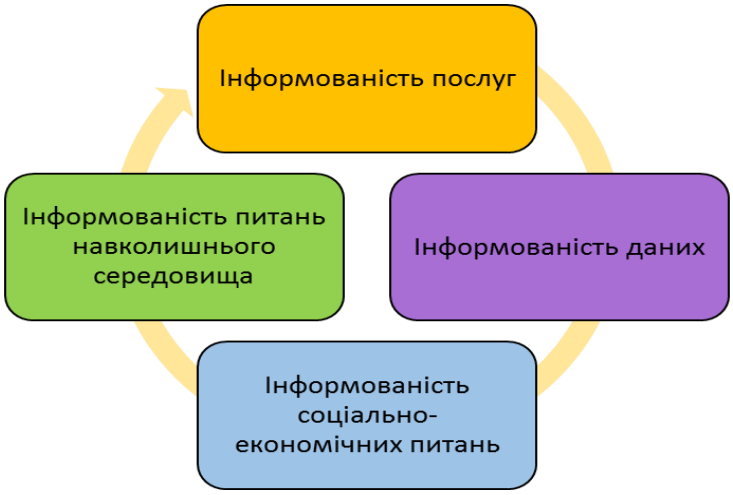

Рисунок 1.1 – Основні завдання при створенні ІС

інформованість даних передбачає оптимізацію ІС, що обумовлено значним збільшенням обсягів інформації обміну. Оскільки передбачається спрощення доступу до послуг при підвищенні його надійності та ефективності управління незалежно від місцеперебування користувача, то ці завдання тісно пов'язані з ідентифікацією кінцевих пристроїв. Більшість користувачів використовують значну кількість таких пристроїв, а тому зростає необхідність в удосконаленні та уніфікації задачі ідентифікації в ІС;

інформованість соціально-економічних питань окреслює вирішення цілого ряду завдань, що пов'язані зі зменшенням витрат на забезпечення життєвого циклу послуг і уніфікацію надання широкосмугового доступу до ресурсів ІС, що, у свою

чергу, послужить стимулом для розвитку світової економіки;

інформованість питань навколишнього середовища розв'язує завдання побудови таких ІС, які будуть екологічно безпечні для навколишнього середовища. Їхні технічні рішення повинні мінімізувати вплив на екосистему Землі, підвищити економічність і раціональний розподіл ресурсів, скоротити енергетичні витрати.

Кожне з цих завдань повинно реалізовуватись ІС, і досягатись завдяки впровадженню нових технологій, які повинні бути відкрито стандартизовані й узгоджені.

Проведені дослідження показали наявність тенденції збільшення кількості цілей, що стоять перед ІС, і в свою чергу до функціональної стійкості ІС. Перелік і ускладнення завдань в ІС потребує аналізу та визначення вимог, які необхідно враховувати при побудові ІС.

Головними вимогами щодо ефективної побудови сучасних ІС є: доступність – забезпечення доступності до ІС; функціональна стійкість – надійність та якість ІС; ефективність управління ІС – зниження негативного впливу на функціонування ІС; економічність – оптимізація та зниження загальносистемних витрат на побудову ІС.

Для кожної ІС ці вимоги визначаються індивідуально, так як розташування і порядок виконання нормативно не зафіксовано. Тому, вони розглядаються рівноправно.

1.1.2 Аналіз завдань, які вирішують сучасні інформаційні системи.

Інформаційні мережі зосередили в собі найбільш наукомісткі технології з високим рівнем автоматизації не тільки процесів підготовки інформації для прийняття рішень, але і самих процесів розробки варіантів рішень, що спираються на отримані ІС дані [51]. Результатом розвитку звичайних інформаційних мереж є побудова інформаційних систем.

Інформаційні системи здатні діагностувати технічний стан, надавати допомогу при антикризовому управлінні, забезпечувати вибір оптимальних рішень зі стратегії розвитку підприємства. ІС застосовуються для економічного розвитку діяльності підприємства, стратегічного планування, оцінки ризиків тощо [18].

Для ІС характерні наступні ознаки [16, 84]:

розвинені комунікативні здібності;

слабоструктуровані, погано формалізовані завдання;

невизначені та динамічні дані;

розвиток системи за рахунок отримання інформації, яка накопичена у визначених ситуаціях;

мережа може мати модель для визначення меж своєї компетентності;

пояснення своїх дій, невдалих спроб користувача, попередження користувачів про ситуації, які можуть призводити до порушення цілісності даних;

адуктивні висновки (висновки за аналогією).

Важко формалізовані слабоструктуровані завдання можливо вирішувати за допомогою ІС, основними з яких при побудові ІС є:

вирішення завдань щодо залежності між основними показниками в межах певного класу моделей;

виконання роботи з динамічними даними, що можуть змінюватися в процесі обробки отримання нових даних;

розвиток мережі й вилучення знань з отриманого досвіду від конкретних ситуацій, що збільшує мобільність і гнучкість мережі для того, щоб швидко переходити на нові сфери застосування;

використання інформації, яка виведена з бази даних дозволяє зменшити обсяги актуальної інформації при збереженні доступної користувачеві інформації.

Отже, спрямованість ІС до рішення слабоструктурованих, погано формалізованих завдань розширює область застосування ІС.

При роботі інформаційної системи важливими є обробка даних, використання інформації та знань. На рисунку 1.2 наведена структура обробки даних та інформації [38]:

моніторинг – накопичення даних по ряду показників про об’єкти управління з прив’язкою до часу;

аналіз – виявлення сенсу в даних, тобто виявлення в них причинно-наслідкових взаємозв’язків;

прогнозування – використання сенсу причинно-наслідкових залежностей в предметній області для визначення поведінки об’єкта управління під впливом дій певних факторів (резерв часу, апріорна невизначеність);

управління – використання знань для досягнення визначених цілей ефективного управління: збереження стабільного функціонування об’єкта управління, перехід об’єкта управління в заздалегідь заданий цільовий стан.

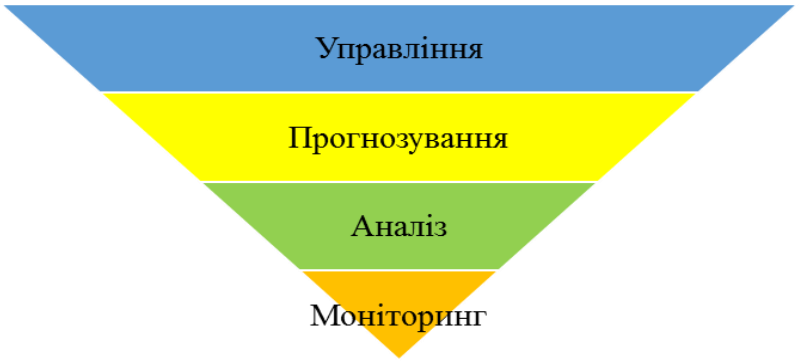

Рисунок 1.2 – Структура обробки інформації

Таким чином, на основі проведеного аналізу можна зробити висновок про те, що для побудови ІС необхідно підготувати альтернативні варіанти рішень щодо забезпечення необхідного рівня надійності, ефективного управління, функціональної стійкості для зниження ступеня ризику в виділених проблемних зонах функціонування ІС, спрогнозувати можливі події, які можуть суттєво вплинути на побудову ІС.

1.2 Аналіз стану забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем

Функціональна стійкість ІС тісно пов’язана з такими поняттями як надійність, живучість і безпека [59]. Відповідно, оцінка показників ФС, необхідна для порівняння різних варіантів проектування ІС, є складним науково-практичним завданням.

Тому, було проведено аналіз великої кількості статей, монографій, навчальних

посібників та інших інформаційних джерел з проблем надійності, функціональної стійкості та ефективного управління. У [27, 33, 35, 65, 71] основна увага приділяється основам теорії надійності: поняттям, визначенням і постулатам, докладної класифікації відмов, характеристик надійності при раптових і поступових відмовах. Розглянуто питання оцінки надійності систем з резервуванням без відновлення та з відновленням.

Роботи А.О. Машкова [11, 56, 57] присвячені питанням функціональної стійкості розподілених інформаційно-керуючих систем. Принциповою умовою забезпечення функціональної стійкості визначено можливість перерозподілу наявних ресурсів усередині системи. За рахунок такого перерозподілу можна давати рекомендації щодо нарощування структури чи складати обґрунтовані вимоги до системи, що буде проектуватися. До речі, вперше поняття функціональної стійкості було введено професором Машковим О.А.

У працях [6, 9, 10, 12] розробляються наукові методи і способи забезпечення функціональної стійкості різних типів технічних систем. У [34, 53, 55, 60] розглянуті проблеми створення та дослідження функціонально-стійких моделей інформаційних систем.

У літературі [20, 39, 45, 46, 48, 66, 79–81] представлені моделі надійності, їхня класифікація, розглянуті питання надійності програмного забезпечення, методи контролю та діагностування, побудови відмовостійких інформаційних систем. У таких роботах як [5, 63] розглянуті основні аспекти прогнозування для показників надійності і вартості експлуатації об’єктів різних типів технічних систем. Питання, що стосуються оцінки показників надійності знаходять місце у роботах [43, 46, 49, 75, 87, 88].

У монографії [74] викладаються аналітичні методи оцінки показників надійності резервованих систем при обмеженій апріорній інформації, коли відомі лише деякі числові характеристики визначаючих випадкових величин або значення вихідних функцій розподілу цих величин отримані лише в кінцевому числі точок. Отримана сукупність розрахункових співвідношень, що дозволяють визначати двосторонні оцінки, а також гарантовані максимальні (мінімальні) значення

показників надійності систем з почасовим і (або) структурним резервуванням з урахуванням основних факторів їхнього функціонування.

У [101, 104] зосереджена увага на мережевих аспектах та проблемах, з якими вони стикаються – від великих даних та мобільності до безпеки та складності. Висвітлені основи технології SDN, NFV, QoE, IoT та Cloud: як вони працюють, їх архітектура і яким чином їх можна застосовувати для вирішення реальних проблем. Представлено аналіз проблем безпеки в сучасних мережах.

У роботах Гніденко М.П. [28–30] розглядаються питання проектування і впровадження мережевих рішень, системно викладено аспекти побудови програмно-конфігуровних мереж SDN (Software-Defined Networks). Значна увага приділяється розгляду порядку розгортання, налаштування та використання основних елементів мереж SDN.

У працях Беркман Л.Н., Стеклова В.К. [83–86] розглядаються принципи побудови сучасних систем управління в телекомунікації, математичні методи моделювання управління і оптимізації проектування систем управління для мереж зв’язку. Наведено розрахунок обсягу керуючої інформації для забезпечення точності показників якості і розрахунок показників ефективності системи управління із застосуванням методу експертних оцінок.

Згадані роботи є ефективним засобом попереднього аналізу функціональної стійкості, надійності та безпеки ІС на етапі їх проектування.

1.3 Забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем на основі програмно-конфігурованих мереж

1.3.1 Аналіз особливостей функціонування інформаційної мережі на основі програмно-конфігурованих мереж.

Одним з ключових елементів робочого процесу є інформаційні технології, що стрімко розвиваються. Традиційна модель архітектури мережі не відповідає сучасним вимогам. Тому з’являється необхідність впроваджувати нові різноманітні інноваційні технології, які забезпечать достатньо швидкий шлях доступу до інфраструктури, ресурсів.

Основними компонентами сучасної ІС є комп'ютерні, хмарні технології, сучасні центри обробки даних, Інтернет речі тощо. Перераховані технології тісно взаємопов'язані між собою, і в свою чергу впливають на програмно-апаратний комплекс інформаційних систем [7, 19, 23, 94].

Основними напрямками удосконалення інформаційних систем, які впливають на трансформацію їх інфраструктури в умовах постійного збільшення послуг та додатків (рис. 1.3) є перехід на гібридну інфраструктуру, підтримка мобільності, заходів безпеки, системи управління, забезпечення заданого рівня надійності.

Рисунок 1.3 – Складові інформаційної системи

Таким чином, ІС забезпечує керування функціонуванням, як усієї мережі, так і систем що до неї входять. Для цього у інформаційній мережі повинен виконуватися такий набір завдань:

формування та модифікація конфігурації системи, включаючи віддалене завантаження програм та встановлення змінних параметрів;

контроль за роботою системи;

приймання інформації про помилки та реєстрація помилок;

локалізація та аналіз несправностей;

підключення альтернативних каналів, процесорів при несправностях;

реєстрація усієї роботи системи та передавання відомостей, необхідних операторам.

Забезпечення функціональної стійкості та ефективного управління в ІС є складним завданням. Проблеми ефективного управління вирішуються одночасно з конкретними та стратегічними питаннями розвитку мережевої архітектури. Теж саме можна сказати і про ФС інформаційної системи.

Такий підхід відповідає комплексному забезпеченню ФС та ефективного управління ІС на всіх етапах їхньої життєдіяльності – від проектування до експлуатації й утилізації. Функціональна стійкість усієї системи визначається надійністю та захищеністю її найслабшої частини.

Отже, для побудови ФС ІС необхідно враховувати всі складові ІС, до якої належать: система управління; забезпечення заданого рівня надійності; підтримка мобільності; підтримка безпеки.

Надійність, як відомо, закладається при проектуванні, відпрацьовується на стадії випробувань і досліджень, забезпечується в серійному виробництві та реалізується в експлуатації ІС. У даний час істотно зростає роль інформації про надійність для управління процесами створення і експлуатації ІС. Дана інформація повинна бути з високим ступенем достовірності та повноти, отримана до початку експлуатації ІС на основі розрахунків, прогнозування та випробування дослідних зразків з урахуванням всього спектру умов майбутньої експлуатації ІС.

Проте прийняття рішення в умовах апріорної невизначеності (відсутність або наявність неповної інформації про закони розподілу) – типове явище, з яким стикаються при отриманні оцінок надійності ІС на етапах проектування, розробки та експлуатації. Так, на практиці часто виникають ситуації, при яких неможливо зібрати достатньо статистичних даних про відмови або передумови до появи відмов ІС. Це, наприклад, має місце тоді, коли експлуатується нова ІС або в тих випадках, коли існуючими методами діагностики і контролю не вдається виявити виникнення деяких несправностей або їхніх передумов.

Вельми трудомістким завданням є оцінка показників надійності унікальних ІС, коли для апріорних імовірнісних розрахунків не завжди є необхідні вихідні дані, а статистична оцінка ускладнена малим обсягом випробувань. Багато в чому аналогічна ситуація виникає і при аналізі надійності ІС, відмови яких виникають

вкрай рідше, тобто ІС, відмова яких може призвести до небажаних наслідків. Крім того, на етапах проектування і розробки ІС для оцінки надійності, як правило, застосовуються:

довідкові дані по характеристикам використовуваних елементів, які одержані в основному в лабораторних умовах і не дають достатньої інформації про статистику реального процесу функціонування ІС;

результати випробувань аналогів складових частин або макетів ІС в лабораторних умовах, аналогічних до експлуатаційних.

Вже згадана інформація є статистично неоднорідною, тому при її об’єднанні з розрахунковою оцінкою того чи іншого показника надійності вноситься істотна частка невизначеності, а саме через невідомі закони розподілу визначальних випадкових величин, ступінь адекватності реальному процесу, ступінь залежності між різними видами відмов, границями зміни реалізації випадкових величин, тощо. Тому повністю обґрунтувати показники надійності на стадії проектування не завжди представляється можливим так само, як і чітко врахувати вплив технології при створенні ІС або вплив досвіду і кваліфікації персоналу при експлуатації інформаційної системи.

Окрему групу становлять невизначені фактори для яких відома лише область розподілу фактора, всередині якої вони можуть знаходитися або область, всередині якої знаходяться закони, якщо відомо, що фактор випадковий, але невідомий точно закон розподілу. У цьому випадку йдеться про невизначений закон розподілу випадкового фактора через недостатню вивченість будь-яких процесів або величин. Типовим прикладом невизначеності цього виду є невизначеність в законі розподілу випадкової величини, щодо якої, наприклад, відомі тільки перші два моменти – математичне очікування і дисперсія.

Потрібно мати на увазі, що невизначеність має місце, і по можливості враховувати її в конкретному дослідженні. Усунення невизначеності – це ослаблення її впливу або повне виключення на основі повної компенсації можливих втрат, пов’язаних з невизначеністю, за рахунок відповідних технічних рішень і вибору проекту ІС, яка в повній мірі її враховувала.

Таким чином, на етапах проектування, розробки та експлуатації ІС, як правило, недостатньо вихідної інформації для достовірної оцінки показників надійності ІС, тому що є невизначеність, обумовлена перерахованими вище факторами.

Під достовірністю інформації в загальному випадку розуміється ступінь адекватного відображення нею об'єктивно існуючих явищ, подій і процесів, а також властивостей досліджуваних ІС. Кінцевим продуктом переробки інформації про надійність є кількісна оцінка показника надійності. Якість цієї оцінки залежить від точності й повноти вихідних даних про надійність і методів їхньої обробки.

Наведені вище приклади показують, з одного боку, типовість описаної ситуації, коли рішення про вибір стратегії експлуатації доводиться приймати в умовах неповної інформації про надійність системи або її повної відсутності, а з іншого – суттєва зміна постановки задачі.

Це і визначає важливість і актуальність задачі знаходження двосторонніх границь або гарантованих оцінок для показників функціональної стійкості системи передачі даних.

Для інформаційної мережі характерні наступні переваги:

оперативність, продуктивність надання інформаційних послуг масовому користувачу;

вигода трьох сторін: постачальники обладнання, постачальники послуг, користувачі;

реалізація на будь-якій існуючій ІС.

Отже, для практичної реалізації наукового завдання, необхідно визначити показники ФС, які забезпечать надійність роботи системи, а також їхню модифікацію та корекцію при потребі.

Сучасні інформаційні технології висувають все більші вимоги до гнучкості та масштабованості комп'ютерних мереж. Фундаментом для забезпечення таких задач виступає програмно-визначена інфраструктура (Software Defined Infrastructure, SDI). У такому випадку, управління мережею виконується за допомогою спеціального рівня автоматизації, який відповідає за конфігурацію,

контроль та розподіл ресурсів ІС (рис. 1.4)

Рисунок 1.4 – Модель інформаційної мережі

Головним питанням постає необхідність розробки методики, яка забезпечить функціонально стійку роботу такої системи, управління ризиками, безпекою, формуванням сценаріїв управління.

При обраних параметрах надійності та ефективного управління ІС, необхідно провести аналіз та визначення потоків даних отриманої мережі. Для отримання ефективної моделі інформаційної мережі необхідно враховувати усі завдання, додатки та інформаційні потоки, які функціонують у вузлах мережі. Це дасть можливість ефективно використовувати ресурси мережі, що, в свою чергу, забезпечить надійність та оперативність обробки інформації, яка швидко змінюється відповідно до вимог сучасних технологій.

Вимоги до мережевих інфраструктур змінюються з приходом нових тенденцій: віртуалізація, хмарні обчислення, мобільність користувачів, зростання обсягів трафіку. Мережеві технології часто відстають від темпів інновацій у сучасному комп’ютерному світі. Багато в чому це пов’язано з тим, що мережеві елементи традиційно працюють на апаратному рівні, а не за допомогою програмного забезпечення, і тому поява на ринку інформаційних технологій набагато повільніша. Звичайний мережевий елемент складається як з рівня управління, так і з рівня даних. Рівень управління – це так званий “мозок” мережі,

який визначає, як і куди відправляти дані. Потім рівень даних направляє трафік відповідно до рішення, прийнятого рівнем управління. Оскільки кожен елемент має як рівень управління, так і рівень даних, важко вплинути на поведінку трафіку. Кожен вузол попередньо запрограмований, і якщо потрібен новий додаток, то кожен елемент повинен оновлюватися окремо розподіленим чином.

На допомогу приходять програмно-конфігуровані мережі (Software Defned Networking (SDN)). Задача SDN полягає у розділенні рівня управління і даних за рахунок введення контролера. Контролер можна використовувати як централізований ресурс для передачі інструкцій у рівень даних, як показано на рисунку 1.5. Це дозволяє легко перепрограмувати мережеві елементи при збереженні необхідної швидкості лінії для зв'язку.

Рисунок 1.5 – Архітектура традиційних мереж та SDN мереж:
шлях площини управління,
шлях площини даних

Технологія SDN відкриває гарні перспективи для вирішення значних проблем в центрах обробки даних (ЦОД), що стосуються, насамперед, складності мережевої інфраструктури, її гнучкості та масштабованості, а також вартості її програмування [72]. Програмно-конфігуровані мережі дозволяють будувати ЦОДи оснащені недорогими типовими серверами, на яких виконується спеціальне програмне забезпечення (ПЗ), що бере на себе функції пропрієтарних систем. SDN один з основних трендів у світі ЦОД завдяки уточненню стандартів, приходу нових розробників ПЗ, які не прив'язані до успадкованого парку обладнання, а також швидкої реакції традиційних вендорів.

Перевагою SDN є абстрагування базової інфраструктури. Це дозволяє швидко впроваджувати інновації в мережеві функції, оскільки адміністраторам не потрібно турбуватися про обладнання. Більше того, при використанні SDN основна мережа може бути неоднорідною за своєю природою. Це дозволяє використовувати апаратні компоненти, які можна динамічно змінювати в мережі без необхідності реконфігурування. А отже, сприяє скороченню прив'язки до постачальника, коли компанії з існуючою мережевою інфраструктурою змушені купувати обладнання у певного виробника через проблеми з сумісністю.

В якості альтернативи, SDN прагне бути в основному з відкритим вихідним кодом Application Programmable Interface (API). Найбільш широко використовуваний програмний інтерфейс OpenFlow.

Завдяки незалежності від постачальників і природі SDN з відкритим вихідним кодом вартість налаштування й експлуатації мережі може бути знижена. По-перше, підприємства, що надають мережі, можуть купувати обладнання за значно зниженою ціною, а потім фокус переноситься на послуги, що надаються мережами. По-друге, підприємства, яким потрібні мережі, отримують вигоду від зниження вартості обладнання, а також можливість програмування мереж, що означає, що мережеве рішення може бути адаптоване до потреб бізнесу, і це призводить до набагато кращого обслуговування. Отже, централізований підхід SDN значно спрощує наочність, тому що показники продуктивності і статистичні дані можуть бути легко зібрані. В кінцевому підсумку це спрощує управління мережею, що, в свою чергу, означає, що мережа може бути адаптована до потреб бізнесу і, як наслідок, підвищується ефективність.

1.3.2 Архітектура SDN. Протягом останніх декількох років програмно-конфігуровані мережі (SDN) виникли як нова інтелектуальна інформаційна архітектура для мережевого програмування. Основна ідея SDN полягає у переміщенні площини управління від комутаторів і забезпечення зовнішнього управління даними через логічну структуру програмного забезпечення, яка називається контролером.

Традиційне обладнання реалізує ці процеси в одному мережевому пристрої і вони є невіддільними один від одного: спеціальні мікросхеми забезпечують пересилання пакетів з одного порту на інший, а ПЗ, яке розміщується вище визначає правила такої пересилки, виконує необхідний аналіз пакетів, зміну службової інформації, яка в них міститься тощо (рис. 1.6). Для визначення маршруту передачі або недопущення зациклення трафіку мережеві пристрої “спілкуються між собою”, для чого розроблено безліч протоколів, таких як EIGRP, BGP і OSPF, але при цьому кожен функціонує досить автономно.

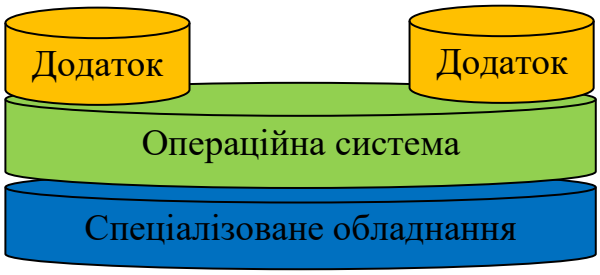

Рисунок 1.6 – Архітектура мережевого пристрою

Мережа SDN містить три площини, а саме: площину додатків, площину управління та площину даних. На рисунку 1.7 зображена загальна архітектура SDN.

Концепція SDN відокремлює площину управління від площини даних мережі. Це підштовхує мережевий інтелект до централізованого контролера. Отже, площина даних складається з комутаторів низького рівня та мережевих зв’язків між ними. До цих комутаторів підключені базові станції, точки бездротового доступу та Інтернет.

Площина управління складається з логічно-централізованого контролера, який забезпечує консолідовані функції управління. В основному централізований контролер контролює функції переадресації пакетів мережі через відкритий інтерфейс. Канал зв’язку між контролером і комутаторами називається каналом управління. Цей канал управління реалізований за допомогою протоколів управління. Наприклад, широко використовуваним протоколом управління в домені SDN є протокол OpenFlow [100].

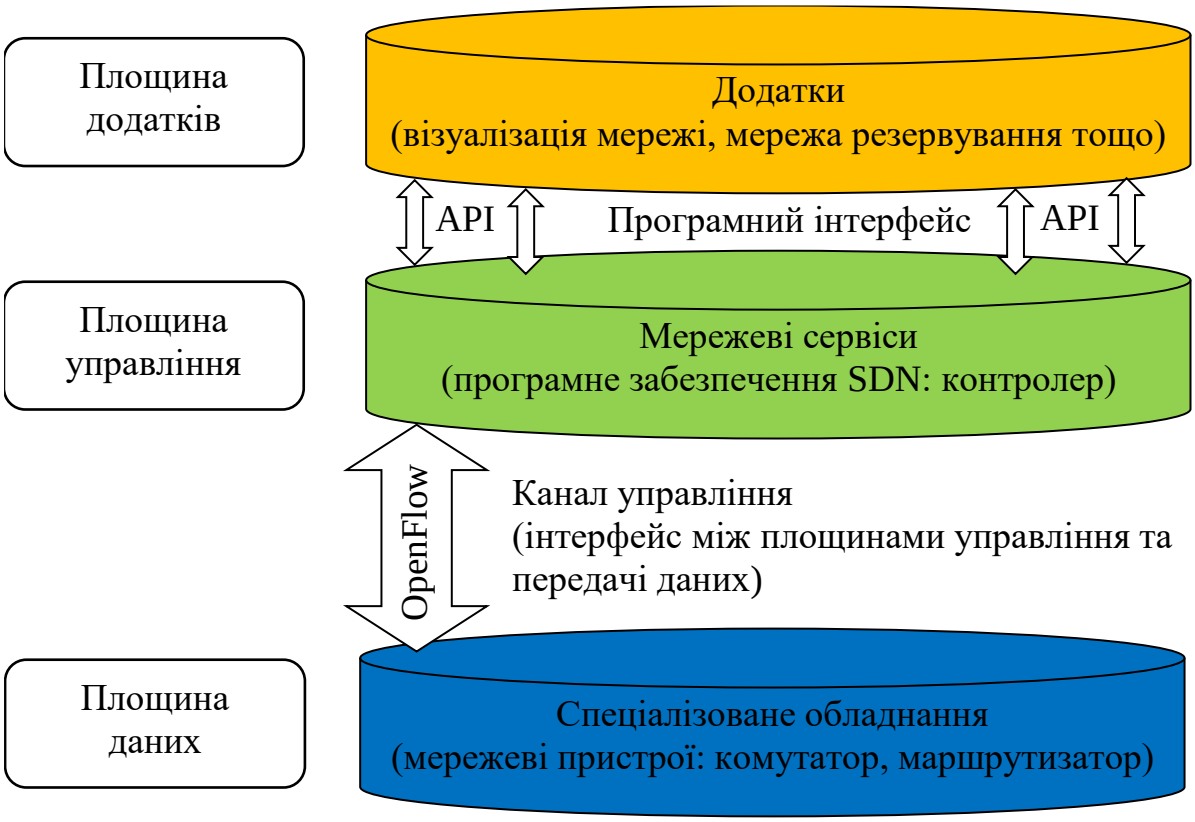

Рисунок 1.7 – Архітектура SDN

Площина додатків складається з бізнес-додатків кінцевих користувачів та інших суб'єктів управління. Приміром, пристрої керування мережею, такі як AAA (Authentication Authorization and Accounting), тепер є програмними додатками, які працюють поверх мережевої операційної системи у площині додатків [29, 30]. Окрім цього, можна впровадити різні інші бізнес-додатки, які використовують послуги зв'язку SDN. В архітектурі SDN основна мережева інфраструктура абстрагується від програм. Границя між прикладним та контрольним рівнями проходить через API, що програмується. Тому кожен оператор може розробити власні мережеві додатки. Це допомагає задовольнити конкретні потреби абонентів та оптимізує мережеві ресурси для досягнення кращої продуктивності. Більше того, архітектура SDN додатково дозволяє розгортати площини управління на хмарі для отримання більших обчислювальних ресурсів.

SDN дає можливість управляти всією мережею за допомогою інформаціних

систем організації та забезпечення. Таким чином, це дозволяє розподілити ресурси на вимогу, забезпечити самообслуговування, справді віртуалізовану мережу та безпечні хмарні служби. Отже, статична мережа може перетворитися на розширювану незалежну від постачальника платформу надання послуг, здатну швидко реагувати на мінливі потреби бізнесу, кінцевих користувачів та ринку, що значно спрощує проектування та експлуатацію мережі. Самі пристрої більше не повинні розуміти та обробляти тисячі стандартів протоколів, а лише отримувати інструкції від контролерів SDN.

1.3.3 Стандартизація програмно-конфігурованих мереж. У сучасних швидкоплинних інформаційних умовах усім телекомунікаційним організаціям і компаніям доводиться адаптуватися. Важливу роль у здатності до швидкої адаптації відіграють мережеві технології. Однією з таких є концепція програмно-конфігурованих мереж (SDN).

Одним з ключових моментів телекомунікаційної галузі є зусилля зі стандартизації. Стандарт – нормативний документ, заснований на консенсусі, прийнятий визнаним органом, що встановлює для загального і неодноразового використання правила, настанови або характеристики щодо діяльності чи її результатів, та спрямований на досягнення оптимального ступеня впорядкованості в певній сфері [1]. Стандарт повинен відповідати на необхідність зв’язку між пристроями різних виробників. Отже, основна увага в стандарті приділяється визначенню протоколу, форматам повідомлень і відповідної поведінки, залишаючи конкретні реалізації на розсуд виробника.

Багатонаціональні компанії вважали, що організації, які займаються розробкою стандартів діють занадто повільно, щоб забезпечити введення в дію корисних стандартів у стрімкому технологічному світі. Тому наприкінці 1980-х почали з’являтися промислові консорціуми з відкритих стандартів. Низка таких консорціумів залучилася й до розробки стандартів щодо програмно-конфігурованих мереж.

Єдиного органу з питань стандартів, який відповідальний за розробку

відкритих стандартів для SDN на відміну від деяких інших галузей мережевих технологій не існує. Проте, існує велика кількість міжнародних організацій, промислових консорціумів та відкритих ініціатив з розвитку, що беруть участь у створенні стандартів та керівних принципів для SDN.

