

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

САВЧЕНКО Аліна Станіславівна



УДК 004.7: 681.51

**МЕТОДИ РОЗПОДІЛЕНОГО УПРАВЛІННЯ
КОРПОРАТИВНИМИ КОМП'ЮТЕРНИМИ МЕРЕЖАМИ**

Спеціальність 05.13.06 – Інформаційні технології

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі комп'ютерних інформаційних технологій Національного авіаційного університету, м. Київ.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
ВІНОГРАДОВ Микола Анатолійович,
Національний авіаційний університет,
професор кафедри комп'ютерних
інформаційних технологій.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
КУЧУК Георгій Анатолійович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
професор кафедри обчислювальної техніки та
програмування;

доктор технічних наук, професор
КОРНІЄНКО Богдан Ярославович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського», професор кафедри автоматичної та
управління в технічних системах;

доктор технічних наук, доцент
ЛУКОВА-ЧУЙКО Наталія Вікторівна,
Київський національний університет імені
Тараса Шевченка, завідувачка кафедри
кібербезпеки та захисту інформації.

Захист відбудеться «29» квітня 2021 р. о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.01 в Національному авіаційному університеті за адресою: 03058, Київ, проспект Любомира Гузара, 1.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: 03058, Київ, проспект Любомира Гузара, 1.

Автореферат розісланий «___» березня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Т. Охріменко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми визначається різким зростанням ролі інформації та переходом до побудови глобальної інформаційної інфраструктури. Корпоративні комп'ютерні мережі (ККМ) залишаються найпродуктивнішим засобом передачі головного ресурсу сьогодення – інформації. В сучасних умовах масового переходу на дистанційну роботу та навчання швидкими темпами зростають обсяги передачі інформації. Використання сервісів відеоконференцій та інших мультимедійних додатків призводить до зростання вимог щодо забезпечення якості цих сервісів на базі існуючих мережних ресурсів. В зазначених умовах важко переоцінити роль автоматизованих систем управління в сфері комп'ютерних мереж. Основне завдання ККМ полягає в тому, щоб надавати користувачу якісний доступ до необхідних інформаційних ресурсів та сервісів. Виконання зазначених вимог можливо тільки завдяки впровадженню управління наявними мережними ресурсами, оскільки темпи нарощування фізичних ресурсів обмежені.

Існуючі методи та інформаційні технології управління ККМ не враховують складність управління мережею, як розподіленою системою, яка полягає в тому, що не відображається стохастичний характер мережі, як об'єкту управління. Ніколи немає повної інформації про параметри і стан мережі, про відмови та/або перевантаження окремих мережних вузлів, маршрутів, сегментів мережі. Параметри сучасного трафіку (фрактальність) не враховуються, а отже не вирішуються і завдання адекватного прогнозу параметрів і стану мережі. Інформація про стан мережі надходить з випадковою затримкою. Відповідно і сигнали (команди) управління надходять із запізненням (нестационарні потоки вимог). Це призводить до втрати оптимальності управління. Іноді стан мережі в процесі управління може стати навіть гірше, ніж якщо б управління взагалі було відсутнє.

Спроби управління всією мережею не ефективні через проблеми розмірності. Проблема оптимального поділу мережі на автономні керовані сегменти не вирішена. Відсутня єдина теорія управління мережами як складними розподіленими системами з затримкою користувальницької, службової та сигнальної інформації.

Отже проблема управління ККМ вирішена не повністю. На основі фундаментальних досліджень проблеми управління мережами, проведення широкомасштабних експериментів можна вирішити проблему оптимального управління мережними ресурсами в реальному часі. Зменшення числа повторних передач внаслідок втрат пакетів навіть на одиниці відсотків у масштабах глобальної інформаційної системи призведе до значної економії витрат на забезпечення функціонування. Отже, розробка методів розподіленого управління ККМ є актуальною.

Дослідженню функціонування інформаційно-обчислювальних систем та їх систем управління, розвитку теорії оптимізації та синтезу складних розподілених систем управління присвячено роботи таких вітчизняних та зарубіжних вчених як В. М. Глушков, Б. В. Гнеденко, І. М. Коваленко, Г. С. Поспелов, К. Шеннон, М. М. Моїсеєв, Т. Сааті, О. А. Красовський, А. Я. Городецький, В. С. Заборовський, О. І. Шелухін, А. Tanenbaum, W. Stallings. Л. Н. Беркман, Ю. Л. Леохін, О. І. Ролік, М. М. Климаш, Г. А. Кучук, Ю. Л. Лосев, В. В. Поповський, О. В. Лемешко.

Існує декілька підходів до управління мережними ресурсами в ККМ, зокрема централізоване та розподілене управління. Особливістю централізованого підходу управління, який дає можливість сформувати цілісне уявлення про стан мережі, відповідно розрахувати глобальний оптимум управління і проводити балансування навантаження, є складність знаходження оптимального управління через недостатність інформації, ресурсів. Один зі шляхів вирішення питання недостатності інформації для оптимального централізованого управління – це збільшення кількості службової (сигнальної та управляючої) інформації, що призводить до зниження корисної пропускної здатності мережі та збільшення випадкових затримок інформації. Другий підхід – розподілене (децентралізоване) управління, передбачає створення ієрархічної структури управління мережею, що дозволяє скоротити час затримки сигнальної та управляючої інформації, а також знизити вимоги щодо обчислювальної потужності управляючих вузлів, але може призвести до втрати цілісності картини щодо стану мережі та втрати глобального оптимуму управління. Отже, розроблення нових методів та інформаційних технологій розподіленого управління здатних забезпечувати ефективну роботу корпоративних комп'ютерних мереж завдяки урахування їх особливостей передбачає передусім вирішення *об'єктивних суперечностей* між постійним збільшенням кількості користувачів мультимедійних додатків та ростом вимог щодо забезпечення якості сервісів (дотримання цільових показників QoS), з одного боку, і фізичними обмеженнями ресурсів мережі, – з іншого боку, спричиненими обмеженістю темпів збільшення пропускної здатності та недосконалістю методів розподілу наявних мережних ресурсів для забезпечення належної якості сервісів, здатних враховувати характеристики сучасного трафіку та затримки сигнальної і управляючої інформації в мережі. Таким чином, дисертаційна робота присвячена вирішенню важливої **науково-прикладної проблеми**: підвищенню ефективності функціонування корпоративних комп'ютерних мереж у сенсі збільшення корисної пропускної здатності при фізичних обмеженнях на мережний ресурс в системах з нестационарними потоками.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота безпосередньо пов'язана з «Основними науковими напрямами та найважливішими проблемами фундаментальних досліджень у галузі природничих, технічних і гуманітарних наук НАН України на 2019–2023 роки», виконана в межах наукового напрямку «Нові комп'ютерні засоби та технології інформатизації суспільства» визначеного пріоритетним у переліку актуальних проблем Міністерством освіти і науки України, концепції «Програми інформатизації НАН України на 2020-2024 роки за основними її напрямами». Робота направлена на дослідження функціонування корпоративних комп'ютерних мереж на основі інтелектуальних технологій і тісно пов'язана з основними напрямками розвитку телекомунікацій України, визначених в основних діючих нормативних документах, а також із реальними проблемами галузі зв'язку й інформатизації.

Теоретичні і практичні положення дисертаційної роботи були використані в науково-дослідних роботах, які виконувались у Національному авіаційному університеті, а саме НДР «Розробка, дослідження та впровадження методів і засобів

контролю та управління якістю програмних продуктів» (тема №2/28-248, 28.01.2013, шифр роботи ДІ 207-13, державний реєстр №0113U000258, 2013-2014 рр.), НДР «Дослідження характеристик трафіку та параметрів комутаційного обладнання на основі аналізу обчислювальних мереж» (№ 78/09.01.03, 2008-2011 рр.), НДР «Метод та засіб управління якістю програмної системи на етапах життєвого циклу» (№ 18/10.02.05, 2011-2016 рр.), НДР «Метод та засіб проектування архітектури програмних систем із врахуванням вимог якості» (№75/09.01.03, 2016-2020 рр.), НДР «Методи і засоби забезпечення якості та цілісності програмних продуктів в гнучких технологіях проектування і розробки» (№ 20-2020/09.01.03, 2020-2023 рр.).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка і впровадження методів і засобів для підвищення ефективності функціонування корпоративних комп'ютерних мереж шляхом оптимального розподілу наявного мережного ресурсу.