Різні органи з питань стандартів працюють над дуже взаємопов'язаними і заплутаними проблемами, хоча кожна з них зосереджена на своїй точці зору. Таким чином, поточна панорама діяльності по стандартизації складається з ряду несумісних дій, деякі з яких намагаються вирішити одні й ті ж проблеми різними шляхами. SDN покладається на API і стандартизовані точки доступу до послуг (Service Access Points, SAP), щоб мати можливість контролювати поведінку фізичних мережевих елементів. Отже, стандартизація відіграє вирішальну роль для цієї мети, оскільки без чіткого визначення цих інтерфейсів SDN не може стати реальністю.

На сьогоднішній день найважливішим консорціумом, що займається стандартизацією SDN, є Фонд Відкритих Мереж (Open Networking Foundation (ONF)). ONF – некомерційний галузевий консорціум, керований провідними мережевими компаніями Intel, HPE, Huawei, Cisco, Juniper Networks тощо. Компанія призначена для просування та впровадженням SDN шляхом розробки відкритих стандартів, а також стандартизацією протоколу OpenFlow і пов'язаних технологій. Стратегічний план консорціуму передбачає сприяння просуванню та трансформації мережевих технологій вперед (рис. 1.8) [99].

Протокол OpenFlow – перший стандартний інтерфейс, спеціально розроблений для SDN, і його вже застосовують у різних мережах та мережевих продуктах, як на апаратній, так і на програмній основі. Стандарт дозволяє еволюціонувати мережам, надаючи логічно централізованому програмному забезпеченню можливість змінювати поведінку мережевих пристроїв за допомогою чітко визначеного "набору інструкцій переадресації".

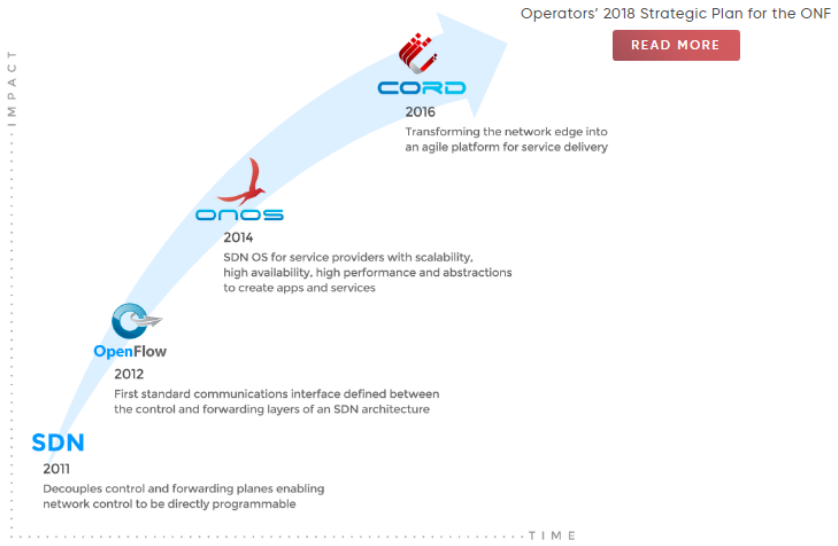

Рисунок 1.8 – Стратегічний план компанії Open Networking Foundation

OpenFlow один з найбільш актуальних доступних інструментів SDN, використовує центральний контролер і набір інтерфейсів, а саме північний інтерфейс для зв'язку з керуючими додатками і південний інтерфейс для зв'язку з реальним мережевим обладнанням. За допомогою цих двох інтерфейсів можна розробляти програми для використання мережевих функцій та взаємодії з розгорнутим обладнанням. Отже, життєво важливо стандартизувати ці два інтерфейси, щоб мати можливість обмінюватися даними і взаємодіяти з обладнанням, що надаються різними постачальниками [95].

Міжнародний союз електрозв'язку – Сектор стандартизації телекомунікацій (International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector (ITU-T)) – це агенція ООН, яка видає стандарти, які називаються рекомендаціями, у галузі телекомунікацій [98]. ITU-T заснував Спільну координаційну діяльність щодо програмно-визначених мереж та розпочав роботу над розробкою стандартів, пов'язаних із SDN. Участь у заходах, пов'язаних із SDN бере участь декілька груп: SG 13 (мережі майбутнього, включаючи хмарні обчислення, мобільні мережі та мережі наступного покоління): провідна дослідницька група SDN в ITU-T, яка вивчає аспекти SDN та віртуалізації для мереж наступного покоління (NGN); SG 11 (вимоги до сигналізації, протоколи та специфікації випробувань): вивчає структуру сигналізації SDN та способи застосування технологій SDN для IPv6; SG

15 (транспорт, доступ та дім): розглядає оптичні транспортні мережі, мережі доступу та домашні мережі, досліджує транспортні аспекти SDN, узгоджені з архітектурою SDN ONF; SG 16 (мультимедіа): оцінює OpenFlow як протокол управління потоками мультимедійних пакетів та вивчає мережі віртуальної доставки вмісту.

Дослідженнями у даному напрямку також займаються: Інститут інженерів електротехніки та електроніки (Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)), Європейський інститут стандартизації в області телекомунікацій (European Telecommunications Standards Institute (ETSI)), Альянс відкритих центрів обробки даних (Open Data Center Alliance (ODCA)), Альянс для рішень в галузі телекомунікацій (Alliance for Telecommunications Industry Solutions (ATIS)), Форум широкосмугового зв'язку (Broadband Forum (BBF)), Форум Metro Ethernet (Metro Ethernet Forum (MEF)), Форум оптичних мереж Інтернету (Optical Internetworking Forum (OIF)).

У рамках Інтернет Суспільства (Internet Society (ISOC)) найбільш активними є дві групи: Інженерна рада з питань Інтернету (Internet Engineering Task Force (IETF)) і Робоча група з досліджень Інтернету (The Internet Research Task Force (IRTF)). ISOC – це координаційний комітет по інтернет-дизайну, проектуванню та управлінню. Області, що охоплюються включають роботу самого Інтернету і стандартизацію протоколів, які використовуються кінцевими системами в Інтернеті для забезпечення взаємодії. Різні організації в рамках ISOC несуть відповідальність за фактичну роботу по розробці і публікації стандартів.

IETF – відкрите міжнародне співтовариство проектувальників, учених, мережевих операторів і провайдерів, яке займається розвитком протоколів і архітектури (технічних стандартів) Інтернету. Місія IETF полягає у розробці Request for Comments (RFC) та високоякісних відповідних технічних документів, що описують вдосконалення існуючих стандартів та створення, впровадження нових стандартів Інтернету [96]. Компанія займається розробкою можливостей взаємодії з маршрутизаторами та протоколами маршрутизації для застосування політик маршрутизації (інтерфейс до систем маршрутизації (I2RS)), а також

розробкою архітектури та можливостей для контролерів для спрямування підмножин трафіку через мережу таким чином, що кожна віртуальна платформа послуг бачить лише той трафік, з яким вона повинна працювати (мережі службових функцій).

IRTF фокусується на питаннях довгострокового дослідження, пов'язаних з Інтернетом. IRTF складається з ряду цілеспрямованих та довгострокових дослідницьких груп, які працюють над темами, пов'язаними з Інтернет-протоколами, програмами, архітектурою та технологіями [97]. Одна з дослідницьких груп розробляє RFC, пов'язані з архітектурою SDN, аналізує підходи, які можуть бути використані в найближчому майбутньому.

Існує також ряд інших організацій, які не створені членами галузі та не є офіційними органами, такими як органи з питань стандартів. Як правило, ці організації створюються та керуються користувачами і мають особливу спрямованість, завжди працювати з метою розробки відкритих стандартів або програмного забезпечення з відкритим кодом. Ряд таких груп стали активними у стандартизації SDN: OpenDaylight, Open vSwitch, Open Platform for NFV, OpenStack.

Таким чином, щоб організувати і сфокусувати роботу, виконувану різними органами, які займаються важливою роботою щодо стандартизації технологій, пов'язаних із SDN, бажано створити загальне уявлення про сценарії використання, обміну в Інтернеті і функціональні можливості для всіх органів з питань стандартів, які в подальшому можна використовувати для створення реального імпульсу і просування концепції SDN наступного покоління.

1.4 Постановка наукового завдання

Проведені дослідження показали, що найбільш важливим рушійним фактором для користувачів ІС є функціональна стійкість, надійність та ефективне управління. На рисунку 1.9 наведені можливості виконання наукового завдання побудови функціонально стійких інформаційних систем на основі програмно-

конфігурованих мереж та визначені основні напрямки за якими здійснюватиметься удосконалення ФС ІС.

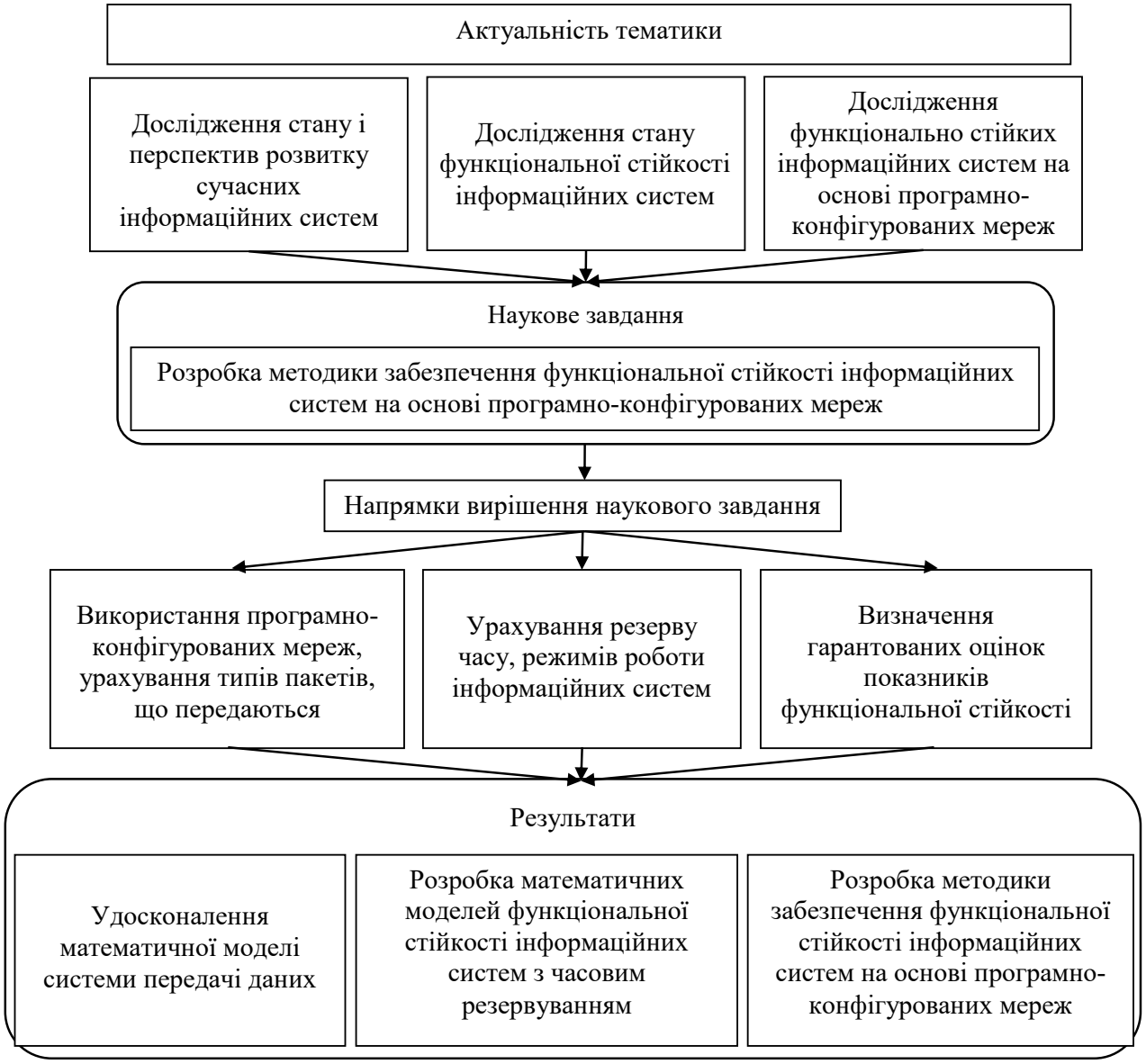

Рисунок 1.9 – Структурно-логічна схема дослідження

На сучасному етапі розвитку науки та техніки є можливість створення нової методики, яка визначить основні принципи побудови ІС на основі використання програмно-конфігурованих мереж для розробки методів і засобів функціональної стійкості інформаційних систем. Тому, необхідно дослідити й визначити методику забезпечення функціональної стійкості ІС при відносно невеликих економічних затратах з необхідними показниками ефективності.

Таким чином, на даний час існує необхідність вирішення актуального науково-практичного завдання, сутність якого полягає в розробці методики забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем на основі програмно-конфігурованих мереж.

1.5 Висновки до розділу 1

1. Досліджено стан функціональної стійкості інформаційних систем. На основі аналізу вимог при побудові ІС можна зробити висновок про те, що необхідно підготувати альтернативні варіанти рішень щодо забезпечення необхідного рівня функціональної стійкості для зниження ступеня ризику в проблемних зонах функціонування інформаційних мереж та спрогнозувати можливі події, які можуть суттєво вплинути на побудову мережі.

2. Визначені переваги архітектури SDN відносно традиційних мереж. Можна стверджувати, що під час побудови ІС доцільно впроваджувати вирішення наукового завдання відповідно до технології SDN. Це дозволить телекомунікаційним і звичайним компаніям отримати незалежне управління усією мережею, що значно спростить експлуатацію мереж. Конфігурація мережі є значно спрощеною, а отже, співробітникам компаній не потрібно буде вводити окремо сотні нових рядків коду для мережевих пристроїв. Є можливість швидкої зміни, в режимі реального часу, характеристик мережі. Відповідно, терміни ініціювання нових додатків і сервісів значно скорочуються, що у свою чергу дозволить підтримувати функціональну стійкість ІС. Тобто, це дозволить спростити експлуатацію мережі та вартість її обслуговування.

3. На основі проведеного аналізу та досліджень принципів функціональної стійкості інформаційних систем на основі програмно-конфігурованих мереж у наступних розділах дисертаційної роботи доцільно зосередити увагу на розв’язанні наступних наукових задач:

удосконалити математичну модель системи передачі даних ІС, яка б враховувала тип пакетів, що передаються;

розробити математичні моделі функціональної стійкості інформаційних систем з часовим резервуванням при моментних обмеженнях на функції розподілу випадкових величин;

провести аналітичне дослідження гарантованих оцінок показників функціональної стійкості інформаційних систем з резервом часу при різних режимах роботи;

розробити методику забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем на основі програмно-конфігурованих мереж;

провести дослідження ефективності роботи ІС з резервом часу на основі гарантованих оцінок показників функціональної стійкості.

РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ ДЛЯ ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНИХ МЕРЕЖ

2.1 Обґрунтування структури функціонально стійких інформаційних систем

2.1.1 Методи забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем.

Теорія складних технічних систем ґрунтується на математичних моделях їхніх складових частин. Прикладами таких систем можуть служити телекомунікаційні мережі, радіолокаційні системи, інформаційні системи, які призначені для вдосконалення організації та управління процесами обробки інформаційних потоків, а також автоматизовані системи управління технологічними процесами, автоматизовані системи управління підприємствами, автоматизовані інформаційно-пошукові системи тощо.

Під поняттям ІС розуміють:

систему, яку можна розчленувати на кінцеве число підсистем, а кожну підсистему у свою чергу – на кінцеве число більш простих підсистем і т.д., доти поки не одержимо нероздільні елементи системи (під елементами системи розуміють об’єкти, які в даних умовах не підлягають розчленовуванню на частини);

елементи ІС функціонують у взаємодії один з одним;

властивості ІС визначаються не тільки властивостями окремих елементів, але й характером взаємодії між елементами.

Таким чином, відмінними рисами ІС є велика кількість взаємозалежних і певним чином взаємодіючих між собою різнорідних елементів. При цьому властивості ІС залежать як від властивостей елементів, так і від характеру взаємодії між ними та від зав’язків ІС із зовнішнім середовищем. Тому для ІС важко сформулювати поняття відмови.

Забезпечення функціональної стійкості ІС представляє собою процедуру, що включає: проектування, виготовлення, перевірку й використання. На етапі проектування встановлюється теоретична (очікувана), а в процесі виготовлення й

перевірки – фактична функціональна стійкість кожного об’єкта ІС, після чого досягнутий рівень функціональної стійкості підтримується правильною організацією використання.

Отже, забезпечення високої функціональної стійкості ІС – це комплексна проблема, що охоплює широке коло аспектів. Вирішення даної проблеми пов’язані з численними організаційними, технічними й фундаментальними дослідженнями на які необхідно витратити багато коштів та часу.

Серед різних аспектів розгляду організаційних і технічних основ забезпечення функціональної стійкості ІС можна виділити наступні види забезпечення: власне організаційне (або системне забезпечення), програмне, технічне, інформаційне й нормативне [55, 57, 60].

Після якісного проектування, виробництва та впровадженого програмного забезпечення основним шляхом забезпечення функціональної стійкості ІС є впровадження різних видів надлишковості. Тому поняття надлишковості є фундаментальним у загальній теорії надійності та функціональної стійкості.

Під надлишковістю розуміють сукупність додаткових засобів і/або можливостей, які використовуються для забезпечення нормального функціонування складних систем в умовах впливу дестабілізуючих внутрішніх і зовнішніх факторів [49]. Розрізняють і використовують наступні види надлишковості: структурна, функціональна, інформаційна, часова й навантажувальна.

За допомогою використання надлишковості як резервування досягається ФС ІС. Для забезпечення резервування використовується комплекс додаткових засобів.

Дамо коротку характеристику видам резервування.

Структурне резервування – резервування із застосуванням резервних елементів структури ІС.

Із цим видом резервування пов’язані найбільш серйозні успіхи в розв’язанні проблеми забезпечення надійності ІС. У структурне резервування, як в універсальний метод, що дозволяє зробити надійність систем як завгодно високим, повірили після опублікування робіт Дж. Неймана та К. Шенона [64, 68]. Із цих робіт

витікало, що з ненадійних елементів можна створити надійну систему введенням достатньої надлишковості. Ці висновки були підтверджені в численних працях вітчизняних і закордонних учених. Надалі більш ретельний аналіз практичних методів структурного резервування й уточнених моделей надійності показав, що зроблені висновки виявилися занадто оптимістичними. З'ясувалося, що структурне резервування заміщенням вимагає певного часу на перемикання резерву, причому перемикачі виявляються не дуже простими і надійними. Проте надійність резервованої системи знижується через можливі відмови перемикачів або несвоєчасне їхнє спрацьовування. Крім того, резервними елементами можна користуватися тільки після виявлення відмови в основному елементі, перевірки стану резервного елемента й формування команди на перемикання. Це припускає наявність розвиненої системи контролю з високими показниками повноти й вірогідності функціонування. Погіршення характеристик контролю викликає зниження показників ефективності структурного резервування, досягнення необхідних значень цих показників вимагає певних витрат часу й засобів.

В інформаційних системах, крім відновлення працездатності шляхом перемикання на резерв, необхідно проводити також інформаційне відновлення, на яке часто витрачаються значні ресурси апаратури й часу. При цьому саме ефективність інформаційного відновлення визначає, як правило, ефективність структурного резервування. Крім того, відмінною рисою таких систем є наявність збоїв і знецінювання частини виконаної роботи в результаті виникнення відмов і збоїв. Структурне резервування в традиційних його застосуваннях не захищає системи від збоїв, хоча потік збоїв може бути більш інтенсивним, ніж потік відмов.

З вищесказаного випливає, що практичне використання відомих способів структурного резервування викликає в ряді випадків серйозні труднощі, які знижують його ефективність, а іноді й обмежують можливості застосування. Одним з таких шляхів подолання цих труднощів є комбіноване застосування структурної та часової надлишковості з розробкою спеціальних засобів системного програмного забезпечення.

Інформаційне резервування – це резервування із застосуванням резервів

інформації. Надлишковість (резерви) інформації, наприклад, у інформаційних мережах створюється за рахунок введення додаткового обладнання, ліній зв'язку, тощо. У таких мережах, які повинні функціонувати протягом доби, тобто 24/7, передбачається саме інформаційне резервування шляхом введення надлишкової інформації. Ця надлишковість, як правило, вводиться шляхом подання переданої й обробленої інформації за допомогою кодів, використання різних додаткових змінних, реалізації алгоритмічних (програмних) методів захисту процесів обробки й передачі даних від збоїв, відмов і перешкод. Реалізація перерахованих вище методів, як правило, супроводжується введенням часової надлишковості.

До основних недоліків цього виду резервування можна віднести ускладнення апаратури й алгоритмів функціонування, зниження продуктивності систем обробки й передачі даних, збільшення вартості.

Функціональне та навантажувальне резервування, це резервування, при якому використовується здатність елементів об'єкта виконувати додаткові функції (при функціональному резервуванні) або сприймати додаткові навантаження понад номінальні (при навантажувальному резервуванні). Ці види резервування як правило використовуються в складних просторово-рознесених системах за рахунок структурного й функціонального ускладнення апаратури і зв'язку між елементами, а також шляхом раціональної організації застосування систем. Труднощі практичного використання даних видів надлишковості пов'язані з необхідністю в ряді випадків додаткового перетворення форми інформації, погіршенням її точності й вірогідності, зниженням пропускної здатності тощо.

Часове резервування – це резервування із застосуванням резервів часу. При реалізації цього виду резервування резерви часу вносяться не в об'єкт, як, наприклад, при структурному резервуванні, а в порядок (алгоритм) використання об'єкта, як це іноді має місце при інформаційному або функціональному резервуванні. У випадку часового резервування враховується характер наслідків відмов об'єкта при виконанні завдання. При забезпеченні певних вимог до тривалості відновлення працездатності наслідки відмов можуть бути усунуті й не відбитися на якості й своєчасності виконання об'єктом своїх функцій. Це дозволяє

знаходити й використовувати для забезпечення нормального функціонування складних систем внутрішні резерви (зокрема, часові), закладені в самих системах. При цьому підвищення показників ФС систем часто не пов’язане зі збільшенням кількості апаратури та додаткових коштів, а ґрунтується на введенні й використанні наявних у системах резервів часу. Облік резерву часу при оцінці ФС дає можливість більш об’єктивно оцінити можливість систем нормально функціонувати в умовах впливу різних дестабілізуючих факторів. Саме наявністю (або відсутністю) резерву часу в багатьох випадках можна пояснити, чому система виконує свої функції більш успішно (або менш успішно), ніж так як визначено показником безвідмовності об’єкта.

Проведений аналіз показав, що реальні ІС характеризуються різноманітністю джерел резерву часу й засобів, за допомогою яких він забезпечується. Розглянемо деякі з них:

1. У ряді випадків наявність в об’єкті резерву часу обумовлено особливостями функціонування самого об’єкта. Прикладом можуть служити дискретні об’єкти, пов’язані з одержанням, обробкою й передачею інформації в дискретні моменти часу (радіолокаційні комплекси, деякі системи зв’язку та інформаційні системи тощо). Очевидно, що відмова й відновлення працездатності цих об’єктів у проміжках часу між одержанням інформації не порушує їхнього нормального функціонування;

2. Часове резервування характерне для об’єктів, які володіють функціональною інерційністю. Під цим розуміється властивість об’єкта, яка характеризує його здатність допускати перерви в роботі без втрати вихідного ефекту. Фізичною основою, що визначає наявність у таких об’єктів резерву часу, є інерційність процесів нагрівання, охолодження, післясвітіння тощо.

Величина резерву часу визначається швидкістю протікання цих процесів і заданих граничних значень деяких величин, що характеризують об’єкт (температура, яскравість та ін.).

У перерахованих вище випадках резерв часу забезпечується без залучення додаткових засобів, без передачі об’єктом своїх функцій іншому об’єкту;

3. Іноді резерв часу при відмові окремого елемента (або об’єкта в цілому) забезпечується шляхом передачі на деякий припустимий час функцій елемента (або об’єкта), що відмовив іншому елементу (або об’єкту). При цьому можна розрізнити кілька ситуацій:

функції елемента, який відмовив, передаються іншому елементу, для якого вони не зовсім властиві; однак надлишковість за виконуваними функціями, наявна у підмінюючого елемента, дає йому можливість одночасно (паралельно) виконувати в ході деякого припустимого часу свої й чужі функції з погіршенням (у припустимих межах) якості виконуваної роботи;

функції елемента, який відмовив, передаються запасному елементу;

функції елемента, який відмовив, передаються в порядку “донавантаження” тією ж роботою іншому ідентичному елементу, що має запас (надлишковість) по навантаженню.

У першому випадку підмінюючий елемент представляє собою функціональний резерв, у другому випадку – структурний, у третьому випадку ми маємо справу з навантажувальним резервуванням. Вказані вище види резерву є засобом, який забезпечує наявність у відмовившого елемента, резерву часу – деякого припустимого часу, у ході якого можливе відновлення працездатності елемента, що відмовив, при допустимому зниженні якості функціонування системи в цілому;

4. При введенні інформаційної надлишковості в ІС оброблювана й передана інформація представляється в корегувальному коді (з виявленням або усуненням помилок). При технічній реалізації це звичайно приведе до часової (або апаратурної) надлишковості;

5. Існує ряд об’єктів, у яких резерв часу передбачений порядком (алгоритмом) їх використання. Це відноситься, зокрема, до об’єктів з випадковим навантаженням, що виконують завдання, які надходять у випадкові (або заздалегідь відомі) моменти часу. У цьому випадку резерв часу визначається проміжком часу від моменту відмови об’єкта до моменту надходження завдань та являє собою випадкову величину, що залежить від показників безвідмовності апаратури і

характеристик потоку завдань;

6. Важливим джерелом резерву часу є запас продуктивності, який можна утворити двома шляхами: збільшуючи швидкодію окремих об’єктів або поєднуючи кілька об’єктів у єдиний комплекс. При цьому з’являється можливість зменшити мінімальний час виконання завдання й створити резерв часу без збільшення оперативного часу;

7. Резерв часу може бути створений за рахунок внутрішніх запасів вихідної продукції. Це характерно для багатофазних об’єктів. Для зберігання запасів у таких об’єктах повинні бути передбачені спеціальні накопичувачі: запам’ятовувальні пристрої, буфери тощо. Поки запас не вичерпаний, продукція продовжує надходити на вихід системи, незважаючи на відмови певних елементів ІС.

Розглянуті вище джерела часової надлишковості не охоплюють усіх можливих в інженерній практиці ситуацій. У реальних технічних об’єктах можливі й інші джерела часової надлишковості. У ряді випадків резерв часу може мати кілька джерел.

Методи часового резервування можуть бути класифіковані по ряду ознак: характеру поповнення й використання резерву часу, кратності резервування, повноті охоплення об’єкта і т.д. Частина ознак специфічна тільки для часового резервування, а частина – має досить чіткі аналогії з ознаками інших видів резервування, зокрема, структурного.

За способом поповнення розрізняють поповнюваний, не поповнюваний і комбінований резерв часу. У першому випадку після закінчення відновлення працездатності об’єкта резерв часу поповнюється – збільшується за певним законом. По тривалості досягнення вихідної величини резерв часу ділять на миттєво поповнюваний і поступово поповнюваний. Значення не поповнюваного резерву встановлюється заздалегідь і в процесі роботи він може лише зменшуватися за рахунок втрат часу на відновлення працездатності об’єкта й усунення наслідків відмов. Комбінований резерв припускає спільне використання поповнюваного й не поповнюваного резерву часу. У цьому випадку порядок використання складових резерву може бути різним і залежить від алгоритму функціонування ІС.

Подальша класифікація методів часового резервування може бути проведена з урахуванням певної аналогії між структурною й часовою надлишковістю. Це дає можливість із деякими застереженнями поширити існуючу класифікацію структурного резервування на часове резервування – останнє може бути загальним, роздільним, груповим, повним, частковим тощо. Наприклад, загальне резервування характеризується тим, що передбачений у системі резерв часу може бути використаний для відновлення працездатності будь-якого елемента об'єкта. Такий резерв звичайно створюється за рахунок збільшення оперативного часу, продуктивності всіх елементів об'єкта або функціональної інерційності. Роздільне часове резервування передбачає введення резерву часу для кожного елемента, причому жоден з елементів не може скористатися резервом, призначеним для іншого елемента, хоча це й не виключає можливості перерозподілу резервів між елементами в процесі функціонування. Групове резервування займає проміжне положення.

Таким чином, часове резервування, як метод підвищення ФС, маючи певні специфічні риси, тісно пов'язане з іншими видами резервування, і насамперед, зі структурним. Це проявляється, зокрема, у можливості забезпечення резерву часу за рахунок інших видів надлишковості, а також у спільності часового резервування з іншими, більш вивченими, видами резервування. Тому дослідження систем з надлишковістю, у тому числі й часової, повинна базуватися на загальних принципах, єдиній класифікації, загальних методиках аналізу й розрахунку показників ФС будь-яких резервованих систем.

Поряд із зазначеними вище перевагами, часове резервування в умовах впливу різних дестабілізуючих факторів (відмов, збоїв, перешкод і т.п.), володіє й рядом недоліків. Поліпшення ФС ІС приводить до погіршенням інших показників якості ІС, а саме, ускладнення та введення нових алгоритмів, зменшення точності та продуктивності, введення додаткових засобів контролю та пошуку несправностей.

Таким чином, кожний з розглянутих видів резервування окремо має певні переваги й недоліки. Це необхідно врахувати при проведені аналізу, обґрунтуванні та виборі методів підвищення ФС. Разом з тим, проведений аналіз довів [49, 66], що комплексне застосування надлишковості може суттєво підвищити ФС ІС. Такий

підхід ґрунтується на наступному:

у інформаційних системах впроваджені різні типи надлишковості, при проведені проектування. Вони володіють не тільки окремими, але й загальними властивостями. Тому при вивченні впливу надлишковості на забезпечення заданого рівня ФС ІС повинно проводитися комплексно;

як правило наявність деякого виду надлишковості може бути причиною, яка обумовлює наявність інших типів надлишковості;

комплексне застосування різних типів надлишковості обумовлює можливість суттєво компенсувати недоліки, які властиві окремим типам, і підсилити їх вклад у ФС; при цьому виграш не є мультиплікативною функцією виграшів, що досягаються в системі з одним видом надлишковості, а істотно більше.

Наявність надлишковості, яка використовується для забезпечення ФС ІС, вимагає уточнення таких понять, як відмова, працездатність і непрацездатність. Це відноситься, у першу чергу, до систем з часовим резервуванням. У таких системах порушення працездатності (відмова) об’єкта ще не означає відмови системи з резервом часу, якщо відновлення працездатності об’єкта (іноді й повторення частини або всього попереднього напрацювання) закінчується до моменту витрачання резервного часу.

Система з часовим резервуванням може бути представлена у вигляді умовної схеми, яка представляється двома елементами: вихідного технічного об’єкта й резерву часу. Таке представлення приводить до відомої схеми структурного ненавантаженого дублювання заміщенням: за відмовою ІС починає працювати резерв часу. Тоді відмова системи буде фіксуватись у момент, коли буде витрачено резерву часу, якщо до цього моменту ІС не встигла відновитись. Кількісні дослідження показують, що ця аналогія не випадкова, а має глибокий внутрішній зміст, в основі якого лежить спільність властивостей різних видів резервування.

Відмовою ІС з часовим резервуванням варто вважати подію, що полягає в порушенні її працездатності, яка має неприпустимі наслідки. Така подія приводить до негайної або з деякою затримкою відмови ІС (зриву її функціонування або зриву виконання завдання) [43, 67]. Для встановлення ознак відмови системи з резервом

часу необхідно розглядати не тільки процес відмов і відновлення об’єкта, але і проводити аналіз того, до яких наслідків приводять ці відмови, тобто пов’язувати порушення працездатності об’єкта з процесом виконання ним своїх функцій. Такий підхід дозволяє говорити про безвідмовне функціонування або про зрив функціонування, що є більш загальним поняттям, ніж безвідмовність або відмова ІС.

На основі цього загального визначення, як і при структурному резервуванні, для кожного конкретного способу часового резервування необхідно формулювати критерій відмови системи. Зокрема, при використанні миттєво поповнюваного резерву часу відмова системи виникає в момент, коли час відновлення системи при черговому порушенні його працездатності перевершує резерв часу. При загальному не поповнюваному резерві часу відмова системи виникає в момент, коли сумарні втрати часу на відновлення працездатності об’єкта та усунення наслідків його відмови досягають значення виділеного резерву часу і т.д. [52, 67].

Варто зауважити, що в системах з часовою надлишковістю не завжди вдається чітко встановити ознаки відмови об’єкта й обґрунтувати припустимий (критичний) рівень втрат робочого часу, при досягненні якого істотно погіршується якість функціонування системи. Це приводить до об’єктивних труднощів при встановленні моменту зриву функціонування системи.

Систему з часовим резервуванням можна розглядати як своєрідний перетворювач потоку відмов: вхідним є потік відмов об’єкта, а вихідним – потік відмов системи. За рахунок дії резерву часу вихідний потік системи містить у середньому меншу кількість відмов за одиницю часу, ніж вхідний потік, – відбувається розрідження вихідного потоку відмов. Ефект розрідження проявляється тим сильніше, чим більше виділяється і використовується резервного часу.

З огляду на наведене вище визначення поняття відмови системи з часовим резервуванням, уточнимо поняття працездатності й непрацездатності такої системи.

Працездатність – стан системи з часовим резервуванням, при якому вона здатна виконувати необхідну функцію за певних умов експлуатації.

Непрацездатність – стан системи з часовим резервуванням, при якому вона не здатна виконувати необхідну функцію за певних умов експлуатації (у цей стан

система переходить після витрачання резерву часу до моменту відновлення об’єкта).

Істотним у цих визначеннях є те, що до працездатних станів системи з часовим резервуванням варто відносити й такі стани, коли об’єкт не працездатний, але відновлення його працездатності (іноді й повторення частини попередньої роботи) відбувається до витрачання, використовуваного в системі резерву часу. Надалі підмножини працездатних і непрацездатних станів розглянутих систем з часовим резервуванням будемо визначати при розв’язанні конкретних завдань.

Також буде розглянута сукупність розв’язання окремих завдань оцінки функціональної стійкості таких об’єктів, у яких використовується один вид надлишковості (системи з поповнюваним часовим і системи зі структурним резервуванням), а також об’єктів з комплексним використанням декількох видів надлишковості (системи з поповнюваним часовим, структурним і навантажувальним резервуванням

2.1.2 Загальний підхід до побудови математичної моделі інформаційних мереж. Процес функціонування ІС можна описати через систему взаємодіючих елементів з метою ідентифікації її структури і параметрів, коротко і довгострокового прогнозів процесів, що протікають в ній, оптимізації і вирішення завдань, які вона виконує [5, 89].

Системою називається об’єкт дослідження, який найточніше описується системою рівнянь, або множиною систем рівнянь. Для того, щоб система рівнянь була моделлю об’єкту, вона повинна мати рішення, тобто містити спільні рівняння, а матриця системи має бути обумовленою. Рівняння, які описують систему, можуть бути інтегральними, інтегро-диференційними або алгебраїчними, які необхідно замінити аналогами. Окремі рівняння системи відповідають її елементам (або компонентам). У описі логіко-динамічних систем присутні нерівності, умовні переходи і інші логічні співвідношення. Розмірність матриці системи рівнянь визначає границі області моделювання.

Зазвичай в процесі імітаційного моделювання складних об’єктів діалог людина-машина ведеться на мові конкретних апріорних вказівок, без надання

машині достатньої свободи вибору [13, 34]. Це перетворює її на деякий “великий арифмометр”, нездібний внести творчий вклад до процесу моделювання. Дійсно, завдання інтерполяції дослідних даних є некоректним, багатозначним. Для його однозначного вирішення потрібне залучення апріорної інформації – зовнішнього доповнення. При цьому обсяг такої інформації може бути різним: у звичайних імітаційних методах моделювання все засновано на дуже великому обсязі важко отримуваної апріорної інформації.

Самоорганізація направлена на як можна більше зменшення апріорної інформації, що вноситься до комп’ютерної моделі. Її мета – частково усунути участь людини в процесі моделювання (що до створення повної моделі інтелекту неможливе), зробити його необтяжливим і таким, що не викликає жодних проблем і, отже, що не вимагає залучення експертів. Це досягається в інформаційних ергатичних системах за допомогою переходу на загальнішу метамову діалогу людина-машина – мова постановки критеріїв загального вигляду. Від людини необхідно лише повідомити дані спостережень і вказати критерії загального вигляду, яким повинна задовольняти модель, в деяких випадках – брати участь у довизначенні моделі (тобто в процедурі остаточного її вибору).

При цьому, багато що ще можна зробити для зменшення ролі людини до такої міри, аби його участь в творчому процесі моделювання стала для нього зовсім необтяжливою. Принципово ця участь необхідна, але вона настільки невелика, що дійсно можна говорити про самоорганізацію моделі майже без участі людини.

Розробка математичного апарату для вирішення задач функціональної стійкості, тобто ймовірності безвідмовної роботи стає актуальною при розробці багаторівневих ІС.

Розробку математичної моделі функціонально стійкої ІС мережі почнемо з таких припущень. Будь яка мережа S призначена для реалізації функції $F(x_1, \dots, x_\delta)$, яка складається з N інтелектуальних блоків, які виконують різні за складністю функції. Інтелектуальні блоки складаються з компонентів, які рівноймовірностні, статично незалежні, і має місце розподілу часу між відмовами. Під час того, коли може виникнути відмова система переходить в стан зменшеного

ресурсу, або стан відмови.

Нехай n – кількість всіх можливих одиночних відмов у N інтелектуальних блоків системи S, що не приводять або призводять до відмови. Така мережа може перебувати в кінцевому числі станів (відповідно числу відмов) $E_0, E_1, \dots, E_l, \dots, E_r$ $(r \leq n)$, де через E_1 позначено стан, в якому у інтелектуальних блоках мережі є l відмов. Стан $E_0, E_1, \dots, E_l, \dots, E_{r-1}$ назвемо станами "життя", так як, перебуваючи в будь-якому з них, мережа S без помилок, обумовлених при навчанні (налаштування), реалізує задану функцію $F(x)$. Стан E_r будемо називати станом "загибелі", якщо стан мережі S реалізує функцію $F^*(x)$, значення якої виходить за встановлені при навчанні (налаштуванні) допустимі границі.

Позначаючи через $p_l(t)$ ймовірність знаходження ІС в стані E_i $(i = 0, 1, \dots, r)$, можна записати систему диференціальних рівнянь Колмогорова, вирішуючи яку неважко визначити $P(t)$ – ймовірність безпомилкової реалізації ІС необхідної функції $F(x)$ за час t, то є ймовірність безвідмовної роботи мережі. Використовуючи рішення такої системи диференціальних рівнянь, можна розрахувати для будь-якого t функціональну стійкість інформаційної мережі, тобто ймовірність достовірної реалізації заданої функції $F(x)$ мережею при наявності відмов l_{r-1} кратності l.

Такий математичний апарат використовується при умові, коли відомі характеристики всіх вихідних випадкових величин.

Прогнозування та моделювання все більш широко застосовується у світовій практиці управління та прийняття рішень майже у всіх сферах діяльності. У процесі вирішення проблем прогнозування та моделювання розроблено велику кількість засобів, процедур, методів, методик та способів. На їх основі створено множину прогнозуючих та моделюючих систем.

Характерним для багатьох досліджень, особливо в інформаційних мережах, є відсутність необхідного для самоорганізації обсягу вихідної інформації. Тому необхідно застосувати математичний апарат, який би враховував цю особливість і давав гарантовані оцінки показників якості.

2.2 Моделі управління передачі інформації в інформаційних мережах

Ефективний процес функціонування ІС в основному визначається часовими затримками при передачі інформації між її абонентами. Зменшення часу затримки інформації в ІС з однорідним трафіком повинно забезпечуватися на етапах її проектування на основі розроблених математичних моделей за допомогою теорії масового обслуговування для випадку однорідного потоку заявок [32, 40].

Проте для мультисервісних ІС характерним являється неоднорідність трафіку. Ця особливість обумовлена передачею в ІС пакетів багатьох видів (текстових пакетів, аудіопакетів і відеопакетів, мовних пакетів тощо). До їх передачі задаються різні вимоги [76]. Вони представляються у вигляді обмежень на допустимий рівень часу доставки. Дані обмеження можуть бути представлені двома типами:

1) в якості обмеження середнього часу затримки визначеною граничною величиною τ_i^*, де $\bar{\tau}_i < \tau_i^*$ $(i = \overline{1,n})$, n – кількість пакетів у мережі визначеного типу;

2) вірогідністні, у якості допустимої граничної величини вірогідності γ_i^* перевищення τ_i^* часом затримки τ_i пакетів визначеного типу, де $P(\tau_i > \tau_i^*) < \gamma_i^*$.

Зазначений ліміт може бути врахований завдяки застосування спеціальних методів управління трафіком. Розв’язання цієї задачі вимагає використання моделей з неоднорідним потоком заявок, що дозволяють аналізувати властивості пріоритетних систем передачі даних та сформулювати рекомендації для проектування пріоритетних мереж.

Коли мережеві пристрої здатні розрізняти різні типи трафіку доцільно використовувати пріоритизацію. Для того щоб відмітити пакетну пріоритетність застосовується байт “тип обслуговування” (Type of Service, ToS), який містить набір рівнів пріоритету [70]:

0 – звичайний;

1 – пріоритетний;

2 – негайний;

3 – терміновий;

4 – екстрений;

5 – CRITIC/ECP;

6 – міжмережне управління;

7 – мережне управління.

Поле пріоритету визначає важливість або пріоритет пакета, воно не впливає на маршрут, а впливає на різні аспекти переадресації пакетів.

Оцінимо ефективність пріоритетних методів, які застосовуються для управління в мультисервісних мережах трафіком. В якості базової моделі каналу передачі даних в [70] застосовано теорію систему масового обслуговування для якої характерним являється неоднорідний потік пакетів n різних типів. Вони можуть поступати у канал передачі даних з наступними інтенсивностями $\lambda_1, \dots, \lambda_n$.

Якщо припустити, що пакети одного класу будуть мати однакову довжину, їх потоки будуть простими, тоді затримка передачі пакета i-го типу в системах з використанням управління SDN буде наступною

$$\tau_i = \frac{\sum_{j=1}^{n} \lambda_j L_j^2}{\left(V - \sum_{j=1}^{i-1} \lambda_i L_i\right)\left(V - \sum_{j=1}^{i} \lambda_i L_i\right)} + \frac{L_i}{V}, \ (i = \overline{1,n}),$$

де L_i – тривалість пакету i-го типу, V – пропускна здатність системи передачі даних.

Удосконаленою математичною моделлю системи передачі даних є середній час затримки передачі пакетів:

$$T_з = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} \tau_{з\, i\, n_1} \cdot x_{i\, n_1}, \qquad (2.1)$$

де $\tau_{з\, i\, n_1}$ – час затримки успішно переданих пакетів, $x_{in_1} = \begin{cases} 1 \text{ при } \tau_з \le \tau_{з\,\max}, \\ 0 \text{ при } \tau_з > \tau_{з\,\max}, \end{cases}$

Ймовірність передачі пакетів

$$P_{\text{пер}} = \frac{n_1}{n},$$

де n – загальна кількість пакетів, n_1 – успішно передані пакети.

За результатами розрахунку часових затримок пакетів у каналі зв’язку можна сформулювати висновки:

надавши пріоритет коротким пакетам забезпечується мінімальна затримка всіх типів пакетів;

при збільшені навантаження каналу передачі даних для низькопріоритетних пакетів виникають неприпустимі затримки, які суттєво більші за обмеження в 150–

300 мс для мовних пакетів;

якщо збільшити пропускну спроможність каналу передачі даних в 1,5 рази (з 128 до 192 Кбіт/с) часова затримки для високопріоритетних пакетів буде суттєво зменшуватися, а саме більше чим у 2 рази, а для низькопріоритетних пакетів – більше чим на порядок.

Аналіз даних розрахунків, а також вимог мобільних операторів максимально допустимий час затримки пакетів буде складати для преміум послуг не більше 50 мс та для стандартних послуг не більше 150 мс. Для автомобільної мережі VANET пред'являються високі вимоги до затримок, які не повинні перевищувати 10 мс, для основних груп повідомлень від додатків, пов'язаних з безпекою дорожнього руху.

Для забезпечення ФС ІС в даних умовах пропонується використовувати програмно-конфігуровані мережі. Головна ідея SDN полягає у відокремленні функцій передачі трафіку від функцій управління (включаючи контроль як самого трафіку, так і пристроїв, що здійснюють його передачу) [22, 76, 93].

Використання SDN дозволяє ввести в процес передачі пакетів поняття резерву часу. Тобто, у випадку, коли пакет не передався, система може його перенаправити іншим шляхом до закінчення резерву часу. При цьому, якщо час доставки даного пакета не перевищить допустимого часу затримки, тоді буде рахуватися, що відмови каналу зв'язку не відбулося.

Істотний вплив на ефективність використання в інформаційних системах резервування, як одного з основних засобів забезпечення заданого рівня функціональної стійкості, надає повнота апріорної інформації про надійність її елементів та програмного забезпечення. Широке застосування в інформаційних системах знаходить часове резервування. Найбільш повне відображення питання дослідження відновлюваних таких систем з резервом часу отримали в роботі [74], однак в ній основна увага приділена прогнозуванню функціональної стійкості ІС з поповнюваним резервом часу при наявності повної апріорної інформації.

На стадії проектування і конструювання ІС показники ФС трактують як характеристики імовірнісних математичних моделей об'єктів. На стадії

експериментального відпрацювання, випробувань і експлуатації роль показників ФС виконують статистичні оцінки відповідних імовірнісних характеристик. При оцінці показників ФС часто відсутні необхідні вихідні дані для апріорних імовірнісних розрахунків, а статистична оцінка ускладнена невеликим обсягом випробувань, за якими можна визначити тільки оцінки моментів випадкових величин, що визначають процес функціонування (математичні очікування і дисперсії напрацювання на відмову, час відновлення, резервний часу тощо). Проте, у цій ситуації необхідно обґрунтовувати деякі характеристики системи (наприклад резерв часу, гарантовані точні границі ймовірності безвідмовної роботи системи тощо). Під “обґрунтуванням” при цьому розуміється побудова точних верхніх і нижніх границь зміни функціоналів, які характеризують ФС, в умовах неповної апріорної інформації про функції розподілу визначальних випадкових величин.

Таким чином, запропонована модель системи передачі даних ІС дозволяє визначити максимальний час затримки каналу та оцінити ефективність, що досягається за рахунок використання пріоритетного управління трафіком.

Проте, обґрунтувати ймовірнісні характеристики мережі в умовах, коли можна визначити тільки оцінки моментів визначальних випадкових величин процесу функціонування неможливо. Тому необхідно розробити математичні моделі, які це враховують.

2.3 Математичне моделювання мережі передачі інформації інформаційних систем

2.3.1 Загальний підхід до моделювання мережі передачі інформації.

У роботах [34, 41, 45, 52, 63] досліджені можливості підвищення ФС відновлюваних систем з резервом часу при різних методах його введення і використання. Отримано сукупність розрахункових співвідношень для оцінки показників ФС при різних способах використання і поповнення резерву часу при наявності повної апріорної інформації про функції розподілу визначальних випадкових величин. У точні і наближені формули для основних показників ФС

(ймовірності безвідмовної роботи $P(x,\tau_д)$, напрацювання ІС на відмову $\bar{T}_н(\tau_д)$, середнього часу відновлення $\bar{T}_в(\tau_д)$, коефіцієнта готовності $K_г(\tau_д)$ та інших) у залежності від величини резерву часу $\tau_д$, що поповнюється, входять функціонали, які виражаються через інтеграли Стільтьеса або відношення двох таких інтегралів, що залежать від багатьох параметрів системи [74].

Так, наприклад, до багатьох формул входить ймовірність того, що відмова об'єкта перейде в відмову ІС з резервом часу, яка для систем з поповнюваним резервом часу визначається інтегралом

$$q = P\{\tau_д < t_в\} = \int_0^\infty D(x)dF_в(x), \tag{2.2}$$

де $F_в(x) = P\{\tau_д < t_в\}$ – функція розподілу часу відновлення $t_в$; $D(x) = P\{\tau_д < x\}$ – функція розподілу використовуваного в ІС резерву часу $\tau_д$, що поповнюється. В окремому випадку при $t_д = const$ маємо

$$q = P\{\tau_д < t_в\} = 1 - F_в(t_д). \tag{2.3}$$

Під час розподілу $\tau_д$ за експоненціальним законом з параметром γ або за законом Ерланга 2-го порядку з параметром $\nu = 2/t_д$ [74] ймовірність q визначається виразами

$$q = \int_0^\infty [1 - e^{-\gamma x}]dF_в(x) \tag{2.4}$$

або

$$q = \int_0^\infty [1 - (1 + \nu x)e^{-\nu x}]dF_в(x). \tag{2.5}$$

Імовірність безвідмовної роботи ІС з резервом часу виражається формулами:

$$P(x,\tau_д) = e^{-\lambda q x},\ x \gg \bar{\tau}_д; \tag{2.6}$$

$$P(x,t_д) = \begin{cases} 1, x \le t_д, \\ \exp[-\lambda(x - t_д)(1 - F_в(t_д))], x > t_д, \end{cases} \tag{2.7}$$

де $\lambda = 1/\bar{t}_н$ – параметр експоненціального закону розподілу $F(x) = P\{t_н < x\}$ напрацювання об'єкта між сусідніми відмовами (що збігається з функцією розподілу напрацювання t_0 до першої відмови).

Середнє напрацювання системи з резервом часу на відмову визначається виразом:

$$\bar{T}_{\text{н}}(\tau_{\text{д}}) = \frac{1}{q}\left[\bar{t}_{\text{н}} + M_{\min}(t_{\text{в}}, \tau_{\text{д}})\right], \tag{2.8}$$

де

$$M_{\min}(t_{\text{в}}, \tau_{\text{д}}) = \int_0^{\infty}[1 - F_{\text{в}}(x)][1 - D(x)]dx. \tag{2.9}$$

При $t_{\text{д}} = const$ вираз для $M_{\min}(t_{\text{в}}, \tau_{\text{д}})$ буде мати вигляд:

$$M_{\min}(t_{\text{в}}, \tau_{\text{д}}) = \int_0^{t_{\text{д}}}[1 - F_{\text{в}}(x)]dx. \tag{2.10}$$

Середній час відновлення ІС з резервом часу $\bar{T}_{\text{в}}(\tau_{\text{д}})$ дорівнює перевищенню часу ремонту об'єкта над резервом часу за умови, що $t_{\text{в}} > \tau_{\text{д}}$, і визначається виразом

$$\bar{T}_{\text{в1}}(t_{\text{д}}) = \frac{\bar{t}_{\text{в}} - M_{\min}(t_{\text{в}}, \tau_{\text{д}})}{1 - F_{\text{в}}(t_{\text{д}})} = \frac{\int_{t_{\text{д}}}^{\infty}[1 - F_{\text{в}}(x)]dx}{1 - F_{\text{в}}(t_{\text{д}})}, \tag{2.11}$$

де $\bar{t}_{\text{в}} = \int_0^{\infty}[1 - F_{\text{в}}(x)]dx$ – середній час відновлення об'єкта, а $M_{\min}(t_{\text{в}}, \tau_{\text{д}})$ визначається виразом (2.10). У загальному випадку, коли $\tau_{\text{д}}$ – випадкова величина з довільною функцією розподілу $D(x)$, формула для середнього часу відновлення має вигляд

$$\bar{T}_{\text{в1}}(\tau_{\text{д}}) = \frac{1}{q}\left[\bar{t}_{\text{в}} - M_{\min}(t_{\text{в}}, \tau_{\text{д}})\right]. \tag{2.12}$$

Коефіцієнт готовності системи з резервом часу визначається виразом

$$K_{\text{г1}}(\tau_{\text{д}}) = \frac{\bar{t}_{\text{н}} + M_{\min}(t_{\text{в}}, \tau_{\text{д}})}{\bar{t}_{\text{н}} + \bar{t}_{\text{в}}} = k_{\text{г}} + (1 - k_{\text{г}})(1 - q), \tag{2.13}$$

де $k_{\text{г}} = \bar{t}_{\text{н}}/(\bar{t}_{\text{н}} + t_{\text{в}})$ – коефіцієнт готовності об'єкта, а $1 - q = P\{t_{\text{в}} \le \tau_{\text{д}}\} = M_{\min}(t_{\text{в}}, t_{\text{д}})/\bar{t}_{\text{в}}$.

Наведені вище результати відповідають випадку, коли час відновлення $t_{\text{в}} < \tau_{\text{д}}$ входить до корисного часу роботи інформаційної системи. Якщо ж відрізки часу $t_{\text{в}} < \tau_{\text{д}}$ не належать до корисного часу, тобто до тривалості відновлення ІС з резервом часу входить весь тривалий інтервал ремонту $t_{\text{в}} > \tau_{\text{д}}$, то вирази для основних показників ФС ІС з резервом часу, що виконують завдання тривалості $t_{\text{з}}$ при умові безвідмовної роботи об'єкта, приймають вигляд [74]

$$P(t_{\text{з}}, \tau_{\text{д}}) = \exp(-\lambda q t_{\text{з}}), \tag{2.14}$$

де ймовірність q визначається співвідношенням (2.2), якщо $\tau_{\text{д}}$ – випадкова

величина або (2.3), якщо $t_д = const$;

середній наробіток ІС до зриву функціонування

$$\bar{T}_{ср}(\tau_д) = \frac{\bar{t}_н}{q}; \quad (2.15)$$

середній час відновлення ІС

$$\bar{T}_{вг}(t_д) = \bar{T}_{в1}(t_д) + t_д = \int_{t_д}^{\infty} x dF_в(x) / (1 - F_в(t_д)); \quad (2.16)$$

коефіцієнт готовності

$$K_{г2}(t_д) = \frac{\bar{t}_н + \int_0^{t_д} x dF_в(x)}{\bar{t}_н + \bar{t}_в}. \quad (2.17)$$

При оцінці показників ФС ІС з резервом часу при випадковому режимі використання об'єктів, коли разом з поповнюваним резервом часу $\tau_д$, передбаченим у самій системі, використовується резерв часу z_* з функцією розподілу $A(x) = P\{z_* < x\}$, обумовлений характером надходження завдань, ймовірність q визначається формулою

$$q = P\{z_* + \tau_д < t_в\} = \int_0^{\infty} S(x) dF_в(x), \quad (2.18)$$

де $S(x)$ – згортка двох функцій розподілу $A^*(x)$ та $D(x)$, а саме

$$S(x) = P\{z_* + \tau_д < x\} = \int_0^x D(x-t) dA^*(t) = \int_0^x A^*(x-t) dD(t). \quad (2.19)$$

Для функції розподілу часу z_* від моменту відмови об'єкта до моменту надходження завдання справедливі формули: $A^*(x) = P\{z_* < x\} = \frac{1}{\bar{z}} \int_0^x [1 - A(t)] dt$, $\bar{z} = \int_0^{\infty} [1 - A(x)] dx$.

Таким чином, до основних показників ФС ІС з резервом часу входять функціонали наступних трьох видів:

перший вид:

$$I(F) = \int_0^{\infty} g(x,t) dF(x), \quad (2.20)$$

де $g(x,t)$ – задана функція, що залежить від вектора дійсних параметрів; $F(x)$ – змінна функція розподілу;

другий вид:

$$I(F) = \frac{\int_0^{\infty} g_1(x,t) dF(x)}{\int_0^{\infty} g_2(x,t) dF(x)}; \quad (2.21)$$

третій вид:

$$R(F_1, F_2) = \int_0^{\infty} F_2(x) dF_1(x), \qquad (2.22)$$

де $F_1(x)$ і $F_2(x)$ – функції розподілу різних випадкових величин.

При наявності обмеженої інформації про змінні функції розподілу, коли відомі тільки початкові моменти цих розподілів, а їх вид передбачається довільним, виникає задача знаходження глобальних екстремумів зазначених функціоналів при лінійних обмеженнях. Слід зазначити, що задача знаходження точних границь для дробово-лінійних функціоналів (2.21) при деяких умовах може бути зведена до пошуку глобального екстремуму лінійного функціоналу (2.20) [74, 81, 87, 88]. Тому далі більш детально будуть досліджені лінійні функціонали (2.20) і (2.22).

У практичних задачах нерідко необхідно мати аналітичний розв'язок задачі в залежності від параметрів. Чисельна оптимізація навіть при трьох-чотирьох параметрах вимагає великих витрат машинного часу, а при п'яти параметрах, що змінюються на всій позитивній півосі, вона стає практично неможливою. У задачах оцінки показників ФС, як правило, мають справу з функціями розподілу, зосередженими на інтервалі $(0, \infty)$. Алгоритм чисельно-аналітичного методу передбачає, що функція розподілу зосереджена на кінцевому інтервалі $(0, Q)$. У зв'язку з цим, у ряді випадків (навіть при досить великому інтервалі $(0, Q)$) для напівнескінченного проміжку отримуються погані наближення. Це відбувається тоді, коли основний вклад в інфімум або супремум функціоналу $I(F)$ визначається значенням підінтегральної функції $g(x, t)$ у точці x, що не належить будь-якому кінцевому інтервалу $(0, Q)$, наприклад, при $x \to \infty$.

Таким чином, задача побудови двосторонніх оцінок показників функціональної стійкості ІС з поповнюваним резервом часу при наявності інформації тільки про початкові моменти функції розподілу визначальних випадкових величин зводиться до аналітичного знаходження глобальних екстремумів функціоналів виду (2.20), (2.22) при лінійних обмеженнях.

2.3.2 Оцінка показників функціональної стійкості інформаційної мережі. При аналізі та прогнозуванні функціональної стійкості ІС в умовах

наявності обмеженої апріорної інформації при формалізації задачі вдається подати показники ФС у вигляді інтегралів ймовірностей. У цьому випадку стає можливим залучити для знаходження верхніх і нижніх оцінок цих показників методи теорії моментів, пов'язані з розв'язанням екстремальних задач. Необхідно отримати двосторонні оцінки показників ФС ІС з резервом часу різних класів.

При отриманні конкретних оцінок буде використовуватися мінімальна апріорна інформація, що відповідає великій кількості реальних ситуацій при оцінці ФС інформаційних систем з часовим резервуванням на етапах проектування, випробувань і експлуатації.

Отримані оцінки будуть використані в подальшому при побудові верхніх і нижніх границь показників ФС ІС з різними видами резерву часу.

2.3.2.1 Постійний резерв часу. 1. Передбачений резерв часу. Якщо в системі $t_д = const$, тоді до виразу ймовірності того, що відмова об'єкта призведе до відмови ІС входить величина $F_в(t_д)$. Сформулюємо задачу наступним чином:

знайти верхню і нижню границі зміни функціоналу

$$I(F) = F(T) = \int_0^T dF(x) = \int_0^\infty g(x,T)dF(x), \qquad (2.23)$$

де $g(x,T) = \begin{cases} 1 \text{ при } 0 \le x < T, \\ 0 \text{ при } x \ge T. \end{cases}$

Визначимо верхні і нижні оцінки цього функціоналу в різних областях зміни параметра T.

Східчаста функція розподілу $F(x)$ з точками росту x_1, x_2, x_3 є граничною, якщо багаточлен $U_0(x) = u_1 + u_2x + u_3x^2$ задовольняє умові $U_0(x) \le g(x,T)$ для всіх $x \ge 0$ при пошуку мінімального значення інтеграла (2.23) (або умові $U_0(x) \ge g(x,T)$) при пошуку максимального значення цього інтеграла). Коефіцієнти цього багаточлена u_i, $i = \overline{1,3}$ визначаються з рівностей $g(x_i,T) = U_0(x_i)$, $i = \overline{1,3}$.

Так, наприклад, в області $0 < T < S_1$ гранична функція розподілу $F_0(x)$ має точки росту $x_1 = T$, $x_2 = \frac{S_2 - S_1T}{S_1 - T}$, граничний багаточлен $U_0(x) = 0$, а мінімальне значення інтеграла $\inf\limits_{F \in K_2} I(F) = 0$. При $S_1 \le T < S_2/S_1$ гранична функція розподілу

має точки росту $x_1 = 0$, $x_2 = T$ і $x_3 = n$ при $n \to \infty$. Відтак, рівняння граничного багаточлена $U_0(x)$ буде мати вигляд $U_0(x) = 1 - x/T$. Мінімальне значення інтеграла (2.23) буде дорівнювати $\inf\limits_{F \in K_2} I(F) = (T - S_1)/T$. Аналогічно доводяться інші результати, наведені в таблицях 2.1 та 2.2.

Таблиця 2.1 – Мінімальне значення інтеграла $I(F)$

Зміна параметра	$\inf\limits_{F \in K_2} I(F)$	Точки росту граничних функцій розподілу $F_0(x)$	Граничні багаточлени $U_0(x)$
$0 < T < S_1$	0	$x_1 = T,$ $x_2 = n, n \to \infty$	0
$S_1 \le T < \dfrac{S_2}{S_1}$	$\dfrac{T - S_1}{T}$	$x_1 = 0,$ $x_2 = T$	$1 - \dfrac{x}{T}$
$T \ge \dfrac{S_2}{S_1}$	$\dfrac{(T - S_1)^2}{S_2 - 2TS_1 + T^2}$	$x_1 = \dfrac{S_1 - S_2}{T - S_1}$ $x_2 = T$	$1 - \dfrac{(x - x_1)^2}{(T - x_1)^2}$

Таблиця 2.2 – Максимальне значення інтеграла $I(F)$

Зміна параметра	$\sup\limits_{F \in K_2} I(F)$	Точки росту граничних функцій розподілу $F_0(x)$	Граничні багаточлени $U_0(x)$
$0 < T < S_1$	$\dfrac{S_2 - S_1^2}{S_2 - 2TS_1 + T^2}$	$x_1 = T,$ $x_2 = \dfrac{S_2 - S_1 T}{S_1 - T}$	$\dfrac{(x - x_2)^2}{(T - x_2)^2}$
$S_1 \le T < \dfrac{S_2}{S_1}$	1	$x_1 = 0,$ $x_2 = T$	1
$T \ge \dfrac{S_2}{S_1}$	1	$x_1 = \frac{S_1 T - S_2}{T - S_1},$ $x_2 = T$	1

Якщо відомо, що випадкова величина з функцією розподілу $F(x)$ не приймає значень, більших за Q, тобто $F(Q + 0) = 1$, тоді нижні оцінки функціонала $I(F)$ (2.23) в областях $0 < T < S_1$ і $T > S_2/S_1$ й верхні оцінки в областях $0 < T < S_1$ і

$T \geq S_2/S_1$ збігаються з наведеними в таблицях 2.1 та 2.2. При $S_1 < T \leq S_2/S_1$ найменше значення $\inf\limits_{F\in K_2} I(F) = (S_2 - S_1(T+Q) + TQ)/TQ$, а найбільше $\sup\limits_{F\in K_2} I(F) = 1 - (S_2 - S_1T)/Q(Q-T)$, оскільки точки росту граничних функцій розподілу $x_1 = 0,\ x_2 = T$ і $x_3 = Q$, а стрибки в тих $p_i,\ i = \overline{1,3}$ визначаються з моментних умов. Зокрема, $\sup\limits_{F\in K_2} I(F) = 1 - \frac{\int_0^Q V_3(x)dF(x)}{V_3(Q)} = 1 - \frac{\int_0^Q x(x-T)dF(x)}{Q(Q-T)} = \frac{S_2 - S_1T}{Q(Q-T)}$.