Відповідно до обґрунтованої мети здійснюється розв'язання конкретних наукових *задач*:

1) провести огляд і аналіз сучасного стану проблеми управління корпоративними комп'ютерними мережами в умовах нестаціонарних потоків вимог;

2) провести експериментальне дослідження для визначення статистик трафіку, варіацій статистик в процесі передачі до отримувачів, підсумовування інтенсивності, проріджування потоків через перевантаження мережних вузлів (проріджені потоки);

3) удосконалити метод аналізу статистичних характеристик та математичні моделі потоків вимог різномірного мережного трафіку з маркуванням (пріоритизацією), потоків сумарних та проріджених;

4) розробити метод оптимального управління комп'ютерною мережею за критерієм узагальненої роботи О. А. Красовського;

5) розробити метод управління сталістю системи з випадковими затримками сигнальної та управляючої інформації;

6) запропонувати математичну модель у вигляді передаточної функції мережного вузла як керованого об'єкту;

7) удосконалити методи передачі сигнальної і керуючої інформації з використанням протоколів управління мережами;

8) розробити метод оцінки ефективності системи управління розподіленою корпоративною комп'ютерною мережею;

9) розробити інформаційну технологію управління мережею з етапами ідентифікації, прогнозування, вибору оптимальної стратегії управління, яка дозволяє досягти цільових показників якості обслуговування (QoS) для різних сервісів при мінімальних затратах на управління.

Об'єкт дослідження – процеси розподіленого управління ресурсами корпоративних комп'ютерних мереж для забезпечення цільових показників якості обслуговування (QoS) для різних сервісів при мінімальних затратах на управління.

Предмет дослідження – методи та технології управління мережними ресурсами в корпоративних комп'ютерних мережах із затримками сигнальної та управляючої інформації.

Методи дослідження. З урахуванням специфіки об'єкта досліджень і сформульованої мети методами дослідження є:

- методи математичної статистики та теорії ймовірностей для розробки технології експериментального дослідження потоків у комп'ютерних мережах;
- методи системного аналізу, методи ймовірнісно-статистичного аналізу та моделювання для розробки методу аналізу статистичних характеристик та математичних моделей потоків вимог різнорідного мережного трафіку ККМ;
- методи оптимального і адаптивного управління, багатокритеріальної оптимізації, диференціальних та різницевих рівнянь з аргументом, що відхиляється для розробки методу оптимального управління мережею та концепції «оптимального адміністратора»;
- методи загальної теорії систем та систем масового обслуговування при розробленні моделей мережних вузлів як керованих об'єктів та розробці оцінки ефективності системи управління розподіленою комп'ютерною мережею;
- методи теорії комп'ютерних мереж для розробки методів передачі сигнальної та управляючої інформації за протоколами каналного та мережного рівнів.

Наукова новизна результатів дисертаційної роботи. На основі виконаних теоретичних і експериментальних досліджень розв'язано важливу науково-прикладну проблему підвищення ефективності функціонування корпоративних комп'ютерних мереж у сенсі збільшення корисної пропускну здатності при фізичних обмеженнях на мережний ресурс в системах з нестационарними потоками. При цьому отримано такі наукові результати:

1) *удосконалено* метод аналізу статистичних характеристик та моделі потоків вимог різнорідного мережного трафіку з маркуванням (пріоритизацією) потоків, сумарних та проріджених потоків, які завдяки урахуванню самоподібності сучасного трафіка та використанню диференціальної ентропії відповідних розподілів, дозволяє отримувати оцінки прогнозованого навантаження на мережу та відповідно налаштовувати параметри регуляторів системи управління;

2) *вперше* розроблено метод оптимального управління комп'ютерною мережею, який завдяки застосуванню модифікованого критерію узагальненої роботи О. А. Красовського з використанням інформаційної функції втрат дає можливість знаходити оптимальні управління для складеної мережі в реальному часі;

3) *вперше* розроблено метод управління сталістю системи, який завдяки монотонно-повільному поверненню особливих точок (полосів) передатної функції в область сталості забезпечує зменшення варіабельності перехідних процесів у системі управління та дозволяє забезпечувати стійкий стан системи при випадкових затримках сигнальної та управляючої інформації;

4) *удосконалено* математичну модель у вигляді передаточної функції мережного вузла як керованого об'єкту, яка, на відміну від відомих, враховує наявність затримок сигнальної і управляючої інформації, що забезпечує оптимальний вибір постійної часу реакції керованого об'єкта;

5) *удосконалено* метод передачі сигнальної та управляючої інформації, який завдяки визначенню оптимальної розподіленої ієрархічної структури управління та

здійсненню транспорту управляючої інформації в автономному сегменті на каналному рівні, дозволяє скоротити час доставки службової інформації на 25%;

6) *вперше* розроблено метод оцінки ефективності системи управління розподіленою комп'ютерною мережею, який в якості умовного критерію ефективності визначає рівень бітових помилок та затримок пакетів, що дозволяє оцінити якість роботи системи управління по її впливу на продуктивність мережі;

7) *вперше* розроблено інформаційну технологію управління корпоративною комп'ютерною мережею, яка за рахунок етапів ідентифікації, прогнозування, вибору оптимальної стратегії управління стосовно до великої інформаційно-обчислювальної мережі з різноманітним обладнанням (складеної мережі), різними фізичними каналами доставляння даних, дає можливість досягнення цільових показників QoS для різних сервісів при мінімальних затратах інформаційного ресурсу (мінімум сигнальної та управляючої інформації) необхідних для цього.

Практичне значення отриманих результатів визначається тим, що запропоновані моделі і методи є науково-методологічною основою для розробки інформаційної технології створення систем управління корпоративними комп'ютерними мережами з використанням нових методів розподіленого управління наявними мережними ресурсами в умовах затримки сигнальної та управляючої інформації.

1. Розроблене алгоритмічне забезпечення відповідно до методу аналізу статистичних характеристик трафіку для потоків вимог різноманітного мережного трафіку з маркуванням (пріоритизацією), сумарних та проріджених, яке дозволяє отримувати оцінки прогнозованого навантаження на мережу (довжина черги, завантаженість буферної пам'яті), впроваджено в ККМ ТОВ «Об'єднання ЮГ».

2. Розроблене алгоритмічне забезпечення відповідно до методу управління сталістю системи, яке дозволяє переводити систему до стійкого стану шляхом розрахунку та застосування нових коефіцієнтів зворотного зв'язку, при яких системи залишається стійкою, впроваджено у дата-центрі ТОВ «Об'єднані мережі України».

3. Розроблене алгоритмічне забезпечення відповідно до моделі мережного вузла, як керованого об'єкту, яке дозволяє розраховувати оптимальне значення часу реакції мережного вузла залежно від часу затримки доставки даних, впроваджено в ККМ ТОВ «Об'єднання ЮГ».

4. Запропоновані «Система управління телекомунікаційною мережею» (патент на корисну модель № 82963, 27.08.2013 р.) та «Спосіб управління телекомунікаційною мережею» (патент на корисну модель № 82964, 27.08.2013 р.) впроваджені шляхом інтеграції їх з системою управління корпоративною мережею і дають можливість оптимального перерозподілу ресурсів комутаційного обладнання для забезпечення цільових показників якості обслуговування (QoS) різних типів мережних сервісів, що підтверджено актом впровадження у Національне бюро з розслідування авіаційних подій та інцидентів з цивільними повітряними суднами.

5. Розроблене алгоритмічне забезпечення відповідно до інформаційної технології управління мережею та методу оптимального управління дає можливість досягнення заданого рівня якості обслуговування при мінімальних затратах

інформаційного ресурсу (мінімум сигнальної та управляючої інформації) необхідних для цього, впроваджено у ПАТ «Укртелеком», дата-центрі ТОВ «Об'єднані мережі України», ТОВ «Головне підприємство обробки польотних даних».

Розроблене алгоритмічне забезпечення та запропоновані функціональні схеми дозволяють підвищити ефективність функціонування корпоративних комп'ютерних мереж у сенсі підвищення рівня корисної пропускну здатності на 9%.