Якщо інформація про функцію розподілу $F(x)$ обмежена знанням тільки середнього значення $S_1 = \int_0^\infty [1 - F(x)]dx$, тоді двосторонні оцінки функціонала $I(F)$ матимуть вигляд $\inf\limits_{F\in K_1} I(F) = \begin{cases} 0 \text{ при } 0 < T \leq S_1, \\ \frac{T-S_1}{T} \text{ при } T > S_1, \end{cases}$ $\sup\limits_{F\in K_1} I(F) = 1$ при всіх можливих співвідношеннях S_1 і T.

Необхідність в отриманні наведених оцінок виникає при апріорних імовірнісних розрахунках ймовірності того, що відмова об'єкта призведе до відмови ІС при невипадковій (постійній) величині резерву часу $t_д = T = const$ і наявності інформації тільки про математичне сподівання або про середнє значення і дисперсії функції розподілу часу відновлення об'єкта.

2. Побудова двосторонніх оцінок функціоналу

$$I_1(F) = \int_0^T (x - T)dF(x) = \int_0^\infty g(x)dF(x), \tag{2.24}$$

де $g(x) = \begin{cases} x - T \text{ при } 0 < x \leq T, \\ 0 \text{ при } x > T. \end{cases}$

Використовуючи необхідні і достатні умови існування точної верхньої границі функціоналу $I_1(F)$, можна визначити, що

$$\sup_{F\in K_2} I_1(F) = \begin{cases} 0 \text{ при } T < S_1, \\ S_1 - T \text{ при } T \geq S_1, \end{cases} \tag{2.25}$$

оскільки в першому випадку граничний багаточлен $U_0(x) = 0$, а в другому $U(x) = x - T$, тобто $\sup\limits_{F\in K_2} \int_0^\infty xdF(x) - T = S_1 - T$.

При пошуку найменшого значення $I_1(F)$ визначимо функцію $L(0) = g'(0) +$

$g'\big(B(0)\big) + \frac{2[g(0)-g(B(0))]}{B(0)} = \frac{B(0)-2T}{B(0)}$, де $B(0) = \frac{S_2}{S_1}$. Функція $L(0) > 0$ при $T < \frac{1}{2}B(0)$, а $M\big(B(0)\big) < 0$, тобто в області $T < \frac{S_2}{2S_1}$ екстремальна функція розподілу F_0 має точки росту $x_1 = 0$, $x_2 = \frac{S_2}{S_1}$. Тоді $\inf\limits_{F\in K_2} I_1(F) = g(x_1)p_1 + g(x_2)p_2 = T\left(\frac{S_1^2}{S_2} - 1\right)$.

Тому при $T \geq \frac{S_2}{2S_1}$ найменше значення функціонала $I_1(F)$, що дорівнює $\frac{1}{2}\left[S - T - \sqrt{T^2 - 2TS_1 + S_2}\right]$ досягається на функції розподілу з точками росту $x_{1,2} = T \mp \sqrt{T^2 - 2TS_1 + S_2}$, тобто

$$\inf_{F\in K_2} I_1(F) = \begin{cases} T\left(\frac{S_1^2}{S_2} - 1\right) \text{ при } T < \frac{S_2}{2S_1}, \\ \frac{1}{2}\left[S_1 - T - \sqrt{T^2 - 2TS_1 + S_2}\right] \text{ при } T \geq \frac{S_2}{2S_1}. \end{cases} \quad (2.26)$$

Отже, отримані верхні і нижні оцінки $M_{\min}\big(t_в, t_д\big)$ (2.25) та (2.26) відповідно можуть бути використані при визначенні граничних значень показників ФС ІС з резервом часу, в які входить ця величина, при наявності інформації тільки про моменти розподілу випадкової величини часу відновлення.

3. Побудова двосторонніх оцінок функціоналу

$$I_2(F) = \frac{\int_0^T [1-F(x)]dx}{(1-F(T))} = \frac{\int_0^\infty g_1(x,T)dF(x)}{\int_0^\infty g_2(x,T)dF(x)} = \frac{I'(F)}{I''(F)},$$

де $g_1(x,T) = \begin{cases} x \text{ при } 0 \leq x < T, \\ T \text{ при } x \geq T, \end{cases}$ $g_2(x,T) = \begin{cases} 0 \text{ при } 0 \leq x < T, \\ 1 \text{ при } x \geq T. \end{cases}$

Функціонал $I_2(F)$ задовольняє умовам (2.21) і тому задача $I_2(F) \to \inf$, $F \in K_2$ зводиться до задачі $\gamma_c(F) \to \inf$, $F \in K_2$, де $\gamma_c(F) = I'(F) - cI''(F)$, $c = \inf I(F)$, $F \in K_2$, або в еквівалентному запису $\gamma_c(F) = \int_0^\infty [g_1(x,T) - c\,g_2(x,T)]dF(x) = \int_0^\infty g_3(x,T)dF(x)$, де $g_3(x,T) = \begin{cases} x, \text{якщо } 0 \leq x < T, \\ T - c, \text{якщо } x \geq T. \end{cases}$

Знайдемо екстремальні функції розподілу для задачі $\gamma_c(F) \to \inf$, $F \in K_2$. Вони будуть екстремальними і для задачі $I(F) \to \inf$, $F \in K_2$. Легко здогадатися, що якщо $T < S_1$, то в якості першої точки росту можна взяти $x_1 = T$, а другу і третю знаходимо за допомогою моментних умов $x_2 = \frac{S_2 - S_1 T}{S_1 - T} - \delta$, $x_3 = \frac{S_2 - S_1 T}{S_1 - T} + \delta$, $\delta \to 0$. Відповідний граничний багаточлен дорівнює 0, а $\inf\limits_{F\in K_2} I(F) = T$. Так само легко

знаходяться й інші екстремальні значення функціоналу $I(F)$, які наведені в таблицях 2.3 і 2.4.

Таблиця 2.3 – Мінімальне значення інтеграла $I(F)$

Зміна параметра	$\inf\limits_{F\in K_2} I(F)$	Точки росту граничної функції розподілу $F_0(x)$
$0 \le T < S_1$	T	$x_1 = T,$ $x_2 = \dfrac{S_2 - S_1 T}{S_1 - T}$
$S_1 \le T < \dfrac{S_2}{S_1}$	T	$x_1 = 0,$ $x_2 = T$
$T \ge \dfrac{S_2}{S_1}$	$\dfrac{S_1(T^2 - 2TS_1 + S_2)}{S_2 - S_1^2}$	$x_1 = \frac{S_1 T - S_2}{T - S_1},$ $x_2 = T$

Таблиця 2.4 – Максимальне значення інтеграла $I(F)$

Зміна параметра	$\sup\limits_{F\in K_2} I(F)$	Точки росту граничної функції розподілу $F_0(x)$
$0 \le T < S_1$	$\dfrac{T(S_1 - T)^2}{S_2 - 2S_1 T + T^2}$	$x_1 = T,$ $x_2 = \dfrac{S_2 - S_1 T}{S_1 - T}$
$S_1 \le T < \dfrac{S_2}{S_1}$	∞	$x_1 = 0,$ $x_2 = T$
$T \ge \dfrac{S_2}{S_1}$	∞	$x_1 = \frac{S_1 T - S_2}{T - S_1},$ $x_2 = T$

Цікаво зазначити, що для розглянутого функціоналу так само, як і для функціоналу $I_3(F) = F(T)$ (табл. 2.1, 2.2) інфімум і супремум обчислюється за допомогою одних і тих самих граничних функцій розподілу.

4. Побудова двосторонніх оцінок функціоналу

$$I_3(F) = \frac{\int_T^Q x dFx}{(1 - F(T))}.$$

Припустимо, що час відновлення не обмежується ($Q = \infty$) або не може приймати значень, більших Q, тобто $F(Q + 0) = 1$. Тоді, проводячи аналогічні розмірковування для функціоналу $I_3(F)$, можна отримати двосторонні оцінки його зміни в залежності від параметрів за умови, що $F(x) \in K_2$. Ці результати наведені в таблицях 2.5 і 2.6.

Таблиця 2.5 – Максимальне значення інтеграла $I_3(F)$

Область зміни параметрів	$0 < T < S_1$	$T > S_1$	
		$Q = \infty$	$Q < \infty$
Точки росту граничних функцій розподілу $F_0(x)$	$x_1 = T$ $x_2 = \dfrac{S_2 - S_1 T}{S_1 - T}$	$x_1 = S_1$ $x_2 = n, n \to \infty$	$x_1 = \dfrac{S_1 T - S_2}{T - S_1}$ $x_2 = Q$
$\sup\limits_{F \in K_2} I_3(F)$	$\dfrac{S_2 - S_1 T}{S_1 - T}$	∞	Q

Для скорочення позначень введемо функцію $B(x)$: $B(x) = \frac{S_2 - S_1 x}{S_1 - x}$, $x \in \{[0, S_1\,] \cup [B(0), Q]\}$.

Таблиця 2.6 – Мінімальне значення інтеграла $I_3(F)$

Область зміни параметрів	$0 \le T < S_1$	$Q = \infty$		$Q < \infty$	
		$S_1 < T < \dfrac{S_2}{S_1}$	$T > \dfrac{S_2}{S_1}$	$S_1 < T < \dfrac{S_2}{S_1}$	$T > \dfrac{S_2}{S_1}$
Точки росту граничних функцій розподілу $F_0(x)$	$x_1 = T$ $x_2 = B(T)$	$x_1 = 0$ $x_2 = T$	$x_1 = B(T)$ $x_2 = T$	$x_1 = 0$ $x_2 = T$ $x_3 = Q$	$x_1 = B(T)$ $x_2 = T$
$\inf\limits_{F \in K_2} I_3(F)$	S_1	T	T	$\dfrac{S_1 + Q}{(Q + T)S_1 - S_2}$	$> T$

Так, наприклад, в області $S_1 \le T < S_2/S_1$ при $Q < \infty$ $\inf\limits_{F \in K_2} I_3(F) = (Tp_2 + Qp_3)/(p_1 + p_2)$, де p_i, $i = \overline{1,3}$ – стрибки східчастої функції розподілу $F_0(x)$

в точках x_i, $i = \overline{1,3}$, які визначаються згідно з $p_j(x) = \int_0^Q V_j(x)dF(x)/V_j(x_j)$, $j = \overline{1,3}$, так: $p_2 = (S_2 - S_1Q)/T(T-Q)$, $p_3 = (S_2 - S_1T)/Q(Q-T)$, $\sum_{i=1}^3 p_i = 1$. Тобто $\inf\limits_{F\in K_2} I_3(F) = (S_1+Q)/[(Q+T)S_1 - S_2]$ при $S_1 \le T < \frac{S_2}{S_1}$ і $Q < \infty$.

Таким чином, отримані двосторонні оцінки зміни функціоналів, які належать виразам ймовірності перевищення часом відновлення виділеного ІС резерву часу, верхні і нижні границі зміни середнього значення мінімальної з двох величин – випадкової і невипадкової, а також визначені границі зміни дробово-лінійних функціоналів. Ці результати отримані в припущенні, що резерв часу – невипадкова постійна величина, а про функції розподілу випадкової величини часу відновлення відомі тільки моменти (математичне сподівання і дисперсія).

2.3.2.2 Резерв часу – випадкова величина з відомим законом розподілу. Нехай резервний час $\tau_д$ розподілено згідно із законом $D(x) = P\{\tau_д < x\} = 1 - (1+\nu x)e^{-\nu x}$, $\nu > 0$, а час відновлення $t_в$ має функцію розподілу $F(x)$. Вигляд цієї функції розподілу невідомий, а відомо лише, що $F \in K_2$, де $K_2 = \{F: F(0-) = 0, F(\infty) = 1, \int_0^\infty x^i dF(x) = S_i, i = 1,2, 0 < S_1 < \infty, S_1^2 < S_2 < \infty^0\}$.

Ймовірність q (2.5) в цьому випадку визначається виразом

$$q = P\{\tau_д < t_в\} = \int_0^\infty [1 - (1+\nu x)e^{-\nu x}]dF(x) = I(F). \qquad (2.27)$$

Необхідно отримати точні верхні і нижні оцінки цієї ймовірності за умови $F(x) \in K_2$.

У нашому випадку (функціонал $I(F)$) функція $g(x) = 1-(1+\nu x)e^{-\nu x}$, $g'(x) = \nu^2 x e^{-\nu x}$, $g''(x) = \nu^2 e^{-\nu x}(1-\nu x)$, $g'''(x) = -\nu^3 e^{-\nu x}(2-\nu x)$.

Знайдемо спочатку розбиття області параметрів для задачі $I(F) \to inf$, $F \in K_2$ і доведемо його екстремальність.

Обчислимо $L(0) = g'(0) + g'(B(0)) + \frac{2[g(0)-g(B(0))]}{B(0)} = -\frac{2}{B(0)}\left[1 - e^{-\nu B(0)}\left(1 + \nu B(0) + \frac{\nu^2 B^2(0)}{2}\right)\right] < 0$ при всіх допустимих значеннях параметрів задачі ($\nu > 0$, $0 < S_1 < \infty$, $S_1^2 < S_2 < \infty$). Визначимо знак $L(S_1)$: $L(S_1) = g'(S_1) =$

$e^{-\nu S_1}\nu^2 S_1 > 0$ також у всій області параметрів.

Таким чином, функція $L(x)$ змінює знак з "–" на "+" в інтервалі і функції розподілу F_2 може доставляти інфімум функціоналу $I(F)$ у всій області параметрів. Тому умови $L(0)<0$ і $L(S_1)>0$ й те, що функція $g'''(x)$ має тільки один нуль випливає, що вони є не тільки необхідними, але і достатніми для екстремальності функції розподілу F_2. Отже, $\inf\limits_{F\in K_2} I(F) = I(F_2)$ у всій області параметрів (точки росту $F_2 : x_1^0$ і $B(x_1^0)$).

Тепер знайдемо розбиття області параметрів для задачі $I(F)\to\sup$, $F\in K_2$ і доведемо його екстремальність. З розв'язку задачі про інфімум $I(F)$ відомо, що $L(S_1)>0$ для всіх значень параметрів. Тому необхідно перевірити умову $M(S_1)<0$. Знаходимо $M(x) = e^{-\nu x}(1+\nu x+\nu^2 x^2)-1 = \Psi(x)-1$. Функція $\Psi(x)$ має такі властивості: $\Psi(0)=1$, $\Psi'(x) = \nu x e^{-\nu x}(1-\nu x)$, $\Psi''(x) = e^{-\nu x}(\nu^2 x^2 - 3\nu x + 1)$. Вона має єдиний максимум у точці $x = 1/\nu$, що дорівнює $\Psi(1/\nu) = 3/e \approx 1{,}1$, а $\Psi(2/\nu) \approx 0{,}95$. Відтак, $M(x)$ має єдиний корінь $x = y_2^0$, $1/\nu < y_2^0 < 2/\nu$, причому $M(x)>0$ при $x < y_2^0$ і $M(x)<0$ при $x > y_2^0$ (тобто змінює знак з ""+" на "–"). Звідси випливає, що $M(S_1)<0$ при $S_1 > y_2^0$ і $M(S_1)>0$ при $S_1 < y_2^0$.

В області $L(S_1)>0$, $M(S_1)<0 \leftrightarrow y_2^0 < S_1$ екстремальною може бути функція розподілу F_3 з однією точкою росту S_1.

В області

$$\begin{cases} M(S_1) > 0 \leftrightarrow S_1 < y_2^0, \\ M(B(0)) < 0 \leftrightarrow S_1 < y_2^0 < B(0) \end{cases}$$

екстремальною може бути функція розподілу F_4 з точками росту $0, y_2^0$.

В області

$$\begin{cases} L(0) < 0, \\ M(B(0)) > 0, \end{cases}$$

екстремальною може бути функція розподілу F_1 з точками росту $0, B(0)$.

Отримано розбиття області параметрів. Доведемо його екстремальність. Підобласть $y_2^0 < S_1 \leftrightarrow M(S_1) < 0 \leftrightarrow g(0) < U_3(0, F_3)$, тобто $\varphi_3(0) > 0$. Далі, $\varphi_3''(x) = -g''(x) = -\nu^2 e^{-\nu x}(1-\nu x)$ і має єдину точку перегину $x = 1/\nu$, в якій знак змінюється з "–" на "+". Для всіх $x \geq 1/\nu$ з $\varphi_3''(x) > 0$, $1/\nu < y_2^0 < S_1$, $\varphi_3(S_1) = \varphi_3'(S_1) = 0$ випливає $\varphi_3(x) \geq 0$, $x \geq 1/\nu$, зокрема, $\varphi_3(1/\nu) > 0$. Для $0 < x < 1/\nu$ з $\varphi_3''(x) < 0$, $\varphi_3(0) > 0$, $\varphi_3(1/\nu) > 0$ випливає $\varphi_3(x) \geq 0$. Таким чином функція розподілу з одиничним стрибком в точці S_1 доставляє супремум функціоналу $I(F)$ в області $y_2^0 < S_1$.

Для підобласті $S_1 < y_2^0 < B(0)$ маємо: $\varphi_4''(x) = -g''(x)$, $\varphi_4'' < 0$ для $0 < x < 1/\nu$ і $\varphi_4''(x) > 0$ для $x > 1/\nu$. При $x > 1/\nu$ з $\varphi_4'' > 0$, $y_2^0 > 1/\nu$, $\varphi_4(y_2^0) = \varphi_4'(y_2^0) = 0$ випливає $\varphi_4(x) > 0$, зокрема $\varphi_4(1/\nu) > 0$. При $x \in [0, 1/\nu]$ з $\varphi_4'' < 0$, $\varphi(0) = 0$, $\varphi_4(1/\nu)$ випливає $\varphi_4(x) \geq 0$, тобто функція розподілу з точками росту $0, y_2^0$ доставляє супремум $I(F)$ в області $S_1 < y_2^0 < B(0)$.

Розглянемо підобласть $B(0) < y_2^0 \leftrightarrow M(B(0)) > 0 \leftrightarrow U_1''(x, F_1) > 0$. На відрізку $x \in [0, 2/\nu]$, що містить точку $B(0)$ $(B(0) < y_2^0 < 2/\nu)$, функція $\varphi_1''(x)$ має не більше одного кореня, тому що на $[0, 2/\nu]$ $\varphi_1'''(x) > 0$ і, відповідно, $\varphi_1''(x)$ монотонна. Тому на $[0, 2/\nu]$ $\varphi(x) \geq 0$.

Для $x > 2/\nu$ маємо $\varphi_1''(x) > 0$ (оскільки $g''(x) < 0$ і $U_1'' > 0$), відповідно, при $x > 2/\nu$ $\varphi_1''(x)$ коренів не має. Таким чином, на інтервалі $(0, \infty)$, що містить точку $B(0)$, функція $\varphi_1''(x)$ має не більше, ніж один корінь, тому $\varphi_1(x) \geq 0$ при $x \geq 0$. Тому функція розподілу з точками росту $0, B(0)$ доставляє супремум функціоналу $I(F)$ в області $B(0) < y_2^0$.

Таким чином, отримані верхня (табл. 2.8) і нижня (табл. 2.7) границі зміни ймовірності того, що відмова об'єкта призведе до відмови ІС з резервом часу при розподілі резервного часу за законом Ерланга 2-го порядку і відомих математичного сподівання і дисперсії часу відновлення.

Таблиця 2.7 – Нижня оцінка функціонала $\int_0^\infty [1-(1+\nu x)e^{-\nu x}]\,dF(x) \leftrightarrow \inf,\ F \in K_2$

Область зміни параметрів	Вся область параметрів
Точки росту функції розподілу F_0	$x_1^0,\ B(x_1^0)$

Таблиця 2.8 – Верхня оцінка функціонала $\int_0^\infty [1-(1+\nu x)e^{-\nu x}]\,dF(x) \to \sup, F \in K_2$

Область зміни параметрів	$0 < \nu < \frac{x_0}{B(0)}$	$\frac{x_0}{B(0)} < \nu < \frac{x_0}{S_1}$	$\frac{x_0}{S_1} < \nu$
Точки росту функції розподілу F_0	$0, B(0)$	$0, \frac{x_0}{\nu}$	S_1
$\sup\limits_{F\in K_2} I(F)$	$\left[1-(1+\nu B(0))e^{-\nu B(0)}\right]\cdot p_2$ $p_2 = \frac{s_1^2}{s_2}$	$\left[1-(1+y_0)e^{-y_0}\right]\cdot p_2$ $p_2 = \frac{s_1 \nu}{y_0}$	$1-(1+\nu s_1)e^{-\nu s_1}$

При розподілі резервного часу $\tau_д$ за експоненціальним законом з параметром γ функціонал $I(F)$ має вигляд

$$I(F) = \int_0^\infty [1-e^{-\gamma x}]\,dF(x).$$

Використовуючи аналогічні міркування, нескладно показати, що в цьому випадку мінімальне значення $\inf\limits_{F\in K_2} I(F) = \frac{S_1^2}{S_2} - \frac{1}{S_1^2 S_2} e^{-\gamma S_1 S_2}$, а максимальне $\sup\limits_{F\in K_2} I(F) = 1-\exp(-\gamma/S_1)$. Опис множини функції розподілу K_2 аналогічно до наведеного для попереднього випадку.

2.3.2.3 Резерв часу – випадкова величина з невідомим законом розподілу. Нехай невідомі види функції розподілу як часу відновлення, так і резерву часу. Тоді задача побудови двосторонніх оцінок імовірності того, що відмова об'єкта призведе до відмови ІС з резервом часу, зводиться до дослідження на екстремум інтеграла

$$I(F_1, F_2) = \int_0^\infty F_2(x)\, dF_1(x) \tag{2.28}$$

при умові, що функції розподілу $F_1(x)$ і $F_2(x)$ невідомі, а фіксовані тільки математичні очікування $S_1 = \int_0^\infty [1 - F_1(x)]\, dx$ і $m_1 = \int_0^\infty [1 - F_2(x)]\, dx$. Позначимо K_1 і K_2 – множини функції розподілу $F_1(x)$ і $F_2(x)$ відповідно, які задовольняють цим обмеженням. Тоді, можна знайти мінімальне значення ймовірності (2.28):

$$\inf_{\substack{F_i \in K_i \\ i=1,2}} \int_0^\infty F_2(x)\, dF_1(x) = \inf_{\substack{F_i \in K_i \\ i=1,2}} \int_0^\infty F_2(x)\, dF_1(x), \tag{2.29}$$

де E_i, $i = 1,2$ – множини односхідчастих і двосхідчастих функцій розподілу з класу K_i, $i = 1,2$. Так, класу E_1 належить одна односхідчаста функція розподілу з одиничним стрибком в точці S_1 і множина двосхідчастих функцій розподілу з двома точками росту x_1, x_2, що задовольняють нерівностям: $0 \le x_1 < S_1$, $S_1 < x_2 < \infty$ та зі стрибками в них $p_1 = \dfrac{x_2 - S_1}{x_2 - x_1}$, $p_2 = \dfrac{S_1 - x_1}{x_2 - x_1}$. Аналогічно описується весь клас E_2 (S_1 замінюється на m_1). Можна безпосередньо переконатися в тому, що найменше значення $I(F_1, F_2)$ при $F_i \in K_i$, $i = 1,2$ дорівнює нулю. Дійсно, при $m_1 > S_1$, воно досягається, наприклад, на односхідчастих функціях розподілу $F_1(x)$ і $F_2(x)$ з одиничними стрибками в точках S_1 і m_1 відповідно. При $m_1 < S_1$ значення $I(F_1, F_2)$ можна зробити як завгодно близьким до нуля, якщо обрати функцію розподілу $F_2(x)$ односхідчастою зі стрибком в точці m_1, а в якості функції розподілу $F_1(x)$ обрати функцію розподілу з точками росту $0, n$,

стрибками в них $\frac{n-S_1}{n}$ і $\frac{S_1}{n}$ відповідно та спрямувати $n \to \infty$.

Отже, якщо функції розподілу $F_1(x)$ і $F_2(x)$ невідомі, а відомо лише, що $F_1(x) \in K_1$, $F_2(x) \in K_2$, то $\inf I(F_1, F_2)$ дорівнює нулю навіть у випадку $m_1 < S_1$. Тобто, маючи в своєму розпорядженні інформацію лише про математичні очікуваннях випадкових величин m_1 і S_1, ми не можемо гарантувати ненульову ймовірність $I(F_1, F_2)$. Покажемо, що додаткова пропозиція про те, що функції розподілу $F_1(x)$ і $F_2(x)$ двічі диференційовані, не покращує цю оцінку. Дійсно, візьмемо в якості $F_1(x)$ функції розподілу зі щільністю

$$\alpha_{\varepsilon,n}(x) = \frac{n-S_1}{n}\varpi_\varepsilon(x-\varepsilon) + \frac{S_1}{n}\varpi_\varepsilon[x-(n-\frac{n-S_1}{S_1}\varepsilon)],$$

а в якості $F_2(x)$ – функції розподілу зі щільністю $\beta_{\varepsilon,n} = \varpi_\varepsilon(x-m_1)$, де

$$\varpi_\varepsilon = \begin{cases} A_\varepsilon \exp\left(-\frac{x^2}{\varepsilon^2 - x^2}\right), & x \in [-\varepsilon, +\varepsilon], \\ 0, & x \overline{\in} [-\varepsilon, +\varepsilon], \end{cases}$$

A_ε – номінована константа, що обирається, з умови $\int_{-\varepsilon}^{+\varepsilon} \varpi_\varepsilon(\tau)\, d\tau = 1$.

З огляду на симетрію щільності $\varpi_\varepsilon(x)$ відносно точки $x = 0$ неважко переконатися, що $\int_{-\infty}^{+\infty} x\varpi(x)\, dx = 0$. Беручи це до уваги, можна перевірити, що функції розподілу зі щільністю $\alpha_{\varepsilon,n}(x)$ і $\beta_{\varepsilon,n}(x)$ належать K_1 і K_2 відповідно і є нескінченно диференційованими. При цьому, якщо покласти $\varepsilon = 1/n$ і спрямувати $n \to \infty$, відповідний інтеграл $\int_0^\infty F_2(x)\, dF_1(x)$ буде наближатись до нуля.

Справедливе наступне твердження:

при $m_1 < S_1$

$$\inf_{\substack{F_1 \in K_1(Q) \\ F_2 \in K_2}} \int_0^\infty F_2(x)\, dF_1(x) = \min\left\{\frac{S_1 - m_1}{Q - m_1}, \frac{S_1 - m_1}{S_1}, \frac{(Q-m_1)S_1}{Q_2}\right\}, \qquad (2.30)$$

де $K_1(Q)$ – клас функції розподілу $F_1(x)$ з математичним очікуванням S_1 і $F_1(Q+0)=1$; K_2 – клас функції розподілу $F_2(x)$ з математичним очікуванням m_1.

Наведемо доказ цього твердження.

У силу (2.29) інфімум $\int_0^\infty F_2(x)\,dF_1(x)$ при мові $F_1(x)\in K_1(Q)$, $F_2(x)\in K_2$ буде обчислюватися на одно- або двосхідчастих функціях розподілу з класів E_1 і E_2. Тому ми можемо спочатку розв'язати задачу: знайти інфімум $\int_0^\infty F_2(x,x_1,x_2)\,dF_1(x)$ по $F_1(x)\in K_1(Q)$, де $F_2(x,x_2,x_3)$ – двопараметричне сімейство східчастих функцій розподілу з E_2 із точками росту x_1 та x_2 (параметри), що задовольняють нерівностям: $0\le x_1<m_1$, $m_1\le x_2<\infty$; а потім мінімізувати знайдений розв'язок по x_1 і x_2. Тоді в результаті першого кроку отримаємо інфімум ймовірності $I(F_1,F_2)$ в залежності від параметрів x_1, x_2, m_1, S_1, Q, а в результаті другої мінімізації (по x_1 і x_2) отриманий інфімум буде залежати тільки від m_1, S_1, Q. Тим самим будуть знайдені і відповідні функції розподілу $F_1(x)$ і $F_2(x)$ на яких цей інфімум обчислюється.

Результат розв'язання першої задачі представлений у таблиці 2.9. Звичайним способом знаходиться мінімум (по x_1 і x_2) кожного з чотирьох інфімумів у відповідних областях. Порівнюючи отримані мінімуми між собою, приходимо до результату (2.30). Причому, мінімум, що дорівнює $(S_1-m_1)/(Q-m_1)$, обчислюється на функції розподілу $F_2(x)$ з точкою росту $x_1=m_1$ і на функції розподілу $F_1(x)$ з точками росту: $y_1=m_1-\varepsilon$, $y_2=Q$, $\varepsilon\to 0$; мінімум, що дорівнює $(S_1-m_1)/S_1$ – на функції розподілу $F_2(x)$ з точками росту $x_1=0$, $x_2=S_1+\varepsilon$, $\varepsilon\to 0$ і на функції розподілу $F_1(x)$ з точкою росту $y_1=S_1$, мінімум, що дорівнює $(Q-m_1)\cdot S_1/Q^2$ – на функції розподілу $F_2(x)$ з точками росту $x_1=\varepsilon$, $x_2=Q+\varepsilon$, $\varepsilon\to 0$ і на функції розподілу $F_1(x)$ з точками росту $y_1=0$, $y_2=Q$.

Таблиця 2.9 – Задача $\int_0^{\infty} F_2(x, x_1, x_2)\, dF_1(x) \to \inf$, $F_1 \in K_1(Q)$, $F_2(x) \in K_2$, з областю параметрів: $Q > 0$, $0 < S_1 < Q$, $0 < m_1 < S_1$, $0 \le x_1 < m_1$, $m_1 \le x_2 < \infty$

№ з/п	Підобласті параметрів	Точки росту граничної функції розподілу	Інфімум
1.	$x_2 \ge Q$, $0 < x_1 < m_1$	$y_1 = x_1 - \varepsilon$, $y_2 = Q$	$\frac{x_2 - m_1}{x_2 - x_1} \cdot \frac{S_1 - x_1}{Q - x_1}$
2.	$S_1 \le x_2 < Q$, $\frac{(Q - x_1)(x_2 - m_1)}{(x_2 - x_1)^2} < 1$, $0 < x_1 \le m_1$	$y_1 = x_1 - \varepsilon$, $y_2 = x_2 - \varepsilon$	$\frac{x_2 - m_1}{x_2 - x_1} \cdot \frac{S_1 - x_1}{x_2 - x_1}$
3.	$m \le x_2 < S_1$, $\frac{(Q - x_1)(x_2 - m_1)}{(x_2 - x_1)^2} < 1$, $0 < x_1 \le m_1$	$y_1 = x_2 - \varepsilon$, $y_2 = Q$	$\frac{x_2 - m_1}{x_2 - x_1} \cdot \frac{Q - S_1}{Q - x_2} +$ $+ (S_1 - x_2)/(Q - x_2)$
4.	$m \le x_2 < Q$, $\frac{(Q - x_1)(x_2 - m)}{(x_2 - x_1)^2} > 1$, $0 < x_1 \le m_1$	$y_1 = x_1 - \varepsilon$, $y_2 = Q$	$\frac{S_1 - x_1}{Q - x_1}$

Розглянемо ще один практично важливий випадок наявності обмеженої інформації при побудові екстремальних значень функціоналу (2.28).

Нехай відомі перший і другий початкові моменти випадкової величини з функції розподілу $F_2(x)$ рівні відповідно $m_1 = \int_0^{\infty} x\, dF_2(x)$, $m_2 = \int_0^{\infty} x^2\, dF_2(x)$, причому $m_2 > m_1^2$. Тоді задача про (2.29) прийме вигляд

$$\inf_{\substack{F_1\in K_1(Q),\\ F_2\in K_2(m_1,m_2)}} \int_0^Q F_2(x)\,dF_1(x) = \inf_{\substack{F_1\in E_1(Q),\\ F_2\in E_2(m_1,m_2)}} \int_0^Q F_2(x)\,dF_1(x). \qquad (2.31)$$

Цей інфімум буде обчислюватися на одно-, дво- і трисхідчастій функції розподілу F_2 з класу E_2 й на одно- та двосхідчасті функції розподілу F_1 з класу E_1. У цьому випадку клас E_1 описується аналогічно (2.29), а класу E_2 додатково належить і множина трисхідчастої функції розподілу з точками росту x_1, x_2, x_3. Стрибки дорівнюють

$$p_1 = \frac{m_2 - m_1(x_2 + x_3) + x_2x_3}{(x_1 - x_2)(x_1 - x_3)},$$

$$p_2 = \frac{m_2 - m_1(x_1 + x_3) + x_1x_3}{(x_2 - x_1)(x_1 - x_3)},$$

$$p_3 = \frac{m_2 - m_1(x_1 + x_2) + x_1x_3}{(x_3 - x_1)(x_3 - x_2)}.$$

Результат розв'язання задачі знаходження $\inf \int_0^\infty F_2(x, x_1, x_2, x_3)\,dF_1(x)$, $F_1 \in K_1(Q)$, $F_2 \in K_2(m_1, m_2)$, де $F_2(x, x_1, x_2, x_3)$ – трипараметричного сімейства східчастих функції розподілу з множини E_2 з точками росту x_1, x_2, x_3 наведено в таблиці 2.10.

Отримані результати (табл. 2.9 і 2.10) дозволяють розбити область параметрів задачі на непересічні підобласті, кожній з яких відповідає свій екстремальний розподіл і, таким чином, знайти гарантовані оцінки ймовірності того, що відмова об'єкта призведе до відмови ІС з резервом часу при наявності обмеженої інформації про випадкові величини часу відновлення і резерву часу.

Таблиця 2.10 – Задача $\int_0^{\infty} F_2(x, x_1, x_2, x_3)\, dF_1(x) \to \inf$, $F_1(x) \in K_1(Q)$, $F_2(x) \in K_2(m_1, m_2)$ з областю параметрів $0 < Q < \infty$, $0 < S_1 < Q$, $0 < m_1 < S_1$, $0 < x_1 < m_1 < x_2 < B(x_1) < x_3 < Q$

№ з/п	Підобласті параметрів	Точки росту граничної функції розподілу	Інфімум
1.	$m_1 < S < x_2$, $\frac{Q - x_1}{x_2 - x_1} < \frac{1}{p_1}$, $\frac{x_2 - x_1}{x_3 - x_1} > \frac{p_1}{1 - p_3}$	$y_1 = x_1$, $y_2 = x_2$	$\frac{[m_2 - m_1(x_2 + x_3) + x_2 x_3] \cdot (x_1 - S)}{(x_1 - x_2)^2 \cdot (x_1 - x_3)}$
2.	$m_1 < S < x_2$, $\frac{x_2 - x_1}{x_3 - x_1} < \frac{p_1}{1 - p_3}$, $\frac{x_3 - x_1}{Q - x_1} > 1 - p_3$	$y_1 = x_1$, $y_2 = x_3$	$\frac{[x_3^2 + (x_1 + x_2)(m_1 - x_3) - m_2]}{(x_3 - x_1)^2 \cdot (x_3 - x_2)} \cdot (S - x_1)$
3.	$m_1 < S < x_2$, $\frac{Q - x_1}{x_2 - x_1} > \frac{1}{p_1}$, $\frac{x_3 - x_1}{Q - x_1} < 1 - p_3$	$y_1 = x_1$, $y_2 = Q$	$\frac{S - x_1}{Q - x_1}$
4.	$x_2 < S < x_3$, $\frac{x_2 - x_1}{x_3 - x_1} > \frac{p_1}{1 - p_3}$, $\frac{Q - x_2}{x_3 - x_2} < \frac{1 - p_1}{p_2}$	$y_1 = x_2$, $y_2 = Q$	$\{(Q - S)[m_2 - m_1(x_1 + x_3)x_1 x_3] - (x_2 - x_1)$ $(x_2 - x_3) + (Q - x_2)(x_2 - x_1)(x_2 - x_3)\} /$ $[(Q - x_2)(x_2 - x_1)(x_2 - x_3)]$
5.	$x_3 < S < Q$, $\frac{x_3 - x_1}{Q - x_1} > 1 - p_3$, $\frac{x_3 - x_2}{Q - x_2} > \frac{p_2}{1 - p_1}$	$y_1 = x_3$, $y_2 = Q$	$1 - \frac{Q - S}{Q - x_3} \cdot \frac{[m_2 - m_1(x_1 + x_2) + x_1 x_2]}{(x_3 - x_1)(x_3 - x_2)}$

2.4 Висновки до розділу 2

1. На підставі проведеного аналізу показано, що при роботі ІС відмови апаратної частини є причиною неможливості виконання поставлених завдань із заданою якістю. Сучасні системи працюють в умовах неповноти або нечіткості вихідної інформації про визначальні випадкові величини. Тому в ІС необхідно впровадити механізми, які повинні забезпечувати їх функціональну стійкість.

2. Для забезпечення функціональної стійкості ІС пропонується використовувати програмно-конфігуровані мережі. Головна ідея SDN полягає у відокремленні функцій передачі трафіку від функцій управління, що суттєво підвищується рівень безпеки функціонування ІС та дозволяє ввести в процес передачі пакетів поняття резерву часу. Розглянуто підхід до реалізації управління мережними потоками у програмно-конфігурованих мережах в умовах повної апріорної інформації про характеристики показників ФС.

3. Удосконалено математичну модель системи передачі даних, яка дозволяє визначити максимальний час затримки каналу та оцінити ефективність, що досягається за рахунок використання пріоритетного управління трафіком. Обґрунтовано вибір максимального часу затримки пакетів для різного типу трафіку для забезпечення заданих показників якості.

4. Виділені різні типи функціоналів для функції розподілу, через які виражаються основні показники ФС систем.

5. Знайдені функції розподілу, на яких досягається найбільше або найменше значення лінійного або дробово-лінійного функціоналів при моментних обмеженнях на функції розподілу. Вони ґрунтуються на виділенні граничних функцій розподілу, побудові відповідних граничних багаточленів і розв’язанні спеціальних нерівностей.

РОЗДІЛ 3 МЕТОДИКА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Метою цього розділу є побудова двосторонніх оцінок показників ФС систем з часовим резервуванням при відомих моментах розподілу вихідних випадкових величин, які визначають випадкові процеси, що досліджуються. При вирішенні цієї задачі використані наведені в розділі 2 граничні значення функціоналів, що характеризують ФС ІС, а також відомі рахункові співвідношення для основних показників ФС, які отримані при повній вихідній інформації, в які входять ці функціонали.

Отримані результати застосовані для оцінки ФС в умовах обмеженої вихідної інформації систем безперервного використання, а також систем епізодичного використання. Сформульована та вирішена задача визначення оптимальних значень резерву часу при обмеженій інформації про час відновлення системи.

3.1 Функціональна стійкість великих інформаційних систем

Функціонування великих ІС, призначених для автоматизації управління, знаходиться в постійній взаємодії із зовнішніми впливами. При цьому великий клас такої взаємодії представлений різними конфліктами, які суттєво впливають на успішне виконання загальносистемної мети. Такі інформаційні конфлікти призводять до руйнування інформаційних ресурсів, порушенню штатних інформаційних процесів, і як наслідок зриву виконання системних та прикладних функцій. Все це обумовлює наявність в ІС механізмів, які мають забезпечувати нову якість – здатність збереження і/або відновлення даних функцій в умовах різного роду несприятливих впливів, а саме функціональної стійкості. Функціональна стійкість ІС являє собою інтегральну властивість, що включає надійність, живучість і безпеку. Відповідно оцінка показників ФС, необхідна для порівняння різних варіантів проектування, є складним науково-практичним завданням. Ще складніше провести пошук найкращого варіанту, який досягає

оптимальних показників ФС з певними обмеженнями. У цьому напрямку отримано ряд науково-практичних результатів, але відсутність навчально-методичного апарату по даній важливій проблемі призводить до певних недоліків в підготовці фахівців, які займаються створенням великих інформаційних систем.

Вважається, що в рамках теорії і практики ФС ІС, найменш вивченими є наступні завдання:

практична оцінка ФС в умовах апріорної невизначеності визначальних випадкових величин;

ефективність управління в системах з резервом часу;

розробка механізмів підвищення ФС ІС.

Досвід створення і застосування інформаційних систем в останні десятиріччя виявили безліч ситуацій, при яких збій і відмови їхнього функціонування були обумовлені неефективною системою експлуатації і супроводжувались великими втратами.

Внаслідок помилок в програмах автоматичного керування зазнали катастрофи декілька вітчизняних, американських і французьких супутників, відбувались відмови і катастрофи в складних адміністративних, банківських і технологічних інформаційних системах.

У результаті близько двадцяти років тому з’явилися перші узагальнюючі роботи, в яких були сформульовані концепція і головні положення теорії ФС інформаційних систем. У цей час були закладені основи методології і технології створення ФС ІС, однак єдиного підходу до вирішення зазначеної проблеми не передбачалося. Причиною цієї проблеми є унікальність кожної програмної системи. Тому при розробці відповідних проектів виконавці і замовники намагаються отримати оцінку ФС, як правило, на основі результатів кінцевих випробувань.

Дані дослідження безпосередньо пов’язані з уточненням поняття “функціонально стійка система” і “функціонально стійке управління”. Термін “функціональна стійкість” визначається стосовно вирішення конкретних завдань.

Якщо розглядати поняття “функціонально стійке управління” для випадку ІС

на основі програмно-конфігурованої мережі, то об’єкт управління та інформаційна підсистема описуються моделлю затримки часу передачі повідомлення.

Сучасні ІС використовують при роботі колосальний обсяг даних, що проходить через стандартні модулі і функції. Тому виявити всі зв’язки і шляхи обробки інформації, навіть для досить простої ІС, практично неможливо. Виходячи з цього деталізація елементів розрахунку ФС зазвичай обмежується окремими модулями, які взаємодіючи між собою утворюють більш складне об’єднання, ФС якого нас і цікавить.

Визначимо ФС ІС як здібність виконувати задані функції, зберігати в часі значення встановлених показників у заданих межах. При проведені експлуатації реальна ФС ІС суттєво відрізняється від розрахованої.

Як правило, оцінка ФС ІС базується на теорії ІС, для яких розроблено значну кількість математичних моделей і методів в умовах повної інформації про основні характеристики.

У якості показників ФС ІС використовуються:

ймовірність відмови;

ймовірність безвідмовного функціонування;

коефіцієнт готовності.

3.2 Розробка функціональної схеми інформаційної системи на основі програмно-конфігурованих мереж

3.2.1 Функціональна схема інформаційної системи.

Нехай ІС складається з n основних ($n \geq 1$) і m резервних ($m \geq 1$) ідентичних елементів, які можуть відмовляти, причому сумарна інтенсивність відмови залежить тільки від числа непрацездатних елементів. Функціональна схема ІС на основі програмно-конфігурованих мереж представлена на рисунку 3.1. Контроль працездатності основних і резервних елементів може бути ідеальним або неідеальним (дискретним, неповним або недостовірним). При відмові будь-якого з елементів він заміняється справним з однаковим розподілом тривалості відновлення

працездатності $F_{\text{в}}(t) = P\{t_{\text{в}} < t\}$. Якщо всі справні резервні елементи використані й виходить з ладу ще один елемент, то він стає в чергу до надходження наступного справного елемента. Будемо вважати, що ремонт повністю відновлює вихідні властивості системи. При відмові одного з основних елементів замість нього підключається один з працездатних резервних. Час підключення $t_{\text{п}}$ – випадкова величина з функції розподілу $F_{\text{п}} = P\{t_{\text{г}} < t\}$.

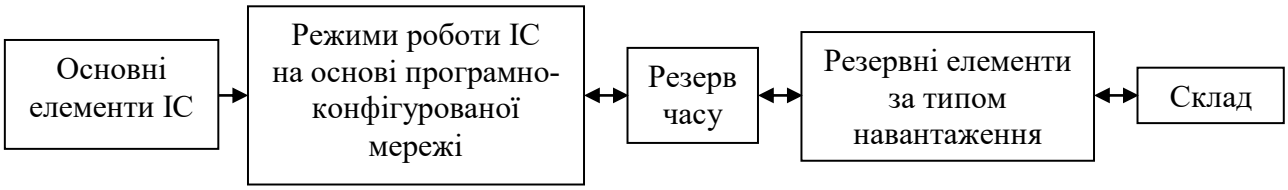

Рисунок 3.1 – Функціональна схема ІС
на основі програмно-конфігурованих мереж

В ІС передбачений резерв часу $\tau_{\text{д}}$, у загальному випадку представляє собою випадкову величину з функції розподілу $D(t) = P\{\tau_{\text{д}} < t\}$. Наявність в системі резерву часу призводить до того, що відмова об'єкта не означає водночас відмови системи, якщо відновлення його працездатності шляхом ремонту, підключення резервного елемента або іншим способом відбувається за час, що не перевищує допустимий $\tau_{\text{д}}$. Нехай до моменту кожного чергової відмови системи резерв часу поповнюється до вихідної величини незалежно від кількості попередніх відмов, часу на їх усунення і напрацювання об’єкта між відмовами. Для випадків, коли резерв часу $\tau_{\text{д}}$ – випадкова величина із законом розподілу $D(t)$ або при $\tau_{\text{д}} = t_{\text{д}} = const$ вид цього закону і його параметри або величина поповнення резерву часу $t_{\text{д}}$, залишаються незмінними при кожному використанні резерву часу.

Інформаційна система може використовуватися за призначенням не тільки безперервно, але й епізодично. У цьому випадку вона виконує завдання, що надходять у випадкові моменти часу.

У задачах, пов’язаних з функціональною стійкістю ІС, необхідно отримати

гарантовані оцінки показників при наявності обмеженої інформації про закони розподілів випадкових величин. Під гарантованою оцінкою розуміється нижня або верхня границі зміни значень показників ФС. Якщо при формалізації задачі вдається представити показник ФС ІС у вигляді інтеграла ймовірностей або сукупності таких інтегралів, то стає можливим залучити для знаходження двосторонніх оцінок метод розв'язання екстремальних задач.

3.2.2 Побудова гарантованих оцінок функціональної стійкості інформаційних систем. Сформулюємо вихідні передумови і припущення, при яких розв'язується задача оцінки показників ФС ІС з резервом часу:

напрацювання ІС між відмовами окремого основного елемента або навантаженого резервного елемента розподілено за експоненціальним законом $F(t) = P\{t_{\text{н}} < t\}$ з параметром λ і не залежить від номера відмови;

інтенсивність відмов окремого резервного елемента $\lambda_{\text{р}}$ залежить від ступеня його навантаження, тобто $\lambda_{\text{р}} = \alpha\lambda$, де $\alpha = 1$ при повному навантаженні, $0 < \alpha < 1$ при неповному навантаженні (полегшений режим) та $\alpha = 0$ при відсутності навантаження (ненавантажений режим);

ремонт елемента, що відмовив, повністю відновлює його вихідні властивості;

при відмові $(m + 1)$-го елемента ІС вимикається і нові відмови не виникають, система відновлює свою роботу при закінченні відновлення одного з $(m + 1)$ непрацездатних резервних елементів;

тривалість відновлення набагато менша напрацювання елемента між відмовами $(t_{\text{в}} \ll t_{\text{н}})$;

величина резерву часу $\tau_{\text{д}}$ і тривалість підключення $t_{\text{п}}$ резервного елемента замість основного значно менша напрацювання елемента між відмовами $\left(\tau_{\text{д}} \ll t_{\text{н}}, t_{\text{п}} \ll t_{\text{н}}\right)$ і тривалості відновлення $\left(\tau_{\text{д}} \ll t_{\text{в}}, t_{\text{п}} \ll t_{\text{в}}\right)$;

час відновлення $t_{\text{в}}$ одного елемента, час підключення $t_{\text{п}}$ резервного елемента замість основного, який відмовив, тривалість проміжків часу z між моментами надходження завдання при епізодичному використанні системи, резерв часу $\tau_{\text{д}}$

розподілені за законами відповідно $F_{\text{в}}(t)$, $F_{\text{п}}(t)$, $A(t)$, $D(t)$, інформація про які може бути обмежена (при невідомому виді функції розподілу фіксовані тільки моменти розподілу цих випадкових величин, наприклад, математичного сподівання і дисперсії).

Враховуючи ці припущення, можна знехтувати затримкою ІС в області працездатних станів на час $\min\left[t_{\text{в}}(t_{\text{п}}), \tau_{\text{д}}\right]$ при відмовах основних елементів і вважати, що після відмови $(m+1)$-го елемента жоден з $(m+1)$ елементів не встигне відновитися і підключитися в роботу за допустимий час. Така система може відмовити в двох випадках: при відмові $(m+1)$-го основного елемента або в момент, коли тривалість підключення резервного елемента в роботу (або відновлення основного) перевищить резервний час.

Для ІС при відомих видах і параметрах законів розподілу в роботах [74, 87, 88] отримані точні й наближені формули для основних показників ФС – ймовірності безвідмовного функціонування $P(t, \tau_{\text{д}})$, середнього напрацювання на відмову ІС $\bar{T}_0(\tau_{\text{д}})$, середнього часу відновлення $\bar{T}_{\text{в}}(\tau_{\text{д}})$, коефіцієнта готовності $K_{\text{г}}(\tau_{\text{д}})$ тощо.

Проте необхідно отримати розрахункові співвідношення для цих показників при наявності обмеженої апріорної інформації про закони розподілу випадкових величин, що описують функціонування таких систем. Сутність розв'язання сформульованої задачі полягає в спільному використанні відомих розрахункових співвідношень для показників ФС і двосторонніх оцінок лінійних і дробово-лінійних функціоналів, які входять складовою частиною в зазначені вище розрахункові формули, отримані в розділі 2.

З методичної точки зору розв'язання цієї задачі доцільно здійснити для різних класів систем з резервом часу:

для систем безперервного використання;

для систем епізодичного використання.

У всіх випадках двосторонні оцінки показників ФС побудовані для різного ступеню обмеженості апріорної інформації про закони розподілу випадкових величин.

3.3 Двосторонні оцінки показників функціональної стійкості систем з резервом часу при відомих моментах розподілу випадкових величин

3.3.1 Системи безперервного використання з часовим резервуванням.

Розглянемо систему, в якій об'єкт представлений одним безперервно використовуваним узагальненим структурним елементом ($n = 1, m = 0$). Контроль працездатності цього елемента передбачається ідеальним (повним, безперервним і достовірним).

Нехай відмови об'єкта виникають тільки в робочому режимі і лише з підстав, пов'язаних з цим режимом. Момент відновлення системи, якщо він настане раніше, ніж вичерпається резерв часу, є точкою регенерації стохастичного процесу, що описує функціонування ІС [15, 74], а сам процес буде регенеруючим з періодом, що складається з двох незалежних частин: $\xi = \xi_1 + \xi_2$, де ξ_1 – випадкова величина з експоненціальним, а ξ_2 – випадкова величина з довільним розподілами. У моделі функціонування ІС з резервом часу перша частина періоду ξ_1 – це інтервал, протягом якого ІС працездатна, а друга частина ξ_2 – це інтервал, на якому виникає відмова ІС і проводиться її відновлення. Критерієм відмови таких ІС є виконання умови перевищення випадковою величиною $t_в$ (часу відновлення) резервного часу $\tau_д$, або $t_д$ (тобто відмова системи може статися тільки на другій частині періоду регенерації). Імовірність цієї події

$$q = P\{t_в > \tau_д\} = \int_0^\infty [1 - F_в(t)]D(t). \quad (3.1)$$

При $\tau_д = t_д = const$ маємо

$$q = P\{t_в > t_д\} = 1 - F_в(t_д). \quad (3.2)$$

При повній апріорній інформації (відомих видах і параметрах функцій розподілу $F_в(t) = P\{t_в < t\}$ і $D(t) = P\{\tau_д < t\}$) в роботі [74] отримані розрахункові співвідношення для ймовірності, які використовуються при отриманні формул для основних показників ФС ІС.

Розглянемо типові ситуації, які характеризують випадки інформативності про випадкові величини $t_в$ і $t_д$, що часто зустрічаються в інженерній практиці та

отримаємо для них верхні й нижні оцінки для ймовірності q.

1. Нехай час відновлення $t_в$ розподілено за відомим законом $F_в = P\{t_в < t\} = 1 - exp(-\mu t)$, а резервний час $\tau_д$ має довільну функцію розподілу $D(t) = P\{\tau_д < t\}$, вид якої невідомий, а є інформація тільки про перші два початкових моменти цієї функції розподілу: $d_1 = \int_0^\infty t dD(t)$, $d_2 = \int_0^\infty t^2 dD(t)$. Клас функцій розподілу, що задовольняють таким обмеженням, позначимо L_2. Функціонал (3.1) в цьому випадку матиме вигляд:

$$q = J(D) = \int_0^\infty exp(-\mu \cdot t) dD(t). \tag{3.3}$$

Для такого функціоналу отримані двосторонні оцінки при відомих моментах функції розподілу $D(t)$, використовуючи які можна визначити:

$$\inf_{D \in L_2} J(D) = e^{-\mu d_1}, \tag{3.4}$$

$$\sup_{D \in L_2} J(D) = \frac{d_2 - d_1^2}{d_2} + \frac{d_1^2}{d_2} \cdot e^{-\mu \frac{d_2}{d_1}}. \tag{3.5}$$

Оцінки (3.4) і (3.5) дозволяють зробити гарантований висновок відповідно про мінімальну максимальну величини ймовірності того, що відмова об'єкта призведе до відмови системи.

2. Нехай інформація про функції розподілу $F_в(t)$ обмежена знанням тільки двох початкових моментів розподілу $m_1 = \int_0^\infty t dF_в(t)$ і $m_2 = \int_0^\infty t^2 dF_в(t)$ (клас функцій розподілу $F_в(t)$, що задовольняють цим обмеженням, позначимо K_2), а резервний час розподілений за експоненціальним законом з параметром γ. У цьому випадку:

$$q = J(F_в) = \int_0^\infty D(t) dF_в(t) = 1 - \int_0^\infty e^{-\gamma t} dF_в(t). \tag{3.6}$$

Використовуючи оцінки (3.4) і (3.5), можна визначити двосторонні оцінки ймовірності q (3.6) для даної ситуації:

$$J_* = \inf_{F_в \in K_2} J(F_в) = \frac{m_1^2}{m_2}\left(1 - e^{-\gamma \frac{m_2}{m_1}}\right), \tag{3.7}$$

$$J^* = \sup_{F_в \in K_2} J(F_в) = 1 - e^{-\gamma m_1}. \tag{3.8}$$

При відомому тільки середньому значенні $t_в - m_1$ (клас таких функцій

розподілу позначимо K_1) верхня оцінка ймовірності q співпадає з (3.8), а нижня $J_* = \inf_{F_в \in K_2} J(F_в) = 0$.

3. Нехай види функцій розподілу $F_в(t)$ і $D(t)$ невідомі, а фіксовані тільки математичні очікування випадкових величин $t_в$ і $\tau_д - m_1$ і d_1 відповідно.

Використовуючи класичні методи знайдено мінімальне значення інтеграла $J(F_в, D) = \int_0^\infty D(t) dF_в(t)$ при $F_в \in K_1$, $D(t) \in L_1$, де K_1 і L_1 – множини функцій розподілу з відомим математичним сподіванням $m_1 = \int_0^\infty t dF_в(t)$ і $d_1 = \int_0^\infty t dD(t)$ відповідно. При $m_1 > d_1$, $F_в(t) \in K_1$, $D(t) \in L_1$.

$$\min J(F_в, D) = 1 - d_1/2m_1. \tag{3.9}$$

Однак, застосовуючи класичні методи варіаційного числення, що базуються на рівняннях Ейлера-Лагранжа, можна визначити тільки підозрювану на екстремум точку (локальний екстремум) і таке розв'язання не може служити гарантованою оцінкою. У розділі 2 показано, що в разі наявності обмеженої апріорної інформації про функції розподілу $F_в(t)$ і $D(t)$ (при відомих математичних сподіваннях цих розподілів) глобальні екстремуми функціонала (3.1) дорівнюють:

$$\inf_{F_в \in K_1, D \in L_1} \int_0^\infty D(t) dF_в(t) = 0, \tag{3.10}$$

$$\sup_{F_в \in K_1, D \in L_1} \int_0^\infty D(t) dF_в(t) = 1. \tag{3.11}$$

Таким чином, маючи інформацію тільки про перші початкові моменти випадкових величин $t_в$ і $\tau_д$ при довільних видах функцій розподілу $F_в(t)$ і $D(t)$, нетривіальні гарантовані висновки про границі зміни ймовірності q зробити неможливо, тому що при визначенні екстремальних значень ймовірності q при зазначених умовах нижня границя q дорівнює нулю, а верхня дорівнює одиниці.

4. Нехай резерв часу $\tau_д = t_д = const$, тобто має вироджену функцію розподілу

$$D(t) = \begin{cases} 0 & \text{при} \quad t < t_д, \\ 1 & \text{при} \quad t \geq t_д \end{cases}.$$

У цьому випадку при наявності обмеженої апріорної інформації про функцію розподілу $F_в(t)$ (коли відомі тільки початкові моменти випадкових величин $t_в - m_1$

або m_1 і m_2) можна визначити двосторонні оцінки ймовірності q. Зокрема, при $F_{\text{в}} \in K_2$ граничні значення q мають вигляд:

$$\inf_{F_{\text{в}} \in K_2} q = \begin{cases} m_2 - 2t_{\text{д}} m_1 + t_{\text{д}}^2 & \text{при} \quad 0 < t_{\text{д}} < m_1, \\ 0 \quad \text{при} \quad t_{\text{д}} \geq m_1 \end{cases} \tag{3.12}$$

$$\sup_{F_{\text{в}} \in K_2} q = \begin{cases} 1 \quad \text{при} \quad 0 < t_{\text{д}} < m_1, \\ \dfrac{m_1}{t_{\text{д}}} \quad \text{при} \quad m_1 \leq t_{\text{д}} < \dfrac{m_2}{m_1}, \\ \dfrac{m_2 - m_1^2}{m_2 - 2t_{\text{д}} m_1 + t_{\text{д}}^2} \quad \text{при} \quad t_{\text{д}} \geq \dfrac{m_2}{m_1}. \end{cases} \tag{3.13}$$

Нехай інтервали часу $t_{\text{в}} < \tau_{\text{д}}$ входять до корисного часу, тобто при оцінці показників ФС враховується лише частина інтервалу відновлення $(t_{\text{в}} - \tau_{\text{д}})$. Підставляючи нижні й верхні оцінки функціоналу (3.1) (або (3.2)) у відомі розрахункові співвідношення для основних показників ФС ІС з резервом часу $\bar{T}_{\text{н}}(\tau_{\text{д}})$; $P(t, \tau_{\text{д}})$; $K_{\text{г}}(\tau_{\text{д}})$ [74], отримаємо двосторонні оцінки для них при розглянутих вище типових ситуаціях. Ці оцінки зведені в таблиці 3.1.

Оцінки для показника $\bar{T}_{\text{н}}(\tau_{\text{д}})$ отримані в припущенні, що середнє напрацювання об'єкта до відмови $t_{\text{н}}$ значно більший величини $M \min(t_{\text{в}}, \tau_{\text{д}})$. Ця умова, як правило, виконується на практиці для широкого класу об'єктів інформаційних систем з часовим резервуванням.

Похибка формули для $\bar{T}_{\text{н}}(\tau_{\text{д}})$ при цьому припущенні $\delta_+ = M \min(t_{\text{в}}, t_{\text{д}}) / [1 - F_{\text{в}}(t_{\text{д}})]$.