Результати використано у навчальному процесі Національного авіаційного університету при викладанні дисциплін «Комп'ютерні мережі» та «Методи та системи штучного інтелекту» (акт впровадження від 11.02.2021 р.) та Державного університету телекомунікацій (акт впровадження від 06.11.2020 р.).

Результати дисертаційної роботи пропонується використовувати науково-дослідним організаціям, підприємствам та телекомунікаційним операторам, дата-центрам України, країн СНД і інших країн при побудові вискоелективних корпоративних комп'ютерних мереж та їх систем управління, а також для підвищення ефективності існуючих мереж.

Особистий внесок здобувача

В дисертаційній роботі узагальнено результати досліджень, виконаних автором самостійно [6-12, 16, 21, 25-26, 32, 34-39, 42-45]. Особисто автором здійснена розробка загальної концепції дисертації та вибір об'єктів, визначено мету і задачі роботи, обрано та обґрунтовано методи досліджень. У роботах, написаних в співавторстві, здобувачу належить: [1] – обґрунтування базових етапів реалізації мережних комп'ютерних технологій для оперативного контролю окремих етапів польотів; [2, 33] – розробка моделі регуляторів типу «відро маркерів» з різними методами призначення пріоритетів трафіка; [3] – аналітичне виведення виразів для характеристик якості формування трафіку; [4, 30] – методика аналізу характеристик корисної пропускну здатності мереж різного призначення в умовах змінного навантаження, втрат пакетів та повторних передач; [5, 31] – розробка методу транспорту управляючої та сигнальної інформації з використанням протоколів прикладного рівня; [13] – розробка структури системи управління мережею на основі концепції «оптимального адміністратора»; [14, 40-41] – розробка методу приведення інформаційної системи до стійкого стану при змінах затримки сигнальної і керуючої інформації; [15, 46] – запропоновано вид передаточної функції системи управління та підхід до вибору постійних часу комутаційного вузла; [17] – розробка методу з ковзною апостеріорною оптимізацією для визначення оптимальної кількості рівнів та кількості пристроїв системи управління комп'ютерною мережею; [18] – розробка методу вибору виду цільового функціоналу для оптимізації системи управління; [19] – розробка методу створення моделі для кожного окремого критерію оптимізації за відповідними даними експерименту; [20] – розробка методу прогнозування трафіку комп'ютерних мереж за допомогою апроксимації Паде; [22] – розробка схеми контролю перевантажень з використанням зворотного зв'язку; [23] – формулювання принципів побудови та функціонування Blockchain; [24] – запропоновано метод вирішення багатокритеріальних задач за допомогою концепції нелінійної схеми компромісів;

[27] – розроблено метод аналізу чутливості рішення «у великому»; [28] – запропоновано вид функціонала узагальненої роботи для управління мережею як складною стохастичною системою; [29, 47] – постановка завдання та визначення критеріїв ефективності системи управління.

Апробація результатів дисертації. Основні теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на 19 міжнародних наукових конференціях [29-47], а саме: II, IV, V та VI Міжнародних науково-технічних конференціях «Комп’ютерні системи та мережні технології «CSNT» (м. Київ, Україна, 2009 р., 2011-2013 рр.); V, VI та VII Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми телекомунікацій» (м. Київ, Україна, 2011-2013 рр.); XII, XIV та XV Міжнародних науково-технічних конференціях «Системний аналіз та інформаційні технології «SAIT» (м. Київ, Україна, 2011-2013 рр.); XII та XIII Міжнародних науково-практичних конференціях студентів та молодих учених «ПОЛІТ. Сучасні проблеми науки» (м. Київ, Україна, 2012-2013 рр.); VIII Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні інформаційно-комунікаційні технології «COMINFO» (с.м.т. Лівадія (АР Крим), Україна, 2012 р.); X Міжнародній науково-практичній конференції «Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем «MPZIS» (м. Дніпропетровськ, Україна, 2012 р.); Міжнародній науковій конференції «Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту «ISDMCI» (м. Херсон, Україна, 2013 р.); науково-технічній конференції молодих учених «Актуальні проблеми інформаційних технологій «APIT» (м. Київ, Україна, 2018); 3rd IEEE International Conference «Advanced Information and Communication Technologies-2019 «AICT» (Lviv, Ukraine) *Scopus*.

Публікації. Результати дисертаційної роботи викладені в 47 публікаціях (22 з яких одноосібні), у тому числі 20 наукових статтях в фахових журналах за переліком МОН України, 3 наукові статі у журналах, індексованих у МНБ Scopus, 2 одноосібних патентах на корисну модель, 2 наукові статті у зарубіжних журналах, та в 19 тезах і матеріалах доповідей на міжнародних конференціях, 1 з яких входять до МНБ Scopus, 1 монографії.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації, списку скорочень, вступу, змісту, семи розділів, висновків, додатків, списку використаних джерел, та містить 298 сторінок основного тексту, 81 рисунок, 16 таблиць, 15 сторінок додатків. Список використаних джерел налічує 183 найменування на 21 сторінці.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

У вступі розкрито сутність і стан наукової проблеми та обґрунтовано її значимість, сформульовано мету і наукову новизну роботи, визначено практичну цінність і сферу застосування отриманих результатів, подано загальну характеристику роботи. Наведено відомості про апробацію, публікації та впровадження результатів дослідження.

В першому розділі досліджено стратегію розвитку корпоративних комп’ютерних мереж України. Приведено основні визначення, проведено огляд і

аналіз сучасного стану проблеми управління корпоративними комп'ютерними мережами в умовах нестаціонарних потоків вимог, існуючих підходів, методів, технічних та програмних засобів для розв'язання поставлених в роботі задач. Розглянуто можливі підходи до створення інформаційних технологій в галузі управління комп'ютерними мережами та визначено концептуальну схему досліджень (рис. 1).

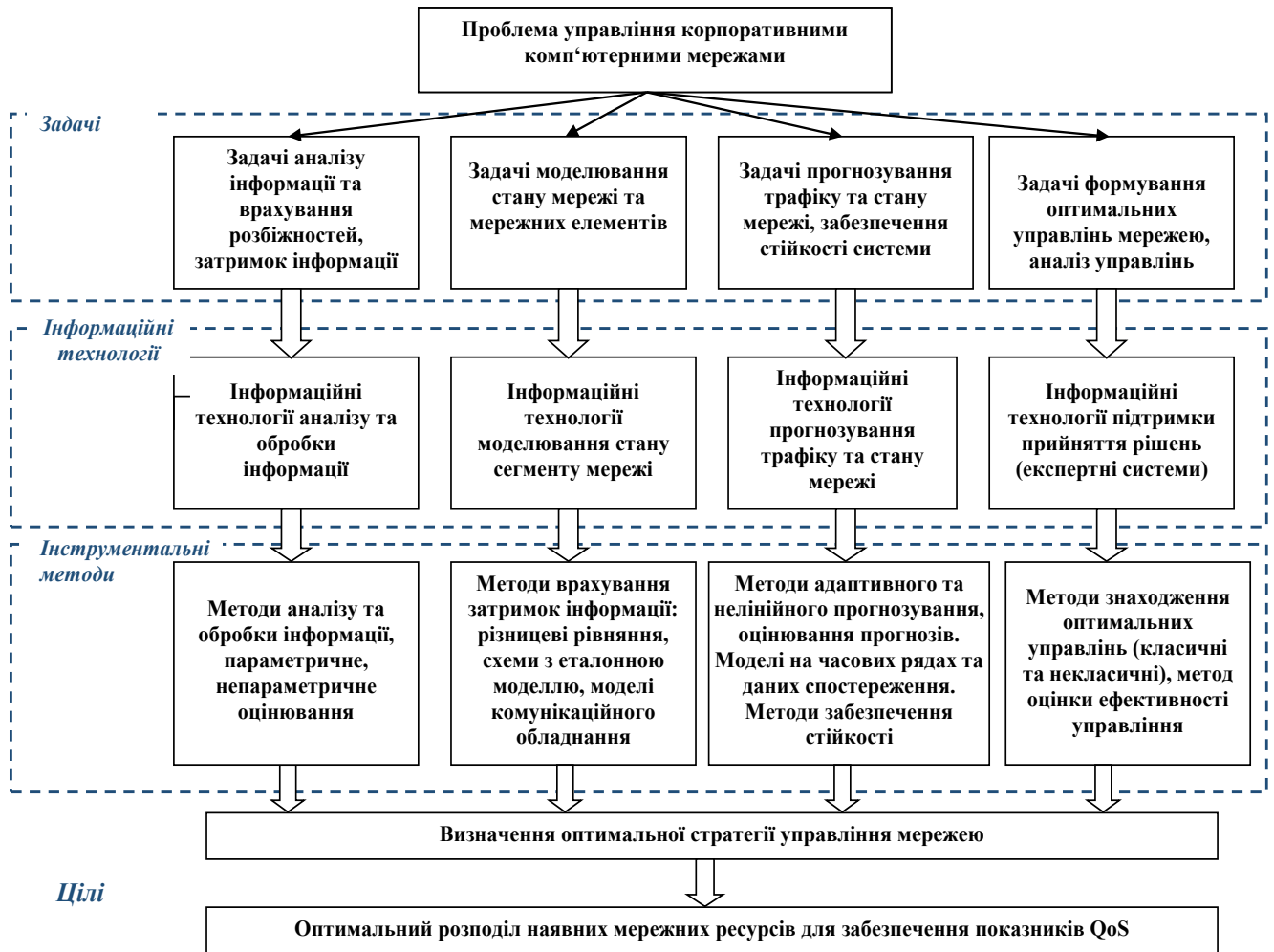


Рисунок 1 – Концептуальна схема досліджень для вирішення проблеми управління ККМ

Обґрунтовано доцільність розробки методів і створення інформаційної технології для розподіленого управління наявними мережними ресурсами з метою оптимізації управління корпоративними комп'ютерними мережами, визначено основні задачі для вирішення.

У другому розділі дисертації обґрунтовано, що для ефективного управління ККМ, як стохастичною системою, важливо враховувати закони розподілу усіх випадкових параметрів, які входять у рівняння стану і спостереження, зокрема параметри трафіку в мережі. Розглянуто особливості сучасного трафіку у ККМ. Показано, що рівень існуючих систем управління ККМ не відповідає повною мірою сучасним вимогам, оскільки, серед іншого, не враховуються статистичні особливості сучасного трафіку, наприклад, фрактальність, а також зміна характеристик потоку в результаті проходження через комутаційні вузли.

Аналіз особливостей функціонування корпоративних комп'ютерних мереж, дозволив виділити чотири основні групи потоків заявок: потік від незалежного джерела, сумарні, проріджені і марковані потоки вимог. У розділі запропоновано математичні моделі для кожного з видів потоків вимог. Зокрема пропонується описувати потік вимог від незалежного джерела моделями з самоподібними властивостями. Адекватною моделлю сумарного потоку вимог буде пуасонівська, оскільки за рахунок підсумовування великого числа складових спостерігається згладжування неоднорідності на тлі підвищення середнього значення. Модель прорідженого потоку близька до пуасонівської з відповідним ступенем прорідження початкового потоку. Марковані потоки вимог слід описувати пуасонівськими моделями з провідною функцією, яка відповідає потоку з найвищою інтенсивністю.

В третьому розділі дисертації представлено результати експериментального дослідження трафіку ККМ. Розглянуто потоки заявок від незалежного джерела, сумарні потоки, проріджені та сумарні марковані потоки заявок. Визначено, що самоподібні властивості потоків заявок від незалежного джерела можна описати розподілами з «важкими хвостами». Статистичні характеристики сумарних потоків заявок, які утворюються шляхом агрегації трафіку у пограничних маршрутизаторах, близькі до пуасонівських при великій кількості потоків. Експериментальним шляхом визначено швидкість збіжності сумарного потоку заявок до пуасонівського залежно від кількості потоків заявок. Для проріджених та сумарних маркованих потоків заявок визначено характеристик відповідно до властивостей (наприклад, ступеню самоподібності H).

На основі теоретичних та експериментальних досліджень удосконалено метод аналізу статистичних характеристик та моделі потоків вимог різнорідного мережного трафіку з маркуванням (пріоритизацією) потоків, сумарних та проріджених потоків сучасних ККМ. Метод передбачає послідовність дій, представлену на рис. 2. На першому етапі відбувається збір та зберігання статистичних даних щодо трафіку у різних точках мережі. На етапі аналізу відбувається визначення групи потоку вимог та ідентифікація моделі розподілу та його характеристик за допомогою параметричної та непараметричної оцінки. На етапі моделювання будується модель потоку вимог із визначеними характеристиками, на основі яких на етапі прогнозування відбувається розрахунок показників продуктивності мережі з використанням диференціальної ентропії відповідних розподілів. Інформаційно-ентропійний підхід до оцінки показників продуктивності передбачає, що для встановленого закону розподілу станів системи визначається ентропія розподілу H_P, H_W, H_L , зміною коефіцієнта варіації C досягається збіг значень ентропії $H_{M/H/I}$ та H_P, H_W, H_L , за допомогою знайденого коефіцієнта варіації C визначається середня кількість пакетів в системі N , через співвідношення визначаються інші характеристики продуктивності.

В четвертому розділі виконано дослідження проблем синтезу та оптимізації управління у ККМ. Інформаційна технологія управління ККМ, як складним багатовимірним об'єктом має включати методи оптимізації, засновані на мінімізації функціоналів якості управління. Вид цільового функціонала безпосередньо впливає на ефективність методу управління.

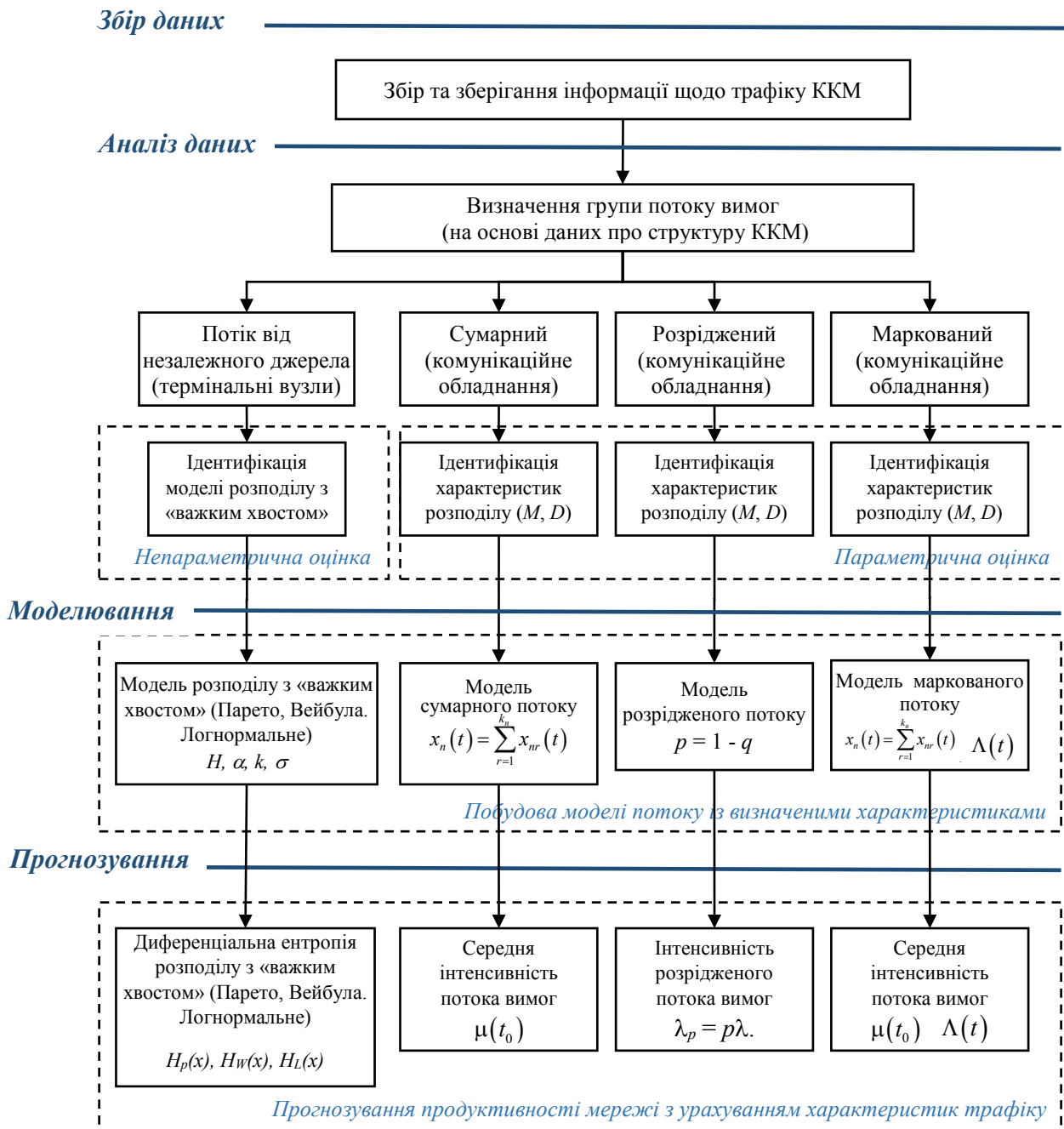


Рисунок 2 – Схема методу аналізу статистичних характеристик потоків вимог різнорідного мережного трафіку ККМ