Двосторонні оцінки величини δ_+ при $F_{\text{в}}(t) \in K_{\text{в}}$ мають вигляд:

$$\inf_{F_{\text{в}} \in K_2} \delta_+ = \begin{cases} t_{\text{д}} \quad \text{при} \quad 0 < t_{\text{д}} < \dfrac{m_2}{m_1}, \\ \dfrac{m_1(t_{\text{д}}^2 - 2t_{\text{д}} m_1 + m_2)}{m_2 - m_1^2} \quad \text{при} \quad t_{\text{д}} \geq \dfrac{m_2}{m_1}, \end{cases} \tag{3.14}$$

$$\sup_{F_в \in K_2} \delta_+ = \begin{cases} \dfrac{t_д (m_1 - t_д)^2}{m_2 - 2t_д m_1 + t_д^2} & \text{при } 0 < t_д < m_1, \\ \infty \quad \text{при} \quad t_д \geq \dfrac{m_2}{m_1}. \end{cases} \tag{3.15}$$

Таблиця 3.1 – Двосторонні оцінки показників ФС систем з резервом часу

Показ-ник	Ситуації, що розглядаються	Нижня границя	Верхня границя
$\bar{T}_н(\tau_д)$	$F_в(t)$ – експон. (пар. μ) $D(t) \in K_2(d_1, d_2)$	$\dfrac{\bar{t}_н d_2}{d_2 + d_1^2(1 + e^{-\mu d_2/d_1})}$	$\dfrac{\bar{t}_н}{e^{-\mu d_1}}$
	$F_в(t) \in K_2(m_1, m_2)$ $D(t)$ – експон. (пар. γ)	$\dfrac{\bar{t}_н}{e^{-\gamma m_1}}$	$\dfrac{\bar{t}_н m_2}{m_2 + m_1^2(1 + e^{-\gamma m_2/m_1})}$
	$F_в(t) \in K_2(m_1, m_2)$ $D(t)$ – виродж. ($t_д = const$)	$\begin{cases} \bar{t}_н \quad \text{при} \quad 0 \leq t_д < m_1, \\ \dfrac{\bar{t}_н t_д}{m_1} \quad \text{при} \quad m_1 \leq t_д < \dfrac{m_2}{m_1}, \\ \dfrac{\bar{t}_н (m_2 - 2t_д m_1 + t_д^2)}{m_2 - m_1^2} \quad \text{при} \quad t_д \geq \dfrac{m_2}{m_1} \end{cases}$	$\begin{cases} \dfrac{\bar{t}_н}{m_1^2 - 2t_д m_1 + t_д^2} & \text{при } 0 \leq t_д < m_1, \\ \infty \quad \text{при} \quad t_д \geq m_1 \end{cases}$
$P(t, \tau_д)$	$F_в(t) \in K_2(m_1, m_2)$ $D(t)$ – експон. (пар. γ)	$exp\left[-\dfrac{(t - t_Д)(1 - e^{-\gamma m_1})}{\bar{t}_н}\right]$	$exp\left[-\dfrac{(t - t_д) m_1^2 (1 - e^{-\gamma m_2/m_1^2})}{m_2 \bar{t}_н}\right]$
	$F_в(t) \in K_2(m_1, m_2)$ $D(t)$ – виродж. ($t_д = const$)	$\begin{cases} \exp\left[-\dfrac{(t - t_д)}{\bar{t}_н}\right] \quad \text{при} \quad 0 \leq t_д < m_1, \\ \exp\left[-\dfrac{(t - t_д) m_1}{\bar{t}_н \cdot t_д}\right] \quad \text{при} \quad m_1 \leq t_д < \dfrac{m_2}{m_1}, \\ \exp\left[-\dfrac{(t - t_д)(m_2 - m_1^2)}{\bar{t}_н (m_2 - 2t_д m_1 + t_Д^2)}\right] \quad \text{при } t_д \geq \dfrac{m_2}{m_1} \end{cases}$	$\begin{cases} \exp\left[-\dfrac{(t - t_д)(m_1^2 - 2t_д m_1 + t_д^2)}{\bar{t}_н (m_2 - m_1^2)}\right] \\ \qquad \text{при} \quad 0 \leq t_д < m_1, \\ 1 \quad \text{при} \quad t_д \geq m_1 \end{cases}$
$K_г(\tau_д)$	$F_в(t)$ – експон. (пар. μ) $D(t) \in K_2(d_1, d_2)$	$k_г + (1 - k_г)\dfrac{d_1^2 + e^{-\mu d_2/d_1}}{d_2}$	$k_г + (1 - k_г)(1 - e^{-\mu d_1})$
	$F_в(t) \in K_2(m_1, m_2)$ $D(t)$ – експон. (пар. γ)	$k_г + (1 - k_г)(1 - e^{-\gamma m_1})$	$k_г + (1 - k_г)\dfrac{m_1^2 + e^{-\gamma m_2/m_1}}{m_2}$

Показ-ник	Ситуації, що розглядаються	Нижня границя	Верхня границя
	$F_{\text{в}}(t)$ $\in K_2(m_1, m_2)$ $D(t)$ – виродж. $(t_{\text{д}} = const)$	$\begin{cases} k_{\text{г}} \quad \text{при} \quad 0 \le t_{\text{д}} < m_1, \\ k_{\text{г}} + (1-k_{\text{г}})\left(\dfrac{t_{\text{д}} - m_1}{t_{\text{д}}}\right) \quad \text{при} \quad m_1 \le t_{\text{д}} < \dfrac{m_2}{m_1}, \\ k_{\text{г}} + (1-k_{\text{г}})\dfrac{t_{\text{д}} - m_1}{m_2 - 2t_{\text{д}}m_1 + t_{\text{д}}^2} \quad \text{при } t_{\text{д}} \ge \dfrac{m_2}{m_1} \end{cases}$	$\begin{cases} k_{\text{г}} \quad \text{при} \quad 0 \le t_{\text{д}} < m_1, \\ k_{\text{г}} + (1-k_{\text{г}})\dfrac{m_2 - m_1^2}{m_2 - 2t_{\text{д}}m_1 + t_{\text{д}}^2} \quad \text{при } t_{\text{д}} \ge m_1 \end{cases}$

3.3.2 Системи епізодичного використання з часовим резервуванням. Відмінною особливістю цілого ряду інформаційних систем полягає в тому, що вони використовуються не безперервно, а епізодично, тобто виконують завдання, що надходять у випадкові моменти часу. Проміжки часу між надходженнями завдань є випадкова величина z з функції розподілу $A(t) = P\{z < t\}$. Прикладами можуть служити радари, які здійснюють проводку літаків до аеродрому, сервери, що забезпечують прийом і обробку інформації, обчислювальні комплекси, що працюють в реальному масштабі часу, системи зв'язку і тощо.

Розглянемо дві моделі ІС епізодичного використання з часовим резервуванням:

1. Об'єкт представлений одним узагальненим структурним елементом, а резерв часу забезпечується тільки за рахунок випадкового режиму використання об'єкта. Цей час являє собою випадкову величину, яка визначається від моменту виникнення відмови до моменту надходження завдання. Тривалість виконання завдання настільки мала в порівнянні з напрацюванням об'єкта на відмову, що нею можна практично знехтувати. Формули для напрацювання системи на відмову і ймовірності безвідмовної роботи мають вигляд [74]:

$$\bar{T}_0(z_*) \approx \bar{t}_{\text{н}} / q, \tag{3.34}$$

$$P(t, z_*) \approx \exp(-q\, t / \bar{t}_{\text{н}}), \tag{3.35}$$

$$K_{\text{г}}(\tau_{\text{д}}) \approx \frac{T_{\text{н}}(\tau_{\text{д}})}{T_{\text{н}}(\tau_{\text{д}}) + 1/\mu} \approx \frac{\mu \bar{t}_{\text{н}}}{\mu \bar{t}_{\text{н}} + q}, \tag{3.36}$$

де $\bar{T}_{\text{н}}(\tau_{\text{д}}) \approx \frac{\bar{t}_{\text{н}}}{q}$, q – ймовірність того, що завдання надійде до того, як закінчиться відновлення працездатності об'єкта, тобто $q = P\{z_* < t_{\text{в}}\} = \int_0^\infty [1 - A^*(t)] dF_{\text{в}}(t)$,

де $A^*(t) = P\{z_* < t\} = \frac{1}{z}\int_0^t [1 - A(x)]dx.$

Двосторонні оцінки ймовірності q при наявності апріорної інформації тільки про моменти функцій розподілу $A(t)$ і $F_в(t)$ при наявності поповнювального резерву часу $t_д$, передбаченого у самій системі, можуть бути обчислені за допомогою формул, отриманих у розділі 2. Так, при відомих моментах функції розподілу $A(t)$, a_1 і a_2

$$q_* = exp\left(-\mu t_д\right) \inf_{A^* \in L_2} I(A^*) = exp\left[-\mu\left(a_1 + t_д\right)\right], \tag{3.37}$$

$$q^* = exp\left(-\mu t_д\right) \sup_{A^* \in L_2} I(A^*) = e^{-\mu t_д}\left[1 - \frac{a_1^2}{a_2}\left(1 - e^{-\mu a_2/a_1}\right)\right]. \tag{3.38}$$

З огляду на це, отримаємо

$$\left.\begin{array}{ll} \min\limits_{A^* \in L_2} P(t, t_д) \approx e^{-q^* t/\bar{t}_н}; & \max\limits_{A^* \in L_2} P(t, t_д) \approx e^{-q_* t/\bar{t}_н}; \\ \min\limits_{A^* \in L_2} T_н(t_д) \approx \bar{t}_н / q^*; & \max\limits_{A^* \in L_2} T_н(t_д) \approx \bar{t}_н / q_*; \\ \min\limits_{A^* \in L_2} K_г(t_д) \approx \dfrac{\mu \bar{t}_н}{\mu \bar{t}_н + q^*}; & \max\limits_{A^* \in L_2} K_г(t_д) \approx \dfrac{\mu \bar{t}_н}{\mu \bar{t}_н + q_*}. \end{array}\right\} \tag{3.39}$$

2. Збережемо постановку задачі, сформульовану в моделі 1, але додатково будемо вважати, що тривалість виконання завдання, яке надійшло – випадкова величина $t_з$ з функції розподілу $B(t)$. Отже, тут ми будемо мати справу з ІС тривалої дії [74], які можуть змінити свій стан (відмовити) за час виконання завдання з імовірністю, відмінною від нуля. Нехай напрацювання ІС між відмовами $t_н$ і час між двома послідовними моментами надходження завдань z розподілені за експоненціальним законом з параметрами відповідно λ і $\gamma_з$. Резерв часу забезпечується тільки за рахунок випадкового режиму використання. Перерви у виконанні завдання не допускаються. В цьому випадку гарантовані (найменші) границі $\overline{T_0}(z_*)$ і $P(t, z_*)$ мають такий вигляд при моментних обмеженнях на функціях розподілу $F_в(t)$ і $B(t)$:

$$\min_{\substack{B\in L_2\\ F_в\in K_2}} T_0 \approx \left[\lambda\left(1-\inf_{F_в\in K_2} I(F_в)\right)+\gamma_з\left(1-\inf_{B\in L_2} I(B)\right)\right]^{-1} \approx \approx \left[\lambda\left(1-e^{-\gamma_з m_1}\right)+\gamma_з\left(1-e^{-\lambda a_1}\right)\right]^{-1}, \quad (3.40)$$

$$\max_{\substack{B\in L_2\\ F_в\in K_2}} T_0 \approx \left[\lambda\left(1-\sup_{F_в\in K_2} I(F_в)\right)+\gamma_з\left(1-\sup_{B\in L_2} I(B)\right)\right]^{-1} \approx \approx \left[\frac{\lambda m_1^2}{m_2}\left(1-e^{-\gamma_з m_2/m_1}\right)+\frac{-\gamma_з a_1^2}{a_2}\left(1-e^{-\lambda a_2/a_1}\right)\right]^{-1}, \quad (3.41)$$

$$\min_{\substack{B\in L_2\\ F_в\in K_2}} P(t) \approx \exp\left(-t\Big/\min_{\substack{B\in L_2\\ F_в\in K_2}} T_0\right) \approx \exp\left\{-t\left[\lambda\left(1-e^{-\gamma_з m_1}\right)+\gamma_з\left(1-e^{-\lambda a_1}\right)\right]\right\}, \quad (3.42)$$

$$\max_{\substack{B\in L_2\\ F_в\in K_2}} P(t) \approx \exp\left(-t\Big/\max_{\substack{B\in L_2\\ F_в\in K_2}} T_0\right) \approx \approx \exp\left\{-t\left[\frac{\lambda m_1^2}{m_2}\left(1-e^{-\gamma_з m_2/m_1}\right)+\gamma_з\left(1-e^{-\lambda a_2/a_1}\right)\right]\right\}. \quad (3.43)$$

Для того, щоб забезпечити прийнятне значення похибки при проведені розрахунків за наближеними виразами (3.40)–(3.43) (величина похибки менше 10%) необхідно щоб виконувались умови $\lambda\bar{t}_в \le 0{,}1$; $\lambda\bar{t}_з \le 0{,}1$; $\gamma_з\bar{t}_в \le 0{,}1$.

3.4 Методика забезпечення функціональної стійкості інформаційної системи

Розробимо методику забезпечення функціональної стійкості інформаційної системи на основі програмно-конфігурованих мереж, яка відрізняється від існуючих тим, що базується на основі гарантованих оцінок показників ФС [14].

Методика розрахунку граничних значень показників ФС буде використовуватись для систем безперервного та епізодичного використання з поповнюваним резервом часу при відомих початкових моментах різних розподілів випадкових величин.

Методика знаходження двосторонніх оцінок показників функціональної стійкості системи передачі даних ІС містить у собі наступні етапи:

1. Вихідні величини і функції:

ІС складається з n основних ($n \geq 1$) і m резервних ($m \geq 1$);

два початкових моменти s_1 й s_2 функції розподілу $F(t) = P\{t_н < t\}$ напрацювання на відмову;

два початкових моменти m_1 й m_2 функції розподілу часу відновлення об'єкта $F_в(t) = P\{t_в < t\}$, де $m_1 = \bar{t}_в$ математичне сподівання цього часу;

два початкових моменти d_1 й d_2 функція розподілу резервного часу при відновленні об'єкта $D(t) = P\{\tau_д < t\}$, математичне сподівання цього часу $d_1 = \bar{t}_д$;

тривалість проміжків часу z між моментами надходження завдання при епізодичному використанні системи $A(t) = P\{z < t\}$;

тривалість відновлення набагато менша напрацювання елемента між відмовами ($t_в \ll t_н$);

функція розподілу часу підключення $F_п = P\{t_п < t\}$, математичне сподівання цього часу $a_1 = \bar{t}_п$;

2. Величини, що обчислюються за вихідними даними:

$q = J(D) = \int_0^\infty \exp(-\mu \cdot t) dD(t)$, коли $t_в$ розподілено за відомим законом $F_в = P\{t_в < t\} = 1 - \exp(-\mu t)$, а $\tau_д$ має довільну функцію розподілу $D(t) = P\{\tau_д < t\}$, вид якої невідомий, а є інформація тільки про перші два початкових моменти цієї функції розподілу $d_1 = \int_0^\infty t dD(t)$, $d_2 = \int_0^\infty t^2 dD(t)$;

$q = J(F_в) = \int_0^\infty D(t) dF_в(t) = 1 - \int_0^\infty e^{-\gamma t} dF_в(t)$, коли інформація про функцію розподілу $F_в(t)$ обмежена двома початковими моментами $m_1 = \int_0^\infty t dF_в(t)$ і $m_2 = \int_0^\infty t^2 dF_в(t)$, а резервний час розподілений за експоненціальним законом з параметром γ;

3. Розрахунок граничних значень показників функціональної стійкості:

для систем безперервного використання при різних початкових умовах верхня та нижня границі середнього напрацювання до відмови, ймовірності безвідмовної роботи та коефіцієнта готовності визначаються за формулами, що приведені в таблиці 3.1;

для систем епізодичного використання при різних початкових умовах верхня

та нижня границі середнього напрацювання до відмови, ймовірності безвідмовної роботи та коефіцієнта готовності визначаються за формулами:

а) для об'єктів короткочасної дії за формулами (3.39);

б) для об'єктів тривалої дії за формулами (3.40)–(3.43).

Таким чином, при наявності обмеженої апріорної інформації про закони розподілу часу відновлення, резервного часу, проміжків часу між моментами надходження завдання при епізодичному використанні системи коли відомі тільки математичне сподівання і дисперсія, методика дозволяє знаходити граничні значення показників функціональної стійкості, а саме:

середнього напрацювання до відмови;

ймовірності безвідмовної роботи;

коефіцієнта готовності.

Отримані наукові результати можуть бути використані на стадії проектування складних ІС. Вони носять характер прогнозування, тому що служать обґрунтуванням передбачуваних показників ФС ІС, які ще не існують в реальному виконанні. Також методика дозволяє проводити порівняльний аналіз різних конструктивних (схемних) варіантів виробу на стадії його проектування для обґрунтованого вибору загальної структурної схеми, способів резервування, методів контролю та обслуговування тощо.

3.5 Висновки до розділу 3

1. На основі використання результатів оцінки лінійних і дробово-лінійних функціоналів отримані математичні моделі функціональної стійкості інформаційних систем з часовим резервуванням для визначення гарантованих (найбільших і найменших) значень їхніх показників при наявності обмеженої апріорної інформації про розподіли випадкових величин, представленої початковими моментами.

2. Розроблено методику забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем на основі програмно-конфігурованих мереж. Методика

дозволяє знаходити двосторонні оцінки показників функціональної стійкості системи передачі даних ІС, проводити порівняльний аналіз різних конструктивних (схемних) варіантів ІС на стадії проектування для обґрунтованого вибору загальної структурної схеми, способів резервування, методів контролю та обслуговування тощо.

3. Отримані наукові результати можуть бути використані на стадії проектування та експлуатації ІС, коли інформація про розподіли визначальних випадкових величин обмежена. Вони носять характер прогнозування, тому що служать обґрунтуванням передбачуваних показників функціональної стійкості інформаційних систем.

РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ЇХНЯ ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ

У попередніх розділах дисертаційної роботи, використовуючи врахування особливостей відомих співвідношень для ФС ІС з резервом часу і двосторонніх оцінок функціоналів, що входять у ці співвідношення, отримані розрахункові формули для гарантованих оцінок основних показників ФС ІС при наявності обмеженої апріорної інформації про розподіли визначальних випадкових величин.

З практичної точки зору значний інтерес представляє дослідження питання: оцінка зміни продуктивності віртуального хмарного середовища та технічних експлуатаційних витрат мережі при використанні розробленої методики забезпечення функціональної стійкості віртуального хмарного середовища на основі програмно-конфігурованих мереж; яким чином впливають різні чинники реального функціонування і повнота апріорної інформації на оцінки основних показників функціональної стійкості. Це особливо актуально на етапах проектування і випробувань ІС, експлуатація яких здійснюється в умовах невизначеності.

У зв’язку з цим у даному розділі вирішується ряд завдань, основними з яких є:

аналіз ефективності часового резервування при наявності обмеженої апріорної інформації і кількісна оцінка впливу випадкових неконтрольованих факторів реального функціонування на основні показників ФС ІС з резервом часу;

дослідження ФС ІС в умовах апріорної невизначеності для різних режимів функціонування.

4.1 Обґрунтування тестового стенду віртуального хмарного середовища

Даний розділ присвячено оцінці зміни продуктивності віртуального хмарного середовища та технічних експлуатаційних витрат мережі при використанні методики забезпечення функціональної стійкості віртуального хмарного середовища на основі програмно-конфігурованих мереж.

Сьогодні імітаційне моделювання широко застосовується в різних галузях науки та практичній діяльності. Моделювання фізичних процесів не є інструментом лише наукових досліджень – воно широко застосовується в промисловості для розробки нових технологій та зразків продукції; в розробках побутової техніки та транспортних засобів з комп'ютерним керуванням, відбувається моделювання фізичних процесів і для прогнозування поведінки різноманітних інформаційних систем. Складні задачі імітаційного моделювання вимагають застосування ІС великої потужності та вартості [13]. Правильний вибір ІС для задач імітаційного моделювання визначається такими параметрами, як швидкість, час затримки, відсоткова утилізація тощо [17, 60, 63].

Важливим моментом зменшення часу виконання завдання є оцінка продуктивності ІС для задач імітаційного моделювання фізичних процесів. Крім часу виконання завдання також слід враховувати такі аспекти, як час розробки програмного забезпечення, вартість та доступність ІС, вартість та доступність програмного забезпечення тощо.

4.1.1 Розробка структурної схеми тестового стенду віртуального хмарного середовища. Для проведення аналізу ефективності методики розроблено віртуальне хмарне середовище тестування мережі. Розробка структурної схеми тестового стенду віртуального хмарного середовища є досить складною задачею. Це обумовлено тим, що необхідно враховувати всі використовувані віртуальні мережі, віртуальні комутатори, маршрутизатори та зв'язки між ними. Також необхідно враховувати різні типи зв'язків між різними об'єктами. Це обумовлено тим, що трафік управління комутаторами та маршрутизаторами не повинен потрапити в загальну мережу, де працюють усі клієнти загального призначення [28–30].

Віртуальне хмарне середовище (рис. 4.1) складається з п'яти комутаторів та одного маршрутизатора, двох бездротових WiFi маршрутизаторів, чотирьох бездротових клієнтів, сервера потокового відео та файлового сервера, а також сервера зі встановленим на ньому SDN контролером. При цьому враховуються різні

окремі варіанти проходження трафіку. Наприклад, коли клієнти спілкуються один з одним за допомогою програм встановлення відео-конференцій, або коли клієнти дивляться відео у реальному часі з сервера потокового відео [28, 31].

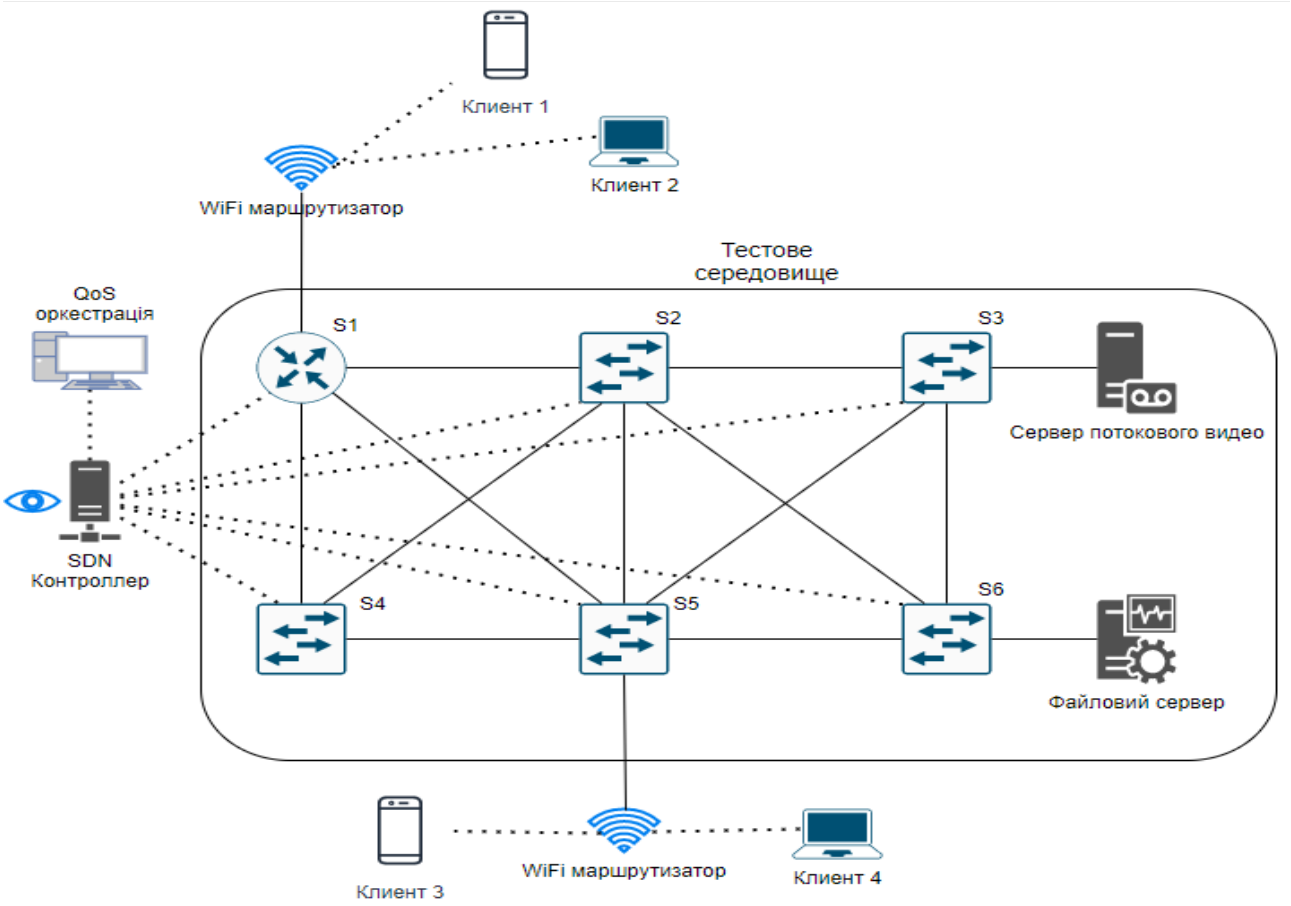

Рисунок 4.1 – Структурна схема тестового стенду

Для реалізації тестового стенду віртуального хмарного середовища було використано сучасну лабораторну базу Державного університету телекомунікацій. Контролер SDN був встановлений на сервер HPE ProLiant DL60 gen9 (рис. 4.2). Файловий сервер та сервер потокового відео були встановлені на іншому такому ж сервері HPE ProLiant DL60 gen9. Комутатор 3-го рівня HP 3800-48G-PoE+-4SFP+ Switch J9574A (рис. 4.3) виконував роль маршрутизатора, а комутатори 2-го рівня HP 2530-24G (рис. 4.4) виконували роль звичайних комутаторів агрегації та доступу.

Рисунок 4.2 – Сервер HPE ProLiant DL60 gen9

Рисунок 4.3 – Комутатор 3-го рівня HP 3800-48G-PoE+-4SFP+Switch J9574A

Рисунок 4.4 – Комутатор 2-го рівня HP 2530-24G

Основні технічні характеристики комутатора 3-го рівня HP 3800-48G-PoE+-4SFP+ Switch J9574A та сервера HPE ProLiant DL60 gen9 наведено у таблицях 4.1 і 4.2 відповідно.

Таблиця 4.1 – Технічні характеристики комутатора HP 3800-48G-PoE-4SFP Switch J9574A

Показник	Опис
Тип комутатора	switch
Об’єм оперативної пам’яті	2048 Мб
Об’єм flash-пам’яті	4096 Мб
Пропускна спроможність на кожному порті	176 Гбит/сек
Швидкість uplink/SFP-портів	10 Гбит/сек
Розмір таблиці MAC адрес	10240
Кількість uplink/стек/SFP-портів та модулів	4
Web-інтерфейс	є
Кількість uplink/Web-інтерфейсів	є
Telnet	є
Підтримка SNMP	є
Консольний порт	є
Підтримка стандартів	Auto MDI/MDIX, Power Over Ethernet
Розмір / вага	440 × 43 × 467 мм / 7.26 кг
Додатково	4 фіксованих порта 1000/10000 SFP+; 1 послідовний порт консолі RJ-45; 1 порт RJ-45 для зовнішнього управління; 1 слот модуля стекування

Таблиця 4.2 – Технічні характеристики сервера HPE ProLiant DL60 gen9

Показник	Опис
Кількість процесорів	1
Кількість ядер процесора	8
Кеш процесора	20 Мбайт LLC
Швидкодія процесора	3,0 ГГц
Форм-фактор	1U
Форм-фактор шасі	стійка
Блок живлення	2 прилади начального рівня
Слоти розширенння	3 максимум
Максимальний об’єм пам’яті	256 ГБ
Слоти для пам’яті	8 слотів DIMM
Тип пам’яті	Пам’ять DDR4 SmartMemory
Функції захисту пам’яті	Режим Memory Online Spare
Накопичувач	4 диски SAS/SATA/SSD великого форм-фактору з можливістю гарячої заміни
Функції системних вентиляторів	Додаткові резервні пристрої з можливістю гарячої заміни
Мережевий контролер	Адаптер Ethernet 361i, 1 Гбіт / с
Контролер сховища	Контролер Smart Array P440 / 4 Гбайт
Управління інфраструктурою	iLO Management, Intelligent Provisioning

Комутатор 3-го рівня HP 3800-48G-PoE+-4SFP+ Switch J9574A виконує важливу роль ядра мережі. Підключення між серверами та комутатором здійснюються на швидкості 1 Гб/сек.

4.1.2 Оцінка ефективності методики забезпечення функціональної стійкості віртуального хмарного середовища на основі програмно-конфігурованих мереж. Для підтвердження ефективності роботи методики

забезпечення функціональної стійкості віртуального хмарного середовища на основі програмно-конфігурованих мереж доцільно провести експеримент у тестовому середовищі.

Визначено, що метою методики є організація такого каналу зв'язку, який би забезпечував якість надання послуг на заданому рівні. Проведення експерименту у цьому разі є особливо доцільним.

Для аналізу продуктивності ІС та перевірки методики за допомогою створеного тестового середовища (рис. 4.1) було проведено 125 тестів із застосуванням та без застосування методики, а також зі штучними аваріями на випадкових частинах маршруту проходження трафіку. Нижче на рисунку 4.5 представлено сумісні графіки часу затримки від кількості передаваємих пакетів. Ці показники отримані в результаті обробки даних експерименту.

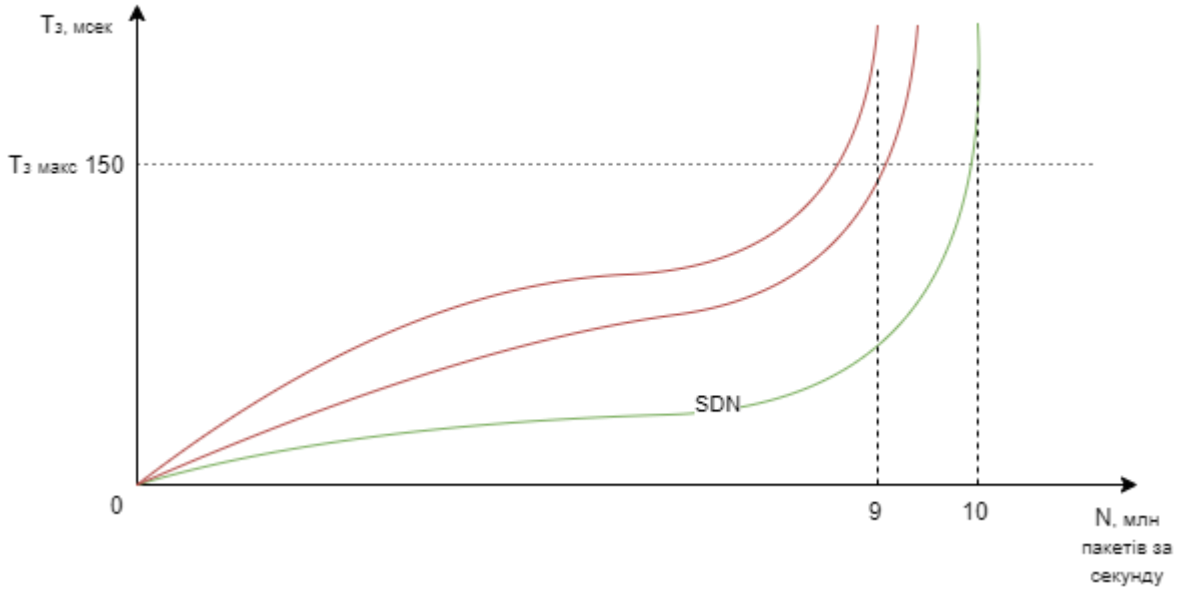

Рисунок 4.5 – Графіки часу затримки від кількості передаваємих пакетів (N – кількість пакетів за секунду)

Графік демонструє, що методика дозволяє зменшити час затримки в порівнянні з традиційними методиками від 5 до 9%.

4.2 Аналіз ефективності часового резервування при наявності обмеженої апріорної інформації

Наведемо деякі результати дослідження впливу резерву часу на показники ФС ІС з резервом часу різних класів, що отримані в 3 розділі. Вони дозволяють виявити окремі закономірності та властивості часового резервування при наявності обмеженої апріорної інформації про випадкові величини часу відновлення, проміжків часу між моментами надходження завдань та інших визначальних випадкових величин процесу функціонування ІС.

Виграш від введення резерву часу за середнім напрацюванням на відмову $V_{\bar{T}_н}$ і коефіцієнтом простою після зриву функціонування $V_{K_{пр}}$ можуть бути оцінені за допомогою співвідношень

$$V_{\bar{T}_н} = \frac{\bar{T}_н(t_д)}{\bar{t}_н} = \frac{1}{1-F_в(t_д)}\left(1 + \frac{\int_0^{t_д} \bar{F}_в(t)dt}{\bar{t}_н}\right), \tag{4.1}$$

$$V_{K_{пр}} = \frac{1-k_г}{1-K_г(t_д)} = \frac{1}{1-F_в(t_д)}, \tag{4.2}$$

де $\bar{t}_н = \int_0^\infty [1-F(t)]dt$ – середнє напрацювання на відмову об'єкта, $k_г$ – коефіцієнт готовності об'єкта, $K_г(t_д) = k_г + (1-q)(1-k_г)$ – коефіцієнт готовності системи з резервом часу.

Виграш у ФС $V_{\bar{T}_н}$ і $V_{K_{пр}}$ визначається в основному значенням $1/(1-F_в(t_д))$. При цьому $V_{K_{пр}}$ наближається до $V_{\bar{T}_н}$ і завжди менше цієї величини.

Використовуємо двосторонні оцінки функціонала $I(F_в) = F_в(t_д)$ для отримання гарантованих границь вимірювання $V_{K_{пр}}$ при $F_в(t) \in K_2$:

$$\inf_{F_в \in K_2} V_{K_{пр}} = \begin{cases} 1 \text{ при } 0 \le t_д < \bar{t}_в, \\ t_д/\bar{t}_в \text{ при } \bar{t}_в \le t_д < S_2/\bar{t}_в, \\ \frac{S_2 - 2t_д \cdot \bar{t}_в + \bar{t}_д^2}{S_2 - \bar{t}_в^2} \text{ при } t_д \ge S_2/\bar{t}_в, \end{cases} \tag{4.3}$$

тоді як $\sup_{F_в \in K_2} V_{K_{пр}} = \infty$ у всій області зміни параметрів. Графіки отриманих залежностей зображені на рисунку 4.6.

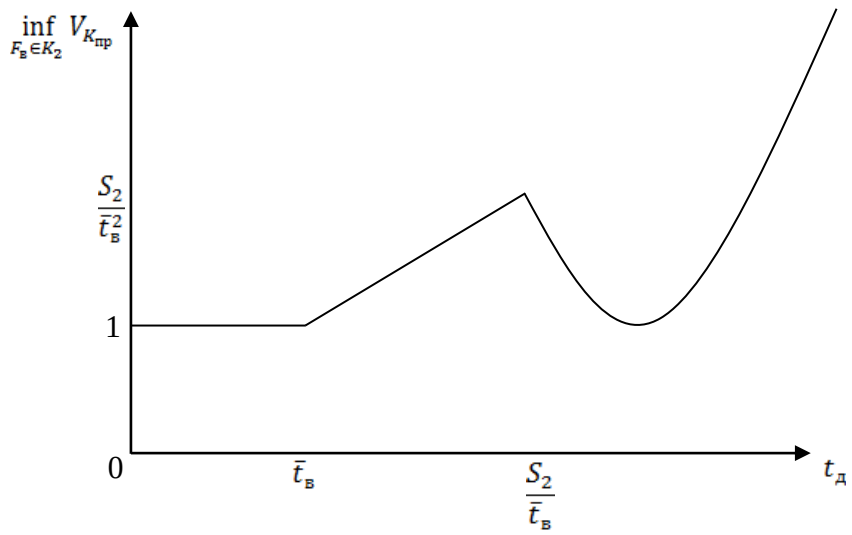

Рисунок 4.6 – Графіки залежностей гарантованої границі $\inf\limits_{F_в \in K_2} V_{K_{пр}}$

Аналіз показує, що при $F_в(t) \in K_2$ гарантовані значення виграшу від введення резерву часу лежать вище графіку (рис. 4.6), тому при наявності обмеженої апріорної інформації (при фіксованих тільки початкових моментах $\bar{t}_в$ і S_2 функції розподілу $F_в(t)$) доцільність введення резерву часу визначається не стільки величиною допустимого часу $t_д$, скільки співвідношенням параметрів $t_д$, $\bar{t}_в$ і S_2.

Про вплив резерву часу на середній час відновлення ІС можна судити за графіками (рис. 4.7). При експоненційному розподілі часу відновлення $t_в$ з параметрами $\bar{t}_в = 1/\mu$, $S_2 = \sigma^2 \bar{t}_в^2$ значення середнього часу відновлення робочої системи $\bar{T}_в(t_д)$ і об'єкта $\bar{t}_в$ збігаються (лінія 1), тобто в цьому випадку резерв часу не впливає на показники ремонтопридатності системи. При законах розподілу $F_в(t)$, відмінних від експоненційних, середній час відновлення ІС зі збільшенням резерву часу може зменшуватися або збільшуватися від початкового значення $\bar{t}_в$ (при $t_д = 0$). Це пояснюється тим, що апріорна інформація про функції розподілу $F_в(t)$ обмежена знанням тільки $\bar{t}_в$ і S_2, а вид цієї функції розподілу не фіксується (тобто це може бути функція розподілу зі зростаючою функцією інтенсивності [76, 92] або інших видів.

Двосторонні оцінки

$$\min_{F_в \in K_2} \bar{T}_в(t_д)/\bar{t}_в = \begin{cases} 1 - t_д/\bar{t}_в \text{ при } 0 \le t_д < \bar{t}_в, \\ 0 \text{ при } t_д \ge \bar{t}_в, \end{cases} \qquad (4.4)$$

$$\max_{F_в \in K_2} \bar{T}_в\,(t_д)/\bar{t}_в = \begin{cases} \frac{S_2 - 2\cdot\bar{t}_в\cdot t_д + t_д^2}{\bar{t}_в(\bar{t}_в - t_д)} \text{ при } 0 \le t_д < \bar{t}_в, \\ \infty \text{ при } t_д \ge \bar{t}_в, \end{cases} \quad (4.5)$$

дозволяють зробити висновок про гарантовані значення $T_в\,(t_д)/\bar{t}_в$, які можуть бути більше 1 до верхньої границі (крива 2) і менше 1 до нижньої границі (крива 3).

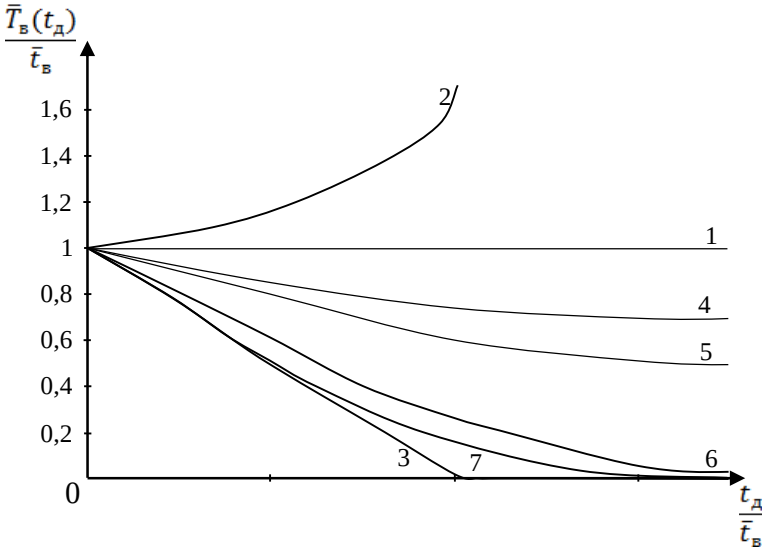

Рисунок 4.7 – Вплив резерву часу на середній час відновлення ІС

На практиці при $\bar{t}_н \gg M_{\min}(t_в, t_д)$ напрацювання системи на відмову може бути оцінено за допомогою наближеної формули [74]:

$$\bar{T}_н(t_д) \approx t_н/q. \quad (4.6)$$

Однак при $F_в(t) \in K_2$ гарантовані двосторонні границі змін похибки цієї формули при $t_д = const$ істотно залежать від співвідношення величини $t_д$, $\bar{t}_в$ і S_2 (рис. 4.8). При збільшенні відношення $t_д/t_в$ (або $t_д$ при $\bar{t}_в = const$) похибка формули (4.6) збільшується від 0 до ∞, тому при $t_д/\bar{t}_в > 0{,}5$ розрахунки середнього напрацювання ІС з резервом часу на відмову необхідно проводити по точній формулі [74]:

$$T_н(\tau_д) = \frac{1}{q}\left[\bar{t}_н + M_{\min}(t_в, t_д)\right]. \quad (4.7)$$

При випадковому режимі використання об’єктів резерв часу обумовлюється характером надходження завдань. Дослідимо відоме розрахункове співвідношення для середнього часу до першої відмови системи [74]:

$$T_0(z) = (\mu+\lambda)\bar{z}/\lambda\left[1-\int_0^\infty e^{-(\mu+\lambda)t}dt\right], \quad (4.8)$$

де z – резерв часу, який визначається випадковим характером надходження завдань $\bar{z} = \int_0^\infty tdA(t)$; $A(t)$ – функція розподілу проміжків часу між моментами надходження завдань; λ, μ – параметри експоненційних законів розподілу перебування об'єкта в працездатному і непрацездатному стані відповідно.

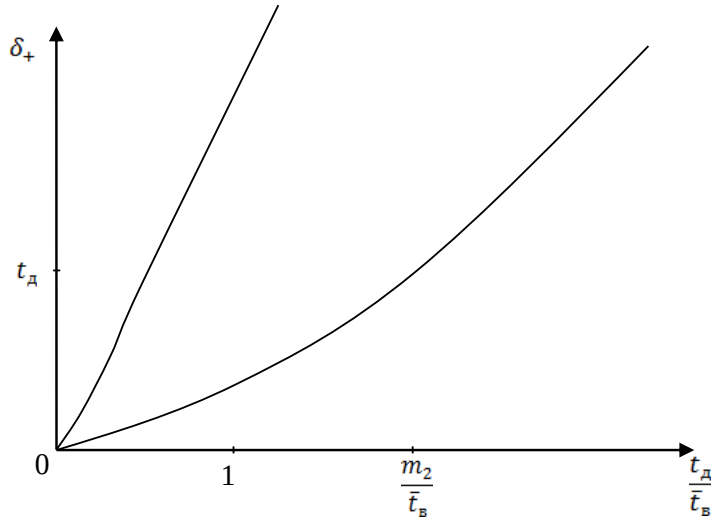

Рисунок 4.8 – Графіки залежності похибки напрацювання системи на відмову

Використовуючи двосторонні оцінки функціонала

$$I(A) = \int_0^\infty \exp(-(\mu+\lambda)t)dA(t),$$

де $A(t) \in M_2$ – клас функцій розподілу з першим $U_1 = \int_0^\infty xdA(t) = \bar{z}$ і другим $U_2 = \int_0^\infty x^2 dA(t)$ початковими моментами.

Після перетворень отримаємо формули для нижньої і верхньої гарантованих границь зміни середнього часу до першої відмови системи від величини z:

$$\min_{A\in M_2} T(z) = \frac{U_1(\mu+\lambda)}{\lambda\left[1-\exp\left(-\frac{(\mu+\lambda)}{U_1}\right)\right]}, \quad (4.9)$$

$$\max_{A\in M_2} T(z) = \frac{U_1(\mu+\lambda)}{\frac{\lambda/\mu}{U_2(U_1\mu)^2}[U_1^4+\exp(-(\mu+\lambda)U_1U_2)]}. \quad (4.10)$$

4.3 Визначення величини резерву часу для системи передачі даних при неповній інформації

Розглянемо систему передачі даних за допомогою якої здійснюється обмін інформацією між територіально розосередженими об’єктами. У реальних умовах функціонування на систему передачі даних впливають різного роду дестабілізуючі фактори внаслідок чого виникають затримки передачі інформації [32].

Для компенсації шкідливого впливу цих факторів у системі передачі даних передбачено різні види резервування: функціональне, шляхом введення додаткових (резервних) елементів, інформаційне резервування та часове резервування (коли передбачається наявність деякого допустимого часу затримки в передачі інформації, при якому відмова об’єкта (каналу зв’язку) не призводить до відмови системи – зриву її функціонування.

Розглянемо систему передачі даних, що включає в себе один основний $(n = 1)$ і один резервний $(m = 1)$ ідентичні канали зв’язку. Розглядається задача вибору величини резерву часу $t_{\text{д}}$, призначуваного системі, за умови, що час підключення резервного каналу замість відмовившого основного (контроль передбачається ідеальним) $t_{\text{п}}$ є випадковою величиною з невідомою функцією розподілу $F_{\text{п}}(t) = P\{t_{\text{п}} < x\}$, але заданими (фіксованими) першими двома моментами. Ця задача формулюється як мінімаксна, тобто задача мінімізації витрат (з точки зору часу відсутності передачі інформації) при використанні даної системи передачі даних у разі найгіршого (максимізує ці витрати) розподілу часу підключення резервного каналу.

Нехай час підключення – випадкова величина $t_{\text{п}}, 0 \le t_{\text{п}} \le T_{\text{п}}$ ($T_{\text{п}}$ – максимальний час підключення, величина якого визначається кваліфікацією обслуговуючого персоналу, укомплектованістю відповідною апаратурою та іншими факторами $0 \le T_{\text{п}} < \infty$) з невідомою функцією розподілу $F_{\text{п}}(x)$. Відомо тільки, що функція розподілу $F_{\text{п}}(x)$ належить класу функцій розподілу K_2:

$$K_2 = \left\{ \begin{matrix} F_{\text{п}}(0) = 0, F_{\text{п}}(T_{\text{п}}) = 1, \int_0^{T_{\text{п}}} x dF_{\text{п}}(x) = S_1, \\ \int_0^{T_{\text{п}}} x^2 dF_{\text{п}}(x) = S_2,\ 0 \le S_1 < T_{\text{п}},\ S_1^2 < S_2^0 < S_1 \cdot T_{\text{п}} \end{matrix} \right\}. \quad (4.11)$$

Вважаємо, що максимальний резервний час $t_{\text{д}}$ дорівнює часу підключення $\left(0 \le t_{\text{д}} \le T_{\text{п}}\right)$. Задані величини: q – ймовірність того, що задача з передачі інформації не буде виконана через наявність невикористаного надлишково призначеного резервного часу; p – ймовірність невиконання задачі через дефіцит резервного часу, $p \ge 0$.

Тоді середні втрати MR (непродуктивна витрата часу через відсутність передачі інформації) при експлуатації системи (M – символ математичного сподівання):

$$MR = q \cdot \int_0^{t_{\text{д}}} \left(t_{\text{д}} - x\right) dF_{\text{п}}(x) + p \int_{t_{\text{д}}}^{T_{\text{п}}} \left(x - t_{\text{д}}\right) dF_{\text{п}}(x) =$$

$$= (p+q) \cdot \int_0^{t_{\text{д}}} \left(t_{\text{д}} - x\right) dF_{\text{п}}(x) + p\left(S_1 - t_{\text{д}}\right). \quad (4.12)$$

Задача полягає у визначенні оптимального розміру резерву часу

$$t_{\text{д}} = \arg\min_{t_{\text{д}}} \sup_{F_{\text{п}} \in K_2} MR \quad (4.13)$$

в залежності від параметрів $q, p, T_{\text{п}}, S_1, \delta^2 = S_2 - S_1^2$. Визначимо спочатку точні верхні оцінки середніх втрат. Тоді справедливі оцінки функціонала

$$I(F_{\text{п}}) = \int_0^{t_{\text{д}}} \left(t_{\text{д}} - x\right) dF_{\text{п}}(x). \quad (4.14)$$

Оцінка 1. При $t_{\text{д}} \in [0, S_2/2S_1]$

$$\sup_{F_{\text{п}} \in K_2} I(F_{\text{п}}) = t_{\text{д}} \cdot \delta^2 / S_2 \quad (4.15)$$

досягається на двосхідчастій функції розподілу $F_{\text{п}1} \in K_2$ з точками росту $x_1 = 0$ і $x_2 = S_2/S_1$.

Оцінка 2. При $t_{\text{д}} \in [S_2/2S_1\,, A]$, де $A = (T_{\text{п}}^2 - S_2)/2(T_{\text{п}} - S_1)$,

$$\sup_{F_{\text{п}} \in K_2} I(F_{\text{п}}) = \frac{1}{2}\left(t_{\text{д}} - S_1 + \sqrt{t_{\text{д}}^2 - 2t_{\text{д}}S_1 + S_2}\right) \quad (4.16)$$

досягається на двосхідчастій функції розподілу $F_{\text{п}} \in K_2$ з точками росту $x_1^{\circ} = t_{\text{д}} - \sqrt{\left(t_{\text{д}} - S_1\right)^2 + \sigma^2}$, $x_2^{\circ} = t_{\text{д}} + \sqrt{\left(t_{\text{д}} - S_1\right)^2 + \sigma^2}$.

Оцінка 3. При $t_д \in (A, T_п)$

$$\sup_{F_п \in K_2} I(F_п) = (T_п - S_1) \cdot \frac{t_д \cdot T_п - S_1(t_д + T_п) + S_2}{T_п^2 - 2T_п - S_1 + S_2} \tag{4.17}$$

досягається на двосхідчастій функції розподілу $F_{п3} \in K_2$ з точками росту $y_1 = (S_1 T_п - S_2)/(T_п - S_1)$, $y_2 = T_п$.

При $T_п = \infty$ справедливі оцінки 1 і 2 з заміною в них $T_п$ на ∞.

Із оцінок 1–3 отримаємо найбільші середні втрати в залежності від $t_д$:

при $0 \le t_д < S_2/2S_1$

$$\sup_{F_п \in K_2} MR = (q\delta^2 - p \cdot S_1^2)/S_2 + p \cdot S_1 = \Phi_1(t_д),$$

при $S_2/2S_1 \le t_д < A$

$$\sup_{F_п \in K_2} MR = \frac{p+q}{2}\left(t_д - S_1 + \sqrt{(t_д - S_1)^2} + \sigma^2 + p(S_1 - t_д)\right) = \Phi_2(t_д),$$

при $A \le t_д < T_п$

$$\sup_{F_п \in K_2} MR = (p+q)(T_в - S_1) \cdot \frac{t_д \cdot T_п - S_1(t_д + T_п) + S_2}{T_п^2 - 2T_п \cdot S_1 + S_2} + p(S_1 - t_д) = \Phi_3(t_д).$$

Таким чином отримано розбиття області параметрів, що входять в задачу, на підобласті, кожній з яких відповідає свій екстремальний розподіл. Це дозволяє здійснити подальшу мінімізацію найбільших середніх втрат $\Phi_i(t_д)$, $i = \overline{1,3}$ по $t_д$.

При умові $q/p < \delta^2/(T_п - S_1)^2$

$$\min\Phi_1 = (q \cdot \delta^2 + p \cdot S_1^2)/2S_1,$$
$$\min\Phi_2 = [q(T_п - S_1)^2 + pS_1^2]/2(T_п - S_1),$$
$$\min\Phi_3 = q(T_п - S_1).$$

При умові $\delta^2/(T_п - S_1)^2 < q/p < S_1/\delta^2$

$$\min\Phi_1 = (q \cdot \delta^2 + p \cdot S_1^2)/2S_1,$$
$$\min\Phi_2 = \delta \cdot \sqrt{pq},$$
$$\min\Phi_3 = [q(T_п - S_1)^2 + p \cdot \delta^2]/2(T_п - S_1).$$

При умові $q/p > S_1^2/\delta^2$

$$\min\Phi_1 = p \cdot S_1,$$
$$\min\Phi_2 = (q \cdot \delta^2 + p \cdot S_1^2)/2S_1,$$

$$\min\Phi_3 = [q(T_п - S_1)^2 + p \cdot \delta^2]/2(T_п - S_1).$$

Порівняння цих мінімумів показує, що найменші гарантовані значення середніх втрат:

за умови $0 < q/p < \delta^2(T_п - S_1)^2$ досягаються при $t_д = T_п$ і дорівнюють $q(T_п - S_1)$;

за умови $\delta^2/(T_п - S_1)^2 < q/p < S_1^2/\delta^2$ досягаються при $t_д = S_1 + (p+q)\frac{\delta}{2} \cdot \sqrt{pq}$ і дорівнює $\delta\sqrt{pq}$;

за умови $q/p > S_1^2/\delta^2$ досягається при $t_д = 0$ і дорівнює $p \cdot S_1$.

При $T_п = \infty$ оптимальними правилами вибору величини резерву часу $t_д$ є наступне: $t_д = 0$ при $q/p > S_1^2/\delta^2$; $t_д = S_1 + (p-q)\frac{\delta}{2}\sqrt{pq}$ при $S_1^2/\delta^2 > q/p$.

При цьому гарантується, що середні втрати при використанні системи передачі даних при будь-якій функції розподілу часу підключення $t_п$ із середнім значенням S_1 і дисперсією δ^2 будуть менше, ніж $p \cdot S_1$ при $t_д = 0$ і менше, ніж $\delta\sqrt{pq}$ при $t_д = S_1 + (p+q)\frac{\delta}{2}\sqrt{pq}$.

Таким чином, при наявності обмеженої апріорної інформації про закон розподілу випадкової величини часу підключення працездатного резервного каналу замість основного, що відмовив, у даній системі передачі даних (коли відомі тільки його середнє значення S_1 і дисперсія δ^2) значення гарантованих найменших втрат при використанні системи за призначенням і величина резерву часу визначаються на підставі зіставлення величин вагових коефіцієнтів q, p і параметрів $T_п$, S_1, δ^2.

4.4 Висновки до розділу 4

1. Для визначення ефективності методики забезпечення функціональної стійкості віртуального хмарного середовища на основі програмно-конфігурованих мереж розроблено віртуальне хмарне середовище тестування мережі за допомогою лабораторної бази Державного університету телекомунікацій. Тестування мережі

показало, що застосування методики дозволяє зменшити час затримки в порівнянні з традиційними методиками від 5 до 9%.

2. Проведено аналіз ефективності часового та структурного резервування при наявності обмеженої інформації при визначенні функції розподілу випадкових величин. Обґрунтовані межі коректного застосування математичних моделей функціональної стійкості інформаційних систем.

3. Отримані результати теоретичних досліджень мають прикладний характер і володіють достатнім ступенем точності. Це дозволяє їх використовувати при визначені прогнозованих оцінок показників ФС ІС для обґрунтування гарантованого висновку про те, що ІС відповідає заданим вимогам.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі відповідно до поставленої мети, на основі теоретичних та практичних досліджень розв’язано важливе науково-технічне завдання, а саме розробка методики забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем на основі програмно-конфігурованих мереж.

Отримані в дисертаційній роботі результати мають вагоме наукове значення й можуть бути використані на стадії проектування та експлуатації інформаційних систем в умовах апріорної невизначеності інформації про функції розподілу визначальних випадкових величин. Вони служать обґрунтуванням передбачуваних показників функціональної стійкості інформаційних систем.

У процесі теоретичних і практичних досліджень у дисертаційній роботі отримані наступні науково-практичні результати:

1. Проведені дослідження сучасних інформаційних систем показали наявність тенденції збільшення кількості цілей, що стоять перед ІС, і в свою чергу до функціональної стійкості ІС. Перелік і ускладнення завдань в ІС потребує аналізу та визначення вимог, які необхідно враховувати при побудові ІС.

2. Досліджено стан функціональної стійкості інформаційних систем. Показано, що необхідно підготувати альтернативні варіанти рішень щодо забезпечення необхідного рівня функціональної стійкості для зниження ступеня ризику в проблемних зонах функціонування інформаційних мереж та спрогнозувати можливі події, які можуть суттєво вплинути на побудову мережі.

3. Визначено, що фундаментом для забезпечення таких задач виступає технологія SDN, яка відкриває перспективи для вирішення проблем в ІС, що дозволить телекомунікаційним компаніям отримати незалежне управління усією мережею і значно спростить експлуатацію мереж та вартість її обслуговування.

4. Удосконалено математичну модель системи передачі даних, яка враховує тип пакетів, що передаються, і дозволяє визначити максимальний час затримки каналу та оцінити ефективність, що досягається за рахунок використання пріоритетного управління трафіком.

5. Розроблено математичні моделі функціональної стійкості інформаційних систем з часовим резервуванням при моментних обмеженнях на функції розподілу випадкових величин і дозволяють визначити гарантовані оцінки показників функціональної стійкості.

6. Розроблено методику забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем на основі програмно-конфігурованих мереж, що ґрунтується на визначенні гарантованих оцінок показників функціональної стійкості системи передачі даних, враховує резерв часу, режими роботи інформаційних систем та дозволяє визначати верхні та нижні оцінки показників функціональної стійкості.

7. Проведена практична реалізація розробленої методики забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем на основі програмно-конфігурованих мереж. Для цього розроблено віртуальне хмарне середовище тестування мережі на основі лабораторної бази Державного університету телекомунікацій. Тестування мережі показало, що застосування методики дозволяє зменшити час затримки в порівнянні з традиційними методиками від 5 до 9%.

8. Отримані результати теоретичних та практичних досліджень мають прикладний характер і володіють достатнім ступенем точності. Це дозволяє їх використовувати при визначені прогнозованих оцінок показників ФС ІС для обґрунтування гарантованого висновку про те, що ІС відповідає заданим вимогам.

Виходячи з отриманих у дисертаційній роботі на тему “Методика забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем на основі програмно-конфігурованих мереж” нових наукових і практичних результатів, наукових праць опублікованих у періодичних наукових виданнях інших держав, які входять до Організації економічного співробітництва та розвитку та/або Європейського Союзу, наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України, реалізації та апробації мета дисертаційної роботи досягнута, а науково-прикладне завдання вирішено.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про стандартизацію: Закон України від 05.06.2014 № 1315-VII (Редакція від 01.12.2020)

2. Про захист інформації в інформаційно-телекомунікаційних системах: Закон України від 05.07.1994 № 80/94-ВР (Редакція від 04.07.2020).

3. Міжнародний стандарт ISO/IEC 2382:2015 Information technology – Vocabulary. – Режим доступу: https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-iec:2382:ed-1:v1:en

4. Міжнародний стандарт ISO/IEC 2382-36:2019 Information technology – Vocabulary – Part 36: Learning, education and training. – Режим доступу: https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-iec:2382:-36:ed-3:v1:en

5. Алгоритм прогнозування для показників надійності і вартості експлуатації об'єктів радіоелектронних засобів озброєння / С. В. Лєнков, Г. В. Банзак, В. М. Цицарєв, Я. М. Проценко // Системи обробки інформації. – 2016. – № 9(146). – С. 28–30.

6. Аналіз застосування мереж Петрі для підтримки функціональної стійкості інформаційних систем / О. В. Барабаш, Н. В. Лукова-Чуйко, А. П. Мусієнко, О. Ю. Ільїн // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – К.: ДУТ, 2018. – № 1. – С. 11–18.

7. Аналіз методів керування мережею / В. В. Вишнівський, Г. І. Гайдур, К. П. Сторчак, Є. В. Прилєпов, В. В. Василенко // Зв'язок. – К., 2016. – № 3. – С. 9–12.

8. Аналіз основних підходів та етапів щодо забезпечення властивості функціональної стійкості інформаційних систем підприємства / В. В. Собчук, О. В. Барабаш, А. П. Мусієнко, О. А. Лаптєв // Sciences of Europe. – Praha, 2019. – Vol 1, No 42. – PP. 41–44.

9. Барабаш О.В. Основні поняття функціональної стійкості бездротової сенсорної мережі / О. В. Барабаш, А. П. Мусієнко // Актуальні проблеми інформаційних технологій: Науково-технічної конференції молодих учених. – К.: КНУ, 2017. – С. 39–40.

10. Барабаш О.В. Забезпечення функціональної стійкості критичних інформаційних систем на основі системного використання методів аналізу та синтезу / О. В. Барабаш, Д. П. Пашков, О. М. Горський // Стандартизація. Сертифікація. Якість. – К., 2016. – № 4(101). – С. 65–72.

11. Барабаш О.В. Понятійний апарат функціональної стійкості розподілених інформаційно-керуючих систем / О. В. Барабаш, С. В. Козелков, О. А. Машков // Збірник наукових праць НЦ ВПС ЗС України. – К., 2005. – Вип. № 7. – С. 87–95.

12. Барабаш О.В. Построение функционально устойчивых распределенных информационных систем / О. В. Барабаш. – К.: НАУ, 2004. – 226 с.

13. Березовская Ю.В. Модель смешанного технического обслуживания (ТО) сложных объектов радиоэлектронной техники: ТО по ресурсу и ТО по состоянию / Ю. В. Березовская, В. Н. Цыцарев // Молодіжна військова наука у Київському національному університеті імені Тараса Шевченка: Тези доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених, ад'юнктів, слухачів, курсантів і студентів, 24 квітня 2015 року. – К.: ВІКНУ, 2015. – С. 61.

14. Березовська Ю.В. Забезпечення функціональної стійкості інформаційної системи при обмеженій вихідній інформації про визначальні випадкові величини / Ю. В. Березовська // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – К.: ДУТ, 2020. – № 4(69). – С. 69–78.

15. Березовська Ю.В. Інформаційні системи безперервного використання з часовим резервуванням / Ю. В. Березовська // Сучасні досягнення компанії Hewlett Packard Enterprise в галузі ІТ та нові можливості їх вивчення і застосування: тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції, 16 грудня 2020 р. – К.: ДУТ, 2020. – С. 6–8.

16. Беркман Л.Н. Розробка інформаційної технології для синтезу високоефективних систем технічного діагностування інформаційних систем / Л. Н. Беркман, В. В. Вишнівський // Системи управління, навігації та зв'язку. – П.: ПНТУ. – 2015. – Вип. 4(36). – С. 58–63.

17. Бойченко О.В. Автоматизація управлінських рішень в інформаційно-телекомунікаційних системах спеціального призначення: монографія /

О. В. Бойченко, В. П. Квасніков. – Сімф.: ДІАЙПІ, 2011. – 291 с.

18. Використання методу експертних оцінок для вибору стандарту безпроводової корпоративної мережі доступу / К. П. Сторчак, І. М. Срібна, Л. А. Кирпач, Г. І. Гайдур // Зв'язок. – К., 2014. – № 5(111). – С. 9–16.

19. Вишнівський В.В. Якість обслуговування у мережах наступного покоління / В. В. Вишнівський, Г. І. Гайдур, Є. В. Прилєпов // Тенденции развития конвергентных сетей: решения пост-NGN, 4G и 5G (м. Київ, 17-18 листопада 2016 р.): тезисы докладов регионального семинара МСЭ. – К.: ДУТ, 2016. – С. 8–9.