Обґрунтовано, що застосування функціоналу узагальненої роботи, для знаходження оптимального, в сенсі мінімуму управляючої інформації, ККМ як складним нелінійним об'єктом, дозволяє знизити обчислювальну складність алгоритму, порівняно із застосуванням класичних функціоналів. Оптимум може бути досягнутий в реальному часі на існуючих обчислювальних пристроях, вбудованих в мережні вузли, що підтверджено приведеними розрахунками.

Запропоновано вид функціоналу узагальненої роботи (1), який, відповідно до методу О.А. Красовського, необхідно мінімізувати для досягнення оптимального управління в кожен поточний момент часу

$$I = V_3(y(t_k), t_k) + \int_t^{t_k} Q_3(y(\theta), \theta) d\theta + 0,5 \int_t^{t_k} (u^T(\theta) D^{-1} u(\theta) + u_{opt}^T(\theta) D^{-1} u_{opt}(\theta)) d\theta, \quad (1)$$

де V_3 – термінальна складова, Q_3 – затрати на управління; $y = Y(y_0, a, t, t_0)$ – вектор-функція стану ККМ, додатньо-визначена, диференційована або кусково-диференційована (з кінцевим або хоч би рахунковим числом розривів першого роду часткових похідних); $y(t) = y_0$ – вектор початкових умов на кожному черговому етапі пошуку оптимального рішення; t – поточний момент часу; t_k – кінцевий момент часу для даної задачі (момент переходу системи в черговий бажаний стан). V_3, Q_3 – матриці кінцевого стану та затрат на управління, коефіцієнти яких повністю визначаються параметрами мережі; a – вектор відмов, збоїв, відхилень параметрів управління від стандартних, який формується на підставі даних моніторингу ККМ, може приймати значення від 0 до 1; $u(\theta)$ – вектор поточних управлінь; $u_{opt}(\theta)$ – вектор оптимальних управлінь, невідомих до початку рішення задачі; $D = \text{diag}(d_1, \dots, d_r)$ – задана діагональна матриця відхилень параметрів системи управління. Визначення V_3, Q_3, D для всіх станів (етапів і режимів) в опорних точках складає нормальне забезпечення управління ККМ.

Перші дві складові функціонала (1) є головною частиною функціоналу узагальненої роботи (I_r). Остання складова функціонала трактується як сума робіт, що здійснюються управліннями і сигналами, що управляють, тобто затрати на управління.

Мінімум функціонала (1) досягається при оптимальному управлінні, яке має вигляд

$$u = u_{opt} = -DB^T \frac{\partial^T}{\partial y} \left[V_3(Y(y, a, t_k, t), t_k) + \int_t^{t_k} Q_3(Y(y, a, \theta, t), \theta) d\theta \right]. \quad (2)$$

де V_3, Q_3, D – матриці, коефіцієнти яких повністю визначаються параметрами мережі; $\frac{\partial^T}{\partial y}[*]$ – позначає транспоновану матрицю Якобі (матрицю-стовпець).

Матриця B відповідає за коефіцієнти управління.

Враховуючи особливості ККМ, втрати на управління є витратами додаткового інформаційного ресурсу (команди, що управляють), тобто втрати не енергетичні, а інформаційні. Тому запропоновано використовувати інформаційно-ентропійну функцію втрат з умовною щільністю ймовірності Гауса:

$$C(\lambda, s) = \frac{(\lambda - s)^2}{2\sigma^2} = C\{y, y(t)\} = \frac{(y(t) - y(t_k))^2}{2\sigma^2}, \quad (3)$$

де $y(t_k)$ – оптимальний (бажаний) стан ККМ; $y(t)$ – поточний стан ККМ; σ^2 – дисперсія апостеріорного розподілу $y(t_k)$.

Застосувавши інформаційну функцію втрат виду (3) до (2) матимемо модифікований вираз для оптимального управління:

$$u_{opt} = -\frac{(y(t) - y(t_k))^2}{2\sigma^2} B^T D^{-1} \left[V_3(Y(y, a, t_k, t), t_k) + \int_t^{t_k} Q_3(Y(y, a, \theta, t), \theta) d\theta \right]. \quad (4)$$

При реалізації модифікованого методу оптимального управління (4) для складного завдання управління ККМ прогноз визначається чисельними методами в прискореному часі (за допомогою імітаційної прогнозуючої моделі), і чисельним шляхом реалізується алгоритм (4). Для визначення компонентів градієнта (часткових похідних), що входять в (4), використовується метод синхронного диференціювання, який є найпростішим в сенсі обчислювальної складності при чисельному диференціюванні функціонала за багатьма змінними, представлений у виді:

$$u_{opt} = -\frac{(y(t) - y(t_k))^2}{2\sigma^2} B^T D^{-1} \left[\overline{V_3(Y(y(t) + \delta_{np}(t), a, t_k, t), t_k) \delta_{np}^T(t)} + \int_t^{t_k} \overline{Q_3(Y(y(\theta) + \delta_{np}(\theta), a, \theta, t)) \delta_{np}^T(\theta)} d\theta \right]$$

$\delta_{np}(t)$ - введений вектор пробних дій, що додається до вектора $y(t)$ і якому притаманна властивість ортогональності $\overline{\delta_{np}(t) \delta_{np}^T(t)} = m$, де m – діагональна матриця з позитивними коефіцієнтами; риска зверху – ковзне усереднювання по інтервалу часу.

Аналіз обчислювальної складності (D) запропонованого алгоритму оптимального управління доводить його перевагу відносно класичних методів при збільшенні кількості інтерпольованих функцій ($q_{ш}$) (рис. 3).

Таким чином, був розроблений метод оптимального управління комп'ютерною мережею, який завдяки застосуванню модифікованого критерію узагальненої роботи О. А. Красовського з використанням інформаційної функції втрат дає можливість знаходити оптимальні управління для складеної мережі в реальному часі.

П'ятий розділ присвячено аналізу стійкості автономного сегмента (АС) мережі та розробці методу управління сталістю системи, який дозволяє забезпечувати стійкий стан сегмента при випадкових затримках сигнальної та управляючої інформації.

Урахування затримок сигнальної та управляючої інформації у ККМ запропоновано проводити на основі різницевих рівнянь з аргументом, що відхиляється. Відповідно до теорії систем процеси обміну інформацією між керованими об'єктами (сегментом ККМ) S_i і системою управління описуються

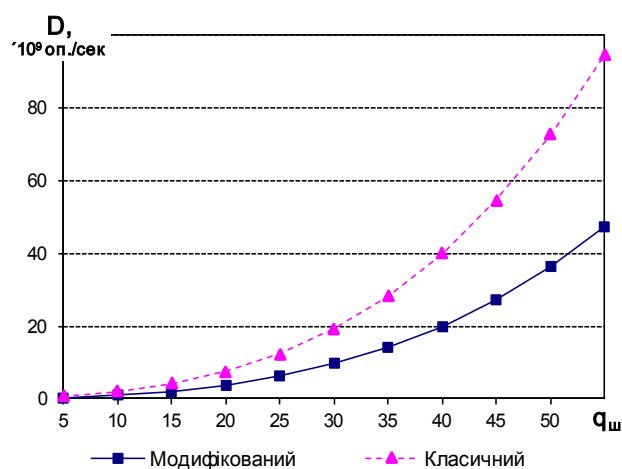
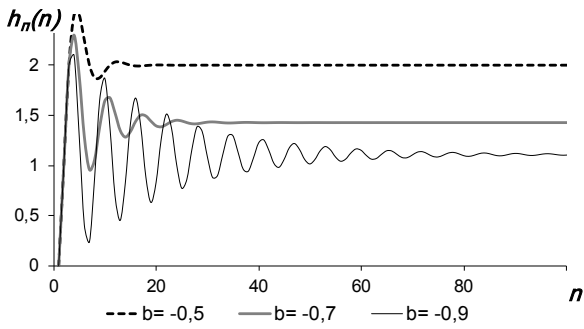