20. Вишнівський В.В. Діагностування аналогових і цифрових пристроїв радіоелектронної техніки: монографія / В. В. Вишнівський, М. К. Жердєв, С. В. Лєнков, В. О. Проценко; під ред. Жердєва М.К., Лєнкова С.В. – К.: ТОВ "Компанія ЛІК", 2009. – 224 с.

21. Вишнівський В.В. Інтеграція SDN рішення в існуючі комп'ютерні мережі / В. В. Вишнівський, Є. В. Прилєпов // Перша Міжнародна Науково-технічна конференція «Сучасні інформаційно-телекомунікаційні технології». – К., 2015. – С. 18.

22. Гайдур Г.І. Використання віртуалізації серверів в ІТ інфраструктурі / Г. І. Гайдур, І. П. Бабчаник // Проблеми інформатизації: тези доповідей п'ятої міжнародної науково-технічної конференції (м. Київ, 11–12 квітня 2017 р.): тези доповідей. – К.: ДУТ, 2017. – С. 13.

23. Гайдур Г.І. Майбутнє мереж – SDN / Г. І. Гайдур // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава, 2015. – Вип. 1(33). – С. 92–95.

24. Гайдур Г.І. Методика визначення економічної доцільності обслуговування інтелектуальної інформаційної системи в умовах апріорної невизначеності / Г. І. Гайдур // Сучасний захист інформації. – К., 2017. – № 4(32). – С. 9–13.

25. Гайдур Г.І. Послуги мереж майбутнього / Г. І. Гайдур, О. С. Григорьева // Проблеми інформатизації: тези доповідей п'ятої міжнародної науково-технічної конференції (м. Київ, 11-13 грудня 2015 р.). – К.: ДУТ, 2015. – С. 41.

26. Гистограммный способ генерирования случайных чисел в задачах

исследования надежности / С. В. Ленков, А. В. Селюков, В. О. Браун, В. Н. Цыцарев, Ю. В. Березовская // Інформатика та математичні методи в моделюванні. – Одеса, 2013. – Т. 3, № 1. – С. 43–49.

27. Гнеденко Б.В. Математические методы в теории надежности / Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. – М. : Наука, 1965. – 524 с.

28. Гніденко М.П. Побудова SDN мереж: навчальний посібник / М. П. Гніденко, В. В. Вишнівський, О. О. Ільїн. – К.: ФОП Гуляєва В.М., 2019. – 190 с.

29. Гніденко М.П. Конвергентна мережна інфраструктура: навчальний посібник / [М. П. Гніденко та ін.]. – К.: ФОП Гуляєва В.М., 2019. – 180 с.

30. Гніденко М.П. Перспективні компоненти та засоби інфокомунікаційних технологій: навчальний посібник / М. П. Гніденко, Г. І. Гайдур, С. О. Сєрих. – К.: ДУТ, 2017. – 168 с.

31. Деякі практичні аспекти реалізації мультипрограмного вирішення балансування навантаження на сервери інформаційного ресурсу / О. О. Ільїн, Д. С. Коваленко, М. П. Гніденко, Ю. В. Березовська // Зв'язок. – К., 2019. – № 2(138). – С. 17–22.

32. Дослідження та аналіз пропускної здатності каналів передачі в телекомунікаціях / Ю. В. Хмельницький, В. О. Браун, Ю. В. Березовська, О. А. Філіпчук // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К., 2016. – № 52. – С. 147–152.

33. Дружинин Г.В. Надежность автоматизированных систем / Г. В. Дружинин. – М. : Энергия, 1977. – 536 с.

34. Дурняк Б.В. Програмне забезпечення для математичного моделювання функціонально-стійких інформаційно-керуючих комплексів динамічних об'єктів / Б. В. Дурняк, О. А. Машков, В. Р. Косенко // Моделювання та інформаційні технології: Зб. наук. пр. – К.: ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України, 2010. – Вип. 57. – С. 201–217.

35. Ермаков А.А. Основы надежности информационных систем : учеб.

пособие / А. А. Ермаков. – Иркутск : ИрГУПС, 2006. – 151 с.

36. Забезпечення функціональної стійкості системи управління центру обробки даних / В. В. Василенко, Ю. В. Березовська, Р. В. Космінський, Ю. В. Каргаполов // Проблеми інформатизації: Матеріали тринадцятої міжнародної науково-технічної конференції, 11-12 квітня 2019 р. – К.: ДУТ, 2019. – С. 167.

37. Зубарев В.В. Математические методы и прогнозирования технических показателей эксплуатационных свойств радиоэлектронных систем / В. В. Зубарев, А. П. Ковтуненко, Л. Г. Раскин – К.: Книжное изд-во НАУ, 2005. – 184 с.

38. Інформаційна технологія управління: монографія / [О.О. Ільїн та ін.]. – К.: ПВП "ЗАДРУГА", 2017. – 296 с.

39. Карповский Е.Я. Надежность программной продукции / Е. Я. Карповский, С. А. Чижов. – К.: Техніка, 1990. – 159 с. – ISBN 5-335-00586-6.

40. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями / Л. Клейнрок. – М.: Мир, 1979. – 600 с.

41. Ковтуненко А.П. Математическое моделирование в задачах исследования надежности технических систем / А. П. Ковтуненко, В. В. Зубарев, А. А. Зверев. – К.: Книжное изд-во НАУ, 2006. – 236 с.

42. Креденцер Б.П. Влияние характеристик контроля на надежность систем с временной избыточностью / Б. П. Креденцер, С. В. Ленков, О. Н. Шинкарук // Труды четвертой научно-практической конференции "Современные информационные и электронные технологии". – Одесса, 2003. – С. 172.

43. Креденцер Б.П. Двосторонні оцінки коефіцієнта готовності системи з часовим резервуванням при обмеженій інформації про тривалість періодичного контролю / Б. П. Креденцер, М. К. Жердєв, В. В. Вишнівський // Збірник наукових праць № 1. – К.: ВІТІ НТУУ "КПІ". – 2007. – С. 73-77.

44. Креденцер Б.П. Двосторонні оцінки показників надійності систем з почасовою надмірністю при обмеженій інформації про тривалість відновлення / Б. П. Креденцер, М. К. Жердєв, В. В. Вишнівський // Збірник наукових праць. – К.: ВІТІ НТУУ "КПІ", 2007. – № 2. – С. 67–72.

45. Креденцер Б.П. Модель надійності складної системи зі структурною надмірністю та комбінованим резервом часу / Б. П. Креденцер // Збірник наукових праць– К.: ВІТІ НТУУ “КПІ”, 2006. – № 2. – С. 45-52.

46. Креденцер Б.П. Определение минимаксных значений функционалов, характеризующих качество технического обслуживания систем с временным резервированием / Б. П. Креденцер, В. В. Вишневский, Д. И. Могилевич / Сучасна спеціальна техніка. – К., 2012. – № 4(31). – С. 98–108.

47. Креденцер Б.П. Оптимізація періодичності обслуговування технічних об’єктів в процесі експлуатації з урахуванням неповної інформації про безвідмовність почасової надмірності / Б. П. Креденцер, О. П. Волох, В. І. Кривцун // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К., 2006. – Вип. № 4. – С. 57–64.

48. Креденцер Б.П. Оценка эксплуатационно-технических характеристик объектов телекоммуникаций при априорной неопределенности: монография / Б. П. Креденцер, Д. И. Могилевич, А. И. Миночкин // Под научной редакцией Б.П. Креденцера. – К.: Феникс, 2012. – 332 с.

49. Креденцер Б.П. Оцінка виграшу в надійності при комплексному використанні надлишковості в об’єктах телекомунікацій / Б. П. Креденцер, Д. І. Могилевич, І. В. Кононова // Збірник наукових праць ВІТІ. – К., 2017. – Вип. 2. – С. 48–57.

50. Креденцер Б.П. Урахування почасової надмірності та неповної інформації про безвідмовність техніки тривалого зберігання під час розрахунку періодичності технічного обслуговування / Б. П. Креденцер, В. І. Кривцун // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Військово-спеціальні науки. – К., 2005. – Вип. 10. – С. 22–26.

51. Кучук Г.А. Інформаційні технології управління інтегральними потоками даних в інформаційно-телекомунікаційних мережах систем критичного призначення: монографія / Г. А. Кучук. – Х.: ХУПС, 2013. – 264 с.

52. Ленков С.В. Принципы и методы построения математических моделей резервированных систем / С. В. Ленков, Б. П. Креденцер, В. В. Зубарев // Труды

четвертой научно-практической конференции “Современные информационные и электронные технологии”. – Одесса, 2003. – С. 169.

53. Математична модель функціонально стійкої безпровідної сенсорної мережі / А. В. Собчук, М. О. Коваль, Ю. В. Кравченко, О. В. Барабаш // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава, 2017. – Том 6, № 46. – С. 122–126.

54. Математичне моделювання топологій мереж VANET / В. В. Вишнівський, О. В. Зінченко, Ю. В. Березовська, М. Ю. Березівський // The scientific heritage. – Budapest, Hungary, 2021. – Vol. 1, No. 59. – PP. 26–29.

55. Машков О.А. Проблеми моделювання функціонально-стійких складних інформаційних систем / О. А. Машков, О. В. Барабаш // Інформаційне моделювання складних систем. – К., 2002. – С. 137–142.

56. Машков О. Оцінка функціональної стійкості розподілених інформаційно-керуючих систем / О. Машков, О. Барабаш // Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології. – Львів, 2005. – Вип. 1. – С. 159–165.

57. Машков О.А. О функциональной устойчивости бортовых информационно управляющих комплексов / О. А. Машков // Вопросы повышения эффективности и качества систем управления полетом и навигации воздушных судов. – К. : КИИГА, 1990. – С. 79–83.

58. Машков О.А. Прийняття управлінських рішень в складних організаційних системах з погляду системного підходу (частина 1) (вступ) / О. А. Машков, В. Р. Косенко // Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. – К.: ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України, 2010. – Вип. 55. – С. 131–148.

59. Машков О.А. Современные проблемы развития теории функционально устойчивых сложных систем управления / О. А. Машков, О. В. Самчишин // Моделювання та інформаційні технології: Зб. наук. пр. – К.: ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України, 2009. – Вип. 52. – С. 3–11. – Режим доступу: http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/29640/01-Mashkov.pdf?sequence=1

60. Машков О.А. Шляхи створення та дослідження функціонально-стійкої

моделі вимірювально-обчислювального комплексу / О. А. Машков, В. О. Чумакевич, В. А. Шуренок // Моделювання та інформаційні технології. – К., 2003. – Вип. 24 – С. 40–47.

61. Методика аналізу структурної функціональної стійкості розгалуженої інформаційної мережі / О. В. Барабаш, А. Ф. Конограй, І. П. Саланда // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – К.: ДУТ, 2017. – № 3. – С. 27–35.

62. Модели технического обслуживания систем с избыточностью: Монография / Б.П. Креденцер, С.В. Ленков, М.И. Резников, В.В. Зубарев / Под ред. Б.П. Креденцера. – К.: Фенікс, 2002. – 192 с.

63. Моделювання процесу відмов відновлюваних об’єктів з ієрархічною конструктивною структурою / Г. Б. Жиров, Є. С. Лєнков, В. М. Цицарєв, Я. М. Проценко // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К.: ВІКНУ, 2017. – Вип. № 55. – С. 30–40.

64. Мур Э.Ф. Надежные схемы из ненадежных реле / Э. Ф. Мур, К. Э. Шеннон // Работы по теории информации и кибернетике. – М.: Изд-во иностр. лит., 1963. – С. 114–153.

65. Надёжность информационных систем : учеб. пособие / [Ю. Ю. Громов и др.]. – Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2010. – 160 с.

66. Надійність систем з надлишковістю: методи, моделі, оптимізація: [монографія] / Б. П. Креденцер, О. М. Буточнов, А. І. Міночкін, Д. І. Могилевич. – К.: Фенікс, 2013. – 342 с.

67. Надійність систем неперервного використання з часовим і структурним резервуванням / С.В. Ленков, Б.П. Креденцер, В.В. Вишнівський, А.В. Краснік // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Військово-спеціальні науки. – К., 2006. – Вип. № 13. – С. 65–68.

68. Нейман Дж. Вероятностная логика и синтез надежных организмов из ненадежных компонент / Дж. Нейман // «Автоматы». – М.: Изд-во иностр. лит., 1956. – С. 68–139.

69. Никитюк Л.А. Проектирование корпоративной сети: учебн. пособ. /

Л. А. Никитюк, Д. Л. Комарницкий. – Одесса : ОНАС, 2006. – 163 с.

70. Орлов Є.В. Упровадження адаптивного управління програмно-конфігурованою мережею SDN / Є. В. Орлов, І. Е. Похабова // Зв'язок. – 2014. – №2(108). – С. 11–16.

71. Основи надійності та діагностики інформаційних систем: навчалний посібник / [В. В. Вишнівський та інші]. – К.: ФОП Гуляєва В.М., 2020. – 188 с.

72. Основні напрямки підвищення функціональної стійкості системи управління центру обробки даних / [В. В. Василенко, О. О. Ільїн, Ю. В. Березовська та ін.] // Зв'язок. – К., 2019. – № 1(137). – С. 35–39.

73. Особливості безпроводових самоорганізованих мереж / Г. О. Гринкевич, В. В. Жебка, В. В. Василенко, Ю. В. Березовська // Наукові записки УНДІЗ. – К., 2018. – № 4(52). – С. 40–45.

74. Оцінка надійності резервованих систем при обмеженій вихідній інформації : монографія / [Б. П. Креденцер та ін.] ; під наук. ред. д-ра техн. наук, проф. Б. П. Креденцера– К. : Фенікс, 2013. – 336 с.

75. Оцінка надійності телекомунікаційного обладнання мережі спеціального призначення з урахуванням збоїв / Б. П. Креденцер, Д. І. Могилевич, І. В. Кононова, І. О. Пантась // Збірник наукових праць [Військового інституту телекомунікацій та інформатизації]. – 2019. – Вип. 1. – С. 41–48.

76. Оцінка показників надійності інформаційних систем при обмеженій апріорній інформації / [В. В. Вишнівський, Ю. В. Каргаполов, Ю. В. Березовська та інші] // Sciences of Europe. – Praha, Czech Republic, 2021. – Vol. 1, No. 63. – PP. 8–14.

77. Підвищення ефективності застосування хмарних сервісів шляхом упровадження IEEE 802.11ax / В. В. Вишнівський, Ю. І. Катков, Ю. В. Каргаполов, Ю. В. Березовська, С. О. Благодир // Зв'язок. – К.: ДУТ, 2020. – № 5(147). – С. 3–11.

78. Планування телекомунікаційних мереж / Л. А. Кирпач, І. М. Срібна, К. П. Сторчак, Г. І. Гайдур // Зв'язок. – К., 2014. – № 4. – С. 12–15.

79. Пошивалов В.П. Системный подход к обеспечению надёжности сложных систем / В. П. Пошивалов, Ю. Ф. Даниев, Л. В. Резниченнко // Системні технології. – Дніпро, 2017. – Вип. 2. – С. 27–34.

80. Программное обеспечение методики определения оптимальных параметров системы технического обслуживания сложного восстанавливаемого объекта телекоммуникационной техники / С. В. Ленков, К. Ф. Боряк, Р. М. Салимов, В. Н. Цыцарев // Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. – К., 2009. – Т. 7, № 1. – С. 20–26.

81. Рябинин И.А. Логико-вероятностное исчисление как аппарат исследования надежности и безопасности структурно-сложных систем / И. А. Рябинин // Автоматика и телемеханика. – 2003. – № 7. – С. 178–186.

82. Саланда І.П. Система показників та критеріїв формалізації процесів забезпечення локальної функціональної стійкості розгалужених інформаційних мереж / І. П. Саланда, О. В. Барабаш, А. П. Мусієнко // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2017. – Вип. 1. – С. 122–126.

83. Система управління сучасними телекомунікаційними мережами : монографія / [В. Г. Кривуца, Л. Н. Беркман та ін.]. – К.: ДУІКТ, 2009. – 268 с.

84. Стеклов В.К. Оценка параметров системы управления интеллектуальной сети / В. К. Стеклов, Л. Н. Беркман // "Стратегія входження України у світовий інформаційний простір": праці науково-практичної конференції. – К.: 1997. – С. 82–84.

85. Стеклов В.К. Сучасні системи управління в телекомунікація: Моногр. / В. К. Стеклов, Б. Я. Костік, Л. Н. Беркман ; під ред. В. К. Стеклова – К.: Техніка, 2005. – 400 с.

86. Стеклов В.К. Телекомунікаційні мережі : Підруч. для студ. вищ. навч. закл. / В. К. Стеклов, Л. Н. Беркман. – К. : Техніка, 2001. – 390 с.

87. Стойкова Л.С. Наибольшая точная нижняя граница вероятности отказа системы в специальном интервале времени при неполной информации о функции распределения времени до отказа системы / Л. С. Стойкова // Кибернетика и системный анализ. – К., 2017. – Т. 53, № 2. – С. 65–73.

88. Стойкова Л.С. Точные нижние границы вероятности отказа системы в интервале времени при неполной информации о функции распределения времени до отказа системы / Л. С. Стойкова, С. Н. Красников // Кибернетика и системный

анализ. – К., 2016. – Т. 52, № 6. – С. 84–94.

89. Стрельников В.П. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем: монография / В. П. Стрельников, А. В. Федухин. – К. : Логос, 2002. – 486 с.

90. Сучасні системи управління в телекомунікаціях : Монографія / В. К. Стеклов, Б. Я. Костік, Л. Н. Беркман. – К. : Техніка, 2005. – 400 с.

91. Управління телекомунікаціями із застосуванням новітніх технологій: Підруч. для вищ. навч. закл. / [В. Г. Кривуца, В. К. Стеклов, Л. Н. Беркман та інші]. – К.: Техніка, 2007. – 383 с.

92. Функціональна стійкість інформаційних мереж при наявності обмеженої апріорної інформації про надійність / С. М. Іщеряков, С. В. Прокопов, Ю. В. Каргаполов, Ю. В. Березовська // Зв'язок. – К.: ДУТ, 2020. – № 6(148). – С. 64–68.

93. Шалимов А.В. SDN&NFV: Технологии SDN/OpenFlow [Електронний ресурс] / А. В. Шалимов. – Режим доступу: http://lvk.cs.msu.su/~sveta/SDN_OpenFlow_basics_lecture1.pdf

94. Якість обслуговування в мережах наступного покоління / В. В. Вишнівський, Г. І. Гайдур, Є. А. Прилєпов, К. П. Сторчак // Зв'язок. – 2016. – № 6. – С. 22–25.

95. An architecture for software defined wireless networking / [Carlos J. Bernardos and other] // IEEE Wireless Communications. – 2014. – 21(3) – PP. 52–61.

96. Materials of the official website Internet Engineering Task Force [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.ietf.org

97. Materials of the official website Internet Research Task Force [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://irtf.org

98. Materials of the official website International Telecommunication Union [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.itu.int

99. Materials of the official website Open Networking Foundation [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.opennetworking.org/

100. OpenFlow: enabling innovation in campus networks / [N. McKeown and other]

// ACM SIGCOMM Computer Communication Review. – 2008. – Vol. 38, № 2. – PP. 69–74.

101. Thomas D. Nadeau, Ken Gray. SDN: Software Defined Networks: An Authoritative Review of Network Programmability Technologies. – O'Reilly Media, 2013. – 384 p.

102. Tolubko V. Method for Determination of Cyber Threats Based on Machine Learning for Real-Time Information System // [V. Tolubko, V. Vyshnivskyi, V. Mukhin and other] // I.J. Intelligent Systems and Applications. – 2018. – № 8. – PP. 11–18. (Published Online August 2018 in MECS (http://www.mecs-press.org/) DOI: 10.5815/ijisa.2018.08.02).

103. Vasylenko V. Analysis of SDN for wireless handover platform / V. Vasylenko, V. Kuklov, G. Grynkevych : матеріали 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering // Telecommunications and Computer Science (TCSET) – Lviv : 23–26 Feb. 2016. – PP. 630–633. – DOI: 10.1109/TCSET.2016.7452136. [Електронний ресурс] – Режим доступу : http://ieeexplore.ieee.org/document/7452136/?reload=true.

104. William Stallings. Foundations Of Modern Networking: SDN, NFV, QoE, IoT, And Cloud. – United States: New Jersey, Wesley Educational Publishers, 2019. – 560 p.

Додаток А

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті в періодичних наукових виданнях інших держав, які входять до Організації економічного співробітництва та розвитку та/або Європейського Союзу

1. Березовська Ю.В. Оцінка показників надійності інформаційних систем при обмеженій апріорній інформації / [В. В. Вишнівський, Ю. В. Каргаполов, Ю. В. Березовська та інші] // Sciences of Europe. – Praha, Czech Republic, 2021. – Vol. 1, No. 63. – PP. 8–14.

2. Березовська Ю.В. Математичне моделювання топологій мереж VANET / В. В. Вишнівський, О. В. Зінченко, Ю. В. Березовська, М. Ю. Березівський // The scientific heritage. – Budapest, Hungary, 2021. – Vol. 1, No. 59. – PP. 26–29.

Статті в наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України

3. Березовська Ю.В. Функціональна стійкість інформаційних мереж при наявності обмеженої апріорної інформації про надійність / С. М. Іщеряков, С. В. Прокопов, Ю. В. Каргаполов, Ю. В. Березовська // Зв’язок. – К.: ДУТ, 2020. – № 6(148). – С. 64–68.

4. Березовська Ю.В. Забезпечення функціональної стійкості інформаційної системи при обмеженій вихідній інформації про визначальні випадкові величини / Ю. В. Березовська // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – К.: ДУТ, 2020. – № 4(69). – С. 69–78.

5. Березовська Ю.В. Підвищення ефективності застосування хмарних сервісів шляхом упровадження IEEE 802.11ax / В. В. Вишнівський, Ю. І. Катков, Ю. В. Каргаполов, Ю. В. Березовська, С. О. Благодир // Зв’язок. – К.: ДУТ, 2020. – № 5(147). – С. 3–11.

6. Березовська Ю.В. Деякі практичні аспекти реалізації мультипрограмного вирішення балансування навантаження на сервери інформаційного ресурсу / О. О. Ільїн, Д. С. Коваленко, М. П. Гніденко, Ю. В. Березовська // Зв'язок. – К., 2019. – № 2(138). – С. 17–22.

7. Березовська Ю.В. Основні напрямки підвищення функціональної стійкості системи управління центру обробки даних / [В. В. Василенко, О. О. Ільїн, Ю. В. Березовська та ін.] // Зв'язок. – К., 2019. – № 1(137). – С. 35–39.

8. Березовська Ю.В. Особливості безпроводових самоорганізованих мереж / Г. О. Гринкевич, В. В. Жебка, В. В. Василенко, Ю. В. Березовська // Наукові записки УНДІЗ. – К., 2018. – № 4(52). – С. 40–45.

9. Березовська Ю.В. Дослідження та аналіз пропускної здатності каналів передачі в телекомунікаціях / Ю. В. Хмельницький, В. О. Браун, Ю. В. Березовська, О. А. Філіпчук // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К., 2016. – № 52. – С. 147–152.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

10. Березовська Ю.В. Інформаційні системи безперервного використання з часовим резервуванням / Ю. В. Березовська // Сучасні досягнення компанії Hewlett Packard Enterprise в галузі ІТ та нові можливості їх вивчення і застосування: тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції, 16 грудня 2020 р. – К.: ДУТ, 2020. – С. 6–8.

11. Березовська Ю.В. Забезпечення функціональної стійкості системи управління центру обробки даних / В. В. Василенко, Ю. В. Березовська, Р. В. Космінський, Ю. В. Каргаполов // Проблеми інформатизації: Матеріали тринадцятої міжнародної науково-технічної конференції, 11-12 квітня 2019 р. – Київ: ДУТ, 2019. – С. 167.

12. Березовская Ю.В. Модель смешанного технического обслуживания (ТО) сложных объектов радиоэлектронной техники: ТО по ресурсу и ТО по состоянию /

Ю. В. Березовская, В. Н. Цыцарев // Молодіжна військова наука у Київському національному університеті імені Тараса Шевченка: Тези доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених, ад'юнктів, слухачів, курсантів і студентів, 24 квітня 2015 року. – К.: ВІКНУ, 2015. – С. 61.

Додаток Б

АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ

КАБІНЕТ МІНІСТРІВ УКРАЇНИ
Державне спеціалізоване підприємство
«УКРСПЕЦТОРГ»

03035, м. Київ, вул. Сурикова 3 кор 37, ЄДРПОУ 36406271

Затверджую

Директор державного спеціалізованого підприємства «Укрспецторг»

Ігор Курочкін

«16» жовтня 2020 р.

Акт

про впровадження результатів дисертаційної роботи
Березовської Юлії Володимирівни

Комісія в складі: голови комісії – заступника директора к.т.н. Кравченка Максима Валентиновича, членів комісії – начальника служби інформаційного забезпечення Гринішина Бориса Івановича, начальника відділу Каганського Володимира Яковича склала цей акт про те, що результати отримані в дисертаційній роботі Березовської Юлії Володимирівни на тему "Методика забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем на основі програмно - конфігурованих мереж", реалізовані при удосконалені інформаційної мережі підприємства.

Реалізовано та впроваджено наступні результати дослідження:

математичні моделі функціональної стійкості інформаційних систем з часовим резервуванням;

методика забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем на основі програмно - конфігурованих мереж.

Впровадження результатів дисертаційної роботи Березовської Ю.В. дає змогу визначити гарантовані оцінки показників функціональної стійкості системи передачі даних, враховуючи резерв часу, режими роботи інформаційних систем та дозволяє визначити верхні та нижні оцінки показників функціональної стійкості.

Заступник директора ДСП «Укрспецторг»
к.т.н. М. Кравченко

Начальника служби інформаційного забезпечення
ДСП «Укрспецторг» Б. Гринішин

Начальник відділу ДСП «Укрспецторг» В. Каганський

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор ДержНДІХП
_____ В.В. ЩЕРБАНЬ
_____ 2020 р.

Акт

про впровадження результатів наукових досліджень

Березовської Юлії Володимирівни

Результати наукових досліджень Березовської Юлії Володимирівни на тему «Методика забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем на основі програмно-конфігурованих мереж» обговорювались на засіданнях ДержНДІХП, вони є актуальними та мають практичне значення для створення та удосконалення інформаційних систем.

Комісія у складі:

Голова комісії: головний інженер ДержНДІХП Гончаренко І.Р.

Члени комісії:

- начальник відділу 09 Саприкін А.Б.;
- начальник лабораторії 09-02 Гречана Т.А.;
- начальник лабораторії 04-01 Роботько В.А.

встановила, що ДержНДІХП при виконанні дослідно-конструкторської роботи «Сапфір» були використані результати наукових досліджень Березовської Юлії Володимирівни:

математичну модель системи передачі даних;

математичні моделі функціональної стійкості інформаційних систем з часовим резервуванням;

методику забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем на основі програмно-конфігурованих мереж, яка ґрунтується на визначенні гарантованих оцінок показників функціональної стійкості систем передачі даних,

враховує резерв часу, режими роботи інформаційних систем та дозволяє визначити верхні та нижні оцінки показників функціональної стійкості.

Використання отриманих наукових результатів дозволяє підвищити ефективність інформаційних систем на основі програмно-конфігурованих мереж.

Голова комісії:
Головний інженер ДержНДІХП І.Р. Гончаренко

Члени комісії:
начальник відділу 09 А.Б. Саприкін
начальник лабораторії 09-02 Т.А. Гречана
начальник лабораторії 04-02,
кандидат технічних наук В.А. Роботько

Акт
про впровадження результатів наукових досліджень
Березовської Юлії Володимирівни
за темою: "Методика забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем на основі програмно-конфігурованих мереж",
представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 172 – Телекомунікації та радіотехніка,
галузь знань 17 – Електроніка та телекомунікації

Компанія ТОВ "СИТЕС-СЕК'ЮРИТИ" використовує для роботи інформаційні системи, які знаходяться в постійній взаємодії із зовнішніми впливами. Такі впливи (конфлікти) призводять до руйнування ресурсів, порушення штатних процесів, і як наслідок, зриву виконання робочих функцій.

Результати наукових досліджень Березовської Юлії Володимирівни на тему "Методика забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем на основі програмно-конфігурованих мереж" на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 – Телекомунікації та радіотехніка є актуальними і використані для удосконалення (модернізації) інформаційних систем, якими користуються співробітники та клієнти компанії ТОВ "СИТЕС-СЕК'ЮРИТИ".

Впровадження методики забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем на основі програмно-конфігурованих мереж дає змогу оцінити показники функціональної стійкості системи передачі даних, враховуючи резерв часу, режими роботи інформаційних систем. Розроблена Березовською Ю.В. методика підвищує ефективність роботи як компонентів систем, так і інформаційних систем в цілому.

Компанія ТОВ "СИТЕС-СЕК'ЮРИТИ" має намір і в подальшому використовувати результати досліджень Березовської Ю.В. при побудові нових інформаційних систем.

Директор ТОВ "СИТЕС-СЕК'ЮРИТИ" І.С. Щербина

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-педагогічної роботи
Державного університету телекомунікацій,
доктор технічних наук, професор

Л.Н. Беркман

"31" 10 2024 р.

АКТ

використання у навчальному процесі Навчально-наукового інституту інформаційних технологій результатів дисертаційної роботи аспіранта Державного університету телекомунікацій Березовської Юлії Володимирівни на тему: "Методика забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем на основі програмно-конфігурованих мереж" на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 – Телекомунікації та радіотехніка

Комісія у складі:

голови – директора Навчально-наукового інституту інформаційних технологій, доктора технічних наук, професора Бондарчука А.П.; членів комісії – завідуючої кафедри інформаційних систем та технологій, доктора технічних наук, професора Сторчак К.П., завідуючої кафедри системного аналізу, кандидата технічних наук, доцента Золотухіної О.А.; завідуючої кафедри штучного інтелекту, кандидата технічних наук, доцента Зінченко О.В.

розглянула дисертаційну роботу Березовської Юлії Володимирівни на тему: "Методика забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем на основі програмно-конфігурованих мереж" та публікації автора за матеріалами дисертаційної роботи. Результати впроваджено в начальний процес Навчально-наукового інституту інформаційних технологій, а саме:

1. Математичну модель системи передачі даних;

2. Математичні моделі функціональної стійкості інформаційних систем з часовим резервуванням;

3. Методику забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем на основі програмно-конфігурованих мереж.

На основі аналізу представлених матеріалів комісія встановила, що отримані наукові результати використовуються в навчальному процесі Державного університету телекомунікацій при курсовому проектуванні, а також при викладанні навчальних дисциплін: “Теорія надійності”, “Конвергентна мережна інфраструктура”, “Побудова SDN мереж”, “Серверні платформи HPE”.

Голова комісії

Директор ННІІТ,
доктор технічних наук, професор А.П. Бондарчук

Члени комісії

Завідуюча кафедри інформаційних систем та технологій,
доктор технічних наук, професор К.П. Сторчак

Завідуюча кафедри системного аналізу,
кандидат технічних наук, доцент О.А. Золотухіна

Завідуюча кафедри штучного інтелекту,
кандидат технічних наук, доцент О.В. Зінченко