Рисунок 3 – Залежність обчислювальної складності від числа інтерпольованих функцій

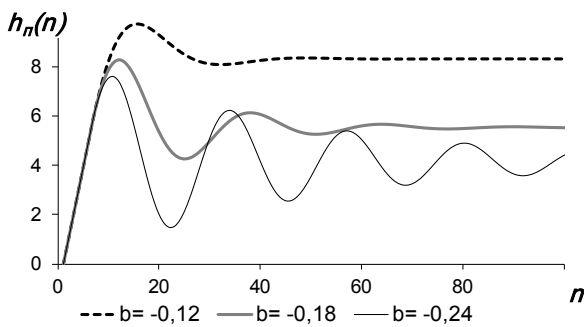
диференційно-різницевиими рівняннями або рівняннями з аргументом, що відхиляється вигляду

$$y_{as_i}(n) \approx y_{as_i}(n-1) + b_i y_{as_i}(n-k) + u_{opt_i}(n-m), \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

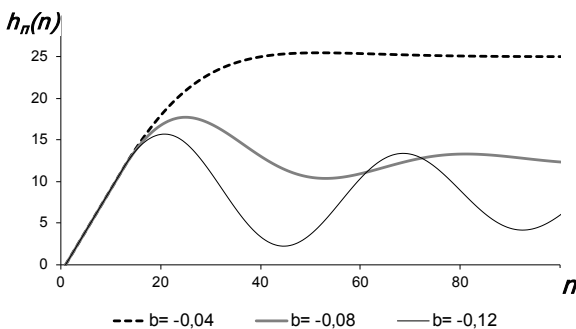
де $y_{as}(n)$ – функція стану АС; $u_{opt}(n-m)$ – управляючий сигнал; b_i – коефіцієнт зворотного зв'язку; k та m є затримками сигналів стану системи і управління відповідно. У загальному випадку $n \neq m$.



а) затримка сигналу $k=2$



б) затримка сигналу $k=6$



в) затримка сигналу $k=12$

Рисунок 4 – Перехідні характеристики системи з постійним запізненням інформаційного сигналу і різних коефіцієнтах зворотного зв'язку

Після z -перетворення рівняння (5), маємо вираз для системної функції:

$$H(z) = \frac{z^{-m}}{1 - z^{-1} - bz^{-k}}, \quad (6)$$

та характеристичний поліном $z^k - z^{k-1} - b = 0$ за умови, що $z^{-1} - b_i z^{-k} \neq 1$. Умовою стійкості АС мережі є розташування полюсів функції $H(z)$, що описується виразом (6), всередині одиничного кола z -площини. Показано, що затримки доставки сигнальної та управляючої інформації носять випадковий характер і можуть мінятися в широких межах. Навіть для простої системи затримка аргументу призводить до появи післядії. При цьому якщо початкове рівняння стійке, то стійкість рівняння з аргументом, що відхиляється, не гарантується.

Щоб оцінити асимптотичну стійкість об'єкту управління були досліджені перехідні характеристики за різних значень затримки сигнальної (k) та управляючої (m) інформації, а також коефіцієнта зворотного зв'язку (b_i). На рис. 4 зображені графіки переходних характеристик системи $h_n(n)$ із затримкою інформаційного сигналу на 2, 6 і 12 елементарних інтервалів. Коефіцієнти b_i змінювались в межах від $-0,04$ до $-0,9$. При незначній затримці інформаційного сигналу ($k=2$) система залишається стійкою в широкому діапазоні значень коефіцієнта зворотного зв'язку до значення $|b_i| \leq 0,8$. При збільшенні затримки сигналу ($k=6, 12$) стійкість системи спостерігається тільки при малих значеннях коефіцієнта зворотного зв'язку $|b_i| \leq 0,2$ і $|b_i| \leq 0,1$ відповідно.

Чим більша затримка інформації в АС мережі (стан перевантаження), тим менші значення коефіцієнта зворотного зв'язку слід обирати.

Для оцінки асимптотичної стійкості системи дослідження лише передавальних характеристик недостатньо. Асимптотична стійкість систем, визначається розташуванням полюсів системної функції усередині одиничного кола z -площини. Розраховані значення коефіцієнта зворотного зв'язку b_i при різних значеннях запізнювання інформаційного сигналу (k), при якому система залишається на межі стійкості, тобто один з полюсів системної функції (6) лежить на одиничному колі ($z_v = 1$). За розрахунками був побудований графік області стійкості системи (рис. 5). Доведено, що стійкість об'єкту управління, при збільшенні затримки інформаційного сигналу зберігається тільки при зниженні коефіцієнта зворотного зв'язку.

Одним з методів забезпечення глобальної стійкості системи управління є поточний контроль і примусове приведення системи в області стійкості шляхом цілеспрямованої зміни її коефіцієнтів зворотного зв'язку. При цьому в процесі регулювання необхідно забезпечувати збереження динамічних характеристик системи.

У дисертаційній роботі розроблено метод управління сталістю системи з випадковими затримками сигнальної та управляючої інформації заснований на примусовому поверненні в області стійкості.

Показано, що амплітудно-частотні характеристики як стійкої, так і нестійкої систем, а отже, і динамічні властивості даних систем, ідентичні. Запропоновано реалізувати примусове дзеркальне відображення полюсів, що знаходяться за межами одиничного кола z -площини, всередину її. Алгоритм наступний.

1. Задається порядок рівняння $z^k - z^{k-1} - b = 0$.
2. Задається коефіцієнт зворотного зв'язку b_i .
3. Обчислюються корені рівняння $z^k - z^{k-1} - b_i = 0: r_i, i = \overline{1, k}$.
4. Знаходяться модулі кореня r_{mod} .
5. Якщо модуль $r_{\text{mod}} > 1$, знаходиться відображений корінь r_f :

– для дійсного кореня $r_{fi} = 1/r$;

– для комплексного кореня $r_i = a_i \pm jd_i: r_{fi} = \frac{a_i}{a_i^2 + d_i^2} \pm j \frac{d_i}{a_i^2 + d_i^2}$.

6. Якщо модуль $r_{\text{mod}} = 1$, зменшуємо $r_{fi} = 1 - \varepsilon, \varepsilon \ll 1$.
7. Обчислюються коефіцієнти нового полінома з полюсами,

віддзеркаленими всередину одиничного кола z -площини.

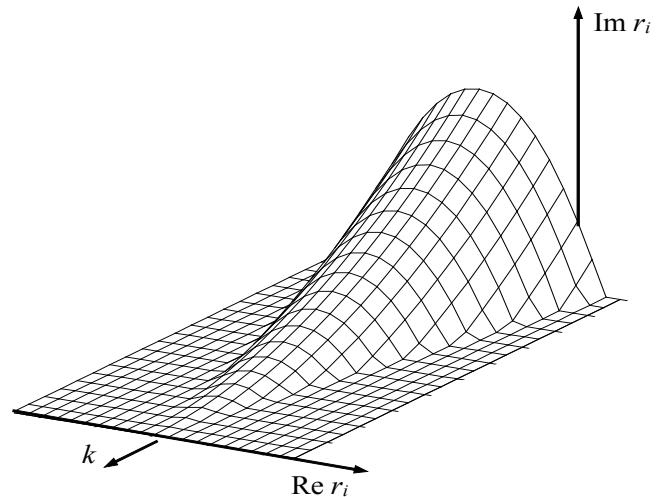
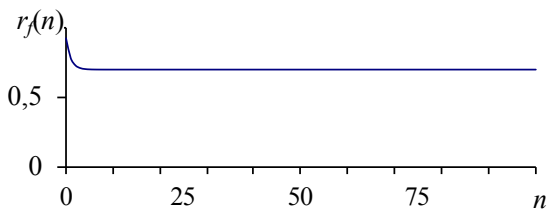


Рисунок 5 – Область стійкості системи управління із затримками інформаційного сигналу

$$y_{as}(n) \approx b_{k-1}y_{as}(n-1) + b_{k-2}y_{as}(n-2) + \dots + b_1y(n-k+1) + b_0y(n-k) + u(n-m)$$

Проте при стрибкоподібній зміні коефіцієнтів цифрової системи в моменти стрибків виникають розриви сигналу помилки, що приводить до пульсацій Гіббса і, як наслідок, до перерегулювання в системі управління. Для зменшення ефекту Гіббса запропоновано змінювати коефіцієнти і, відповідно, переводити систему в стійкий стан, плавно на кінцевому інтервалі.

Дослідження функцій різного виду дозволило визначити рекомендовану функцію для монотонно-повільного повернення полюсів в область одиничного кола виду



$$r_f(n) = \left(\frac{r_i - r_{\min}}{2} \right) e^{-n} + r_{\min}. \quad (7)$$

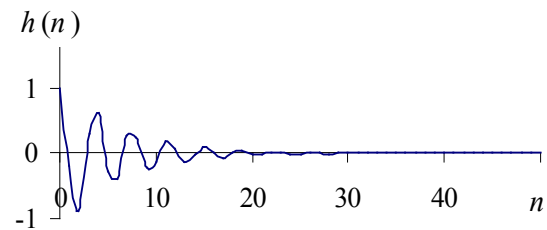
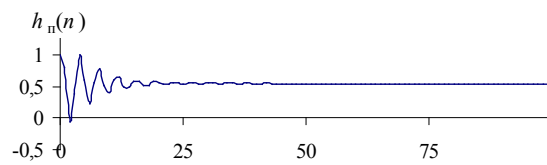


Рисунок 6 – Графіки зміни коефіцієнта $r(n)$, перехідні та імпульсні характеристики

Перехідна і імпульсна характеристики системи, а також графіки зміни кореня $r_f(n)$ для зазначеної функції показані на рис. 6. Позначено: $r_f(n)$ – значення кореня, що змінюється від початкового значення $r_i > 1$ до зворотного (мінімального) значення $r_{\min} \leq 1/r_i$ з періодом $N=50$; $n=0, 1, 2, \dots$. При необмеженому зростанні n імпульсна характеристика системи асимптотично наближається до нуля, а перехідна характеристика – до стаціонарного значення, отже, на інтервалі спостереження система є глобально стійкою.

Алгоритм забезпечення сталості на основі функції (7) відрізняється низькою обчислювальною складністю та дозволяє підвищити якість перехідних процесів в середньому на 16%, що підтверджено відповідними розрахунками.

Таким чином, у п'ятому розділі визначено умови стійкості сегменту мережі та запропоновано метод управління сталістю, який завдяки монотонно-повільному поверненню полюсів системної функції в область одиничного кола, дозволяє забезпечувати стійкий стан системи при випадкових затримках сигнальної та управляючої інформації.

Шостий розділ присвячено розробці математичної моделі у вигляді передаточної функції маршрутизатора як керованого об'єкта, виведено передавальні функції системи управління та запропоновано підхід до вибору постійних часу комутаційного вузла за результатами асимптотичного оцінювання затримок сигнальної інформації.

Вузол комутації (ВК) як об'єкт управління – це система зворотного зв'язку, яка повинна надавати певний відгук на варіації його стану (перевантаження, затримка прийому, зменшення пропускної здатності, спустошення буфера, неналежне функціонування, повна або часткова відмова). Для забезпечення коректного

управління надійністю та ефективністю мережі час відгуку має бути налаштований оптимально. При короткому періоді реакції система управління буде отримувати послідовність суперечливих інформаційних сигналів, в результаті буде перебувати в стані незатухаючих коливань і не прийде в стабільний стан. З іншого боку, якщо період реакції буде занадто довгим, механізм управління реагуватиме повільно.

На рис. 7 зображена структурна модель комутаційного вузла як об'єкта управління при наявності затримок сигнальної і керуючої інформації. Позначено – ВК – вузол комутації (маршрутизатор) з функцією передачі $H_{BK}(z)$; СУ – система управління з функцією передачі $H_{CY}(z)$; $x(n)$, $y(n)$ – вхідний і вихідний потоки даних; $\eta(n)$ – зовнішня завада; z^{-m} , z^{-k} – елементи затримки, яка має місце при обміні інформацією; в загальному випадку значення затримки інформації по висхідному і низхідному каналах обміну не збігаються ($k \neq m$); z^{-n} – затримка обробки пакета в маршрутизаторі.

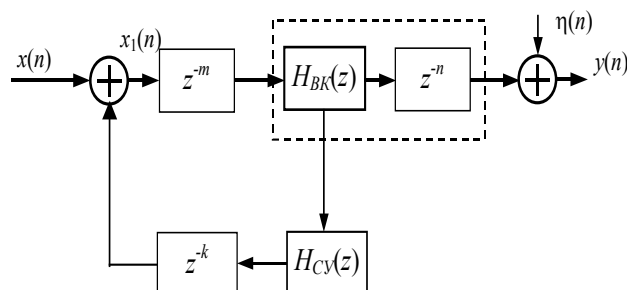


Рисунок 7 – Структурна модель комутаційного вузла як об'єкта управління

Передавальна функція $H_1(z) = x_1(z)/x(z)$ маршрутизатора:

$$H_1(z) = \frac{1}{1 - H_{BK}(z)H_{CY}(z)z^{-(m+k)}}.$$

Запропоновано загальну структуру системи управління мережними автономним сегментом, підсистему з затримкою управління z^{-k} та інформаційну систему із затримкою z^{-m} (рис. 8). Відповідний вираз для передаточної функції мережного вузла як керованого об'єкту

$$H_y(z) = \frac{z^{-n}}{1 - H_{BK}(z)H_{CY}(z)z^{-(m+k)}} + \left\{ \frac{[X_1(z)H_{BK}(z)][X_z^*(z^{-1})H_{BK}^*(z^{-1})]}{\eta(z)\eta^*(z^{-1})} \right\}^{1/2},$$

за умови, що $H_{BK}(z)H_{CY}(z)z^{-(m+k)} \neq 1$ та $\eta(z)\eta^*(z^{-1}) \neq 0$.

Другий доданок у виразі являє собою відношення кореня квадратного енергії сигналу до середньоквадратичної напруги зовнішньої завади. При великих відношеннях сигнал / завада зазначений вираз зводиться до стандартної передавальної функції системи з затримками сигнальної і керуючої інформації.

В якості асимптотичної оцінки часу реакції в умовах наявності деякого «великого параметра», роль якого в даному випадку відіграє велике відношення сигнал/завада або тривалий інтервал спостереження за умови локальної стаціонарності процесу, можна вибирати середній час затримки сигнальної інформації. Обґрунтовано, що час реакції маршрутизатора на зміну стану мережі повинен бути одного порядку з середньою затримкою сигнальної інформації.

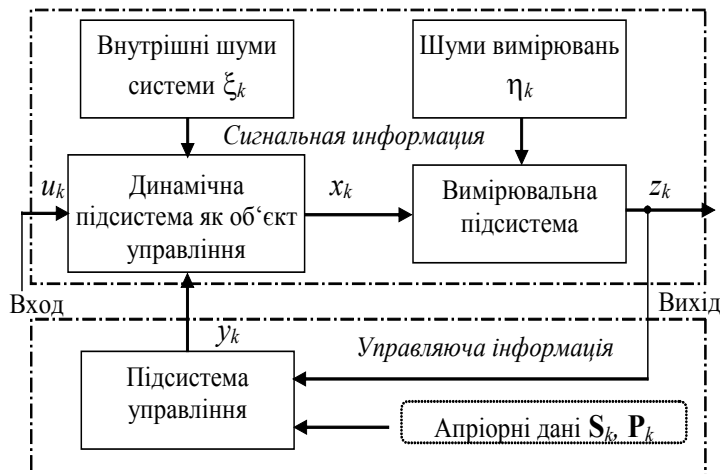


Рисунок 8 – Загальна структура системи, яка включає підсистему управління із затримкою z^{-k} та інформаційну підсистему із затримкою z^{-m}

режим незатухаючих коливань. У той же час при узгодженні згаданих затримок забезпечується достатній ресурс стійкості управління за критерієм перевантаження буфера для тих же статистичних характеристик сплеску мережної активності.

Проведено цифрове моделювання системи управління параметрами комутаційного вузла. Для різних параметрів мережного трафіку (зокрема, трафіку Triple / Quadruple Play з самоподібними властивостями) і з різними випадковими похибками і спотвореннями. Для забезпечення глобальної стабільності системи управління були спеціально підібрані коефіцієнти зворотного зв'язку.

Головний результат моделювання – це залежність варіацій довжини черги від часу реакції мережного вузла (число періодів l , якому відповідала би затримка z^{-l}) в порівнянні з часом затримки обробки і доставки даних (число періодів відповідає ступеням z^{-m} , z^{-k}). На рис. 9 показано, що відносна затримка реакції мережного вузла $l = 5$, повна затримка обробки даних і доставки $m+k=10$. Спостерігається локальне перерегулювання системи управління за критерієм перевантаження буфера. На рис. 10 показано, що відносна затримка реакції мережного вузла $l=10$, повна затримка обробки даних і доставки $m+k=10$. Спостерігається достатній ресурс стійкості управління за критерієм перевантаження буфера.

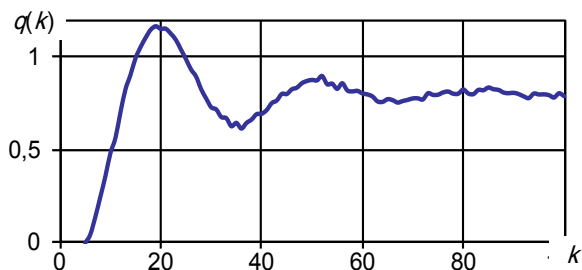


Рисунок 9 – Варіація нормалізованої поточної довжини черг в буфері мережного вузла при $l = 5$

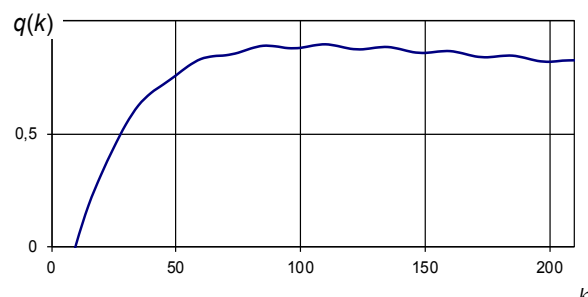


Рисунок 10 – Варіація нормалізованої поточної довжини черги в буфері мережного вузла при $l=10$

Для забезпечення ефективного процесу передачі вироблених оптимальних управлінь і налаштувань для мережного обладнання в дисертаційній роботі визначено розподілену ієрархічну структуру управління ККМ із застосуванням для передачі управляючих команд стандартних протоколів управління (SNMP, OF-CONFIG, OpenFlow тощо).

При створенні розподіленої ієрархічної структури управління ККМ обчислювальне навантаження на центральний вузол відповідає $\log_2(K + m)$, де m – кількість вузлів, K – кількість комутаційних вузлів в сегменті. Вищий ступінь відповідності обраних моделей характеризується $i, j, 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq m$ матрицею коефіцієнтів поліпшення $\mathbf{R}=\mathbf{r}$.

Процедура оптимізації ієрархічної структури складається з кількох етапів. На першому етапі – попереднього планування – визначаються найбільш загальні властивості мережі, зокрема, число і специфіка сервісів, параметри конфігурації мережі тощо.

На другому етапі робиться огляд зони можливого розміщення комутаторів, прив'язка до реальної мережі, вибір методики розрахунку втрат при передачі, розрахунок мережного ресурсу. На підставі цих даних і обраної моделі передачі плануються параметри комутаторів. Ґрунтуючись на географії мережі і ресурсі каналу, можна оцінити різні можливості створення мережного сегмента при використанні алгоритму оптимізації. Цільова функція являє собою комбінацію досяжної площі функціонування при QoS не менше заданого, оптимальної пропускну здатності при обмеженнях на витрати.

На третьому етапі проводиться налаштування та узгодження параметрів і структури мережі за результатами тестування кожного комутатора. За результатами експериментальних досліджень проводиться (при необхідності) корекція попередніх етапів плану.

При виборі оптимальної структури розподіленого управління метою є мінімізація витрат таким чином, щоб значення QoS, виражені через максимально дозволені втрати P_0^* , і показники класу сервісу GoS (GoS – Grade of Service), позначені як P_b^* і P_d^* , відповідали встановленим вимогам. Формалізовано цільову функцію у вигляді:

$$\max_S R, P_0 \leq P_0^*, P_b \leq P_b^*, P_d \leq P_d^*,$$

де $S = \{RRR, CAC, R\}$ – множина параметрів оптимізації.

Основою моделі цілочисельного комбінаторного програмування є задача мінімізації виду

$$\min \left(\sum_{j=1}^m c_j y_j + \mu \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m u_i \frac{1}{r_{ij}} x_{ij} \right),$$

де m – кількість вузлів у сегменті, $i, j, 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq m$, коефіцієнт компромісу $\mu \geq 0$. Перша складова цільової функції виражає загальну нормалізовану вартість, де c_j – витрати ресурсу j -го комутатора. Оскільки $1/r_{ij}$ пропорціональна потужності сигналу від i -ї контрольної точки, пов'язаної з j -м комутатором, другою складовою описується шукана контрольна точка, для якої загальні витрати ресурсу мінімальні.

Враховуючи суперечливість критеріїв мінімізації, застосовано коефіцієнт компроміса $\mu \geq 0$.

Обмеженням є умова нормування, що шукана i -та контрольна точка відповідає єдиному комутатору

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = 1, \quad i \in I$$

та додаткових обмежень

$$x_{ij} \leq y_j; \quad x_{ij}, y_j \in \{0,1\}; \quad i \in I, j \in M,$$

в яких змінні x_{ij} є бінарними і забезпечують умову, що контрольні точки задані тільки для комутаторів.

Для скорочення часу затримки службової інформації, управління в автономному сегменті ККМ, визначеної оптимальної розподіленої ієрархічної структури,

запропоновано реалізовувати на каналному рівні. Управління на каналному рівні може бути реалізоване за допомогою абстрактного модуля, який виконує команди системи управління шляхом зазначення ідентифікатора об'єкта (OID) в МІВ-базі та відповідних дій, які необхідно виконати (наприклад, змінити ширину смуги пропускання, збільшити обсяг буферної пам'яті для порту, вимкнути порт, накласти обмеження для певних ІР-адрес шляхом класифікації трафіка тощо).

Розрахунки доводять, що удосконалений метод передачі сигнальної та управляючої інформації на каналному рівні дозволяє скоротити час затримки службової інформації на 25% (рис. 11.)

В цьому розділі розроблено метод оцінки ефективності управління. Ефективність підсистеми управління мережею слід оцінювати за її впливом на ефективність відповідної системи складної або складовою мережі, якої вона є. Абстрактна схема такої мережі показана на рис. 12.

В якості математичних моделей, якими описуються процес зміни станів мережі, застосовані моделі марковського ланцюга або дискретного марковського випадкового процесу. Мережа може знаходитись в одному з M станів: $\{H_1, H_2, \dots, H_M\}$. Перехід з одного випадкового стану в інший можливий у відомі моменти часу $\{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k, \dots\}$ з відповідними ймовірностями $\{p_{ij}\}$, $i, j=1, M$. Сукупність станів елементів системи в деякий момент часу характеризує загальний стан системи в цей момент часу. Зміна станів елементів у часі визначає динаміку станів системи.

В процесі роботи ККМ переходи зі стану в стан відбуваються в випадкові або детерміновані моменти часу. Випадкові зміни в стані ККМ можуть бути викликані зовнішніми і внутрішніми факторами, зокрема, перевантаженнями мережі, повними



Рисунок 11 – Графік залежності часу затримки службової інформації від часу спостереження

або частковими (тимчасовими, плаваючими) збоями мережних вузлів і елементів. Це означає, що стани системи можуть бути різними, а кількість можливих станів того чи іншого вузла (елемента) може бути більше двох. В мережі розглядається математична модель з чотирма станами: s_1 – працездатний; s_2 – перевантаження; s_3 – тимчасова (плаваюча) відмова; s_4 – повна відмова. Розмічений граф станів мережі показано на рис. 13.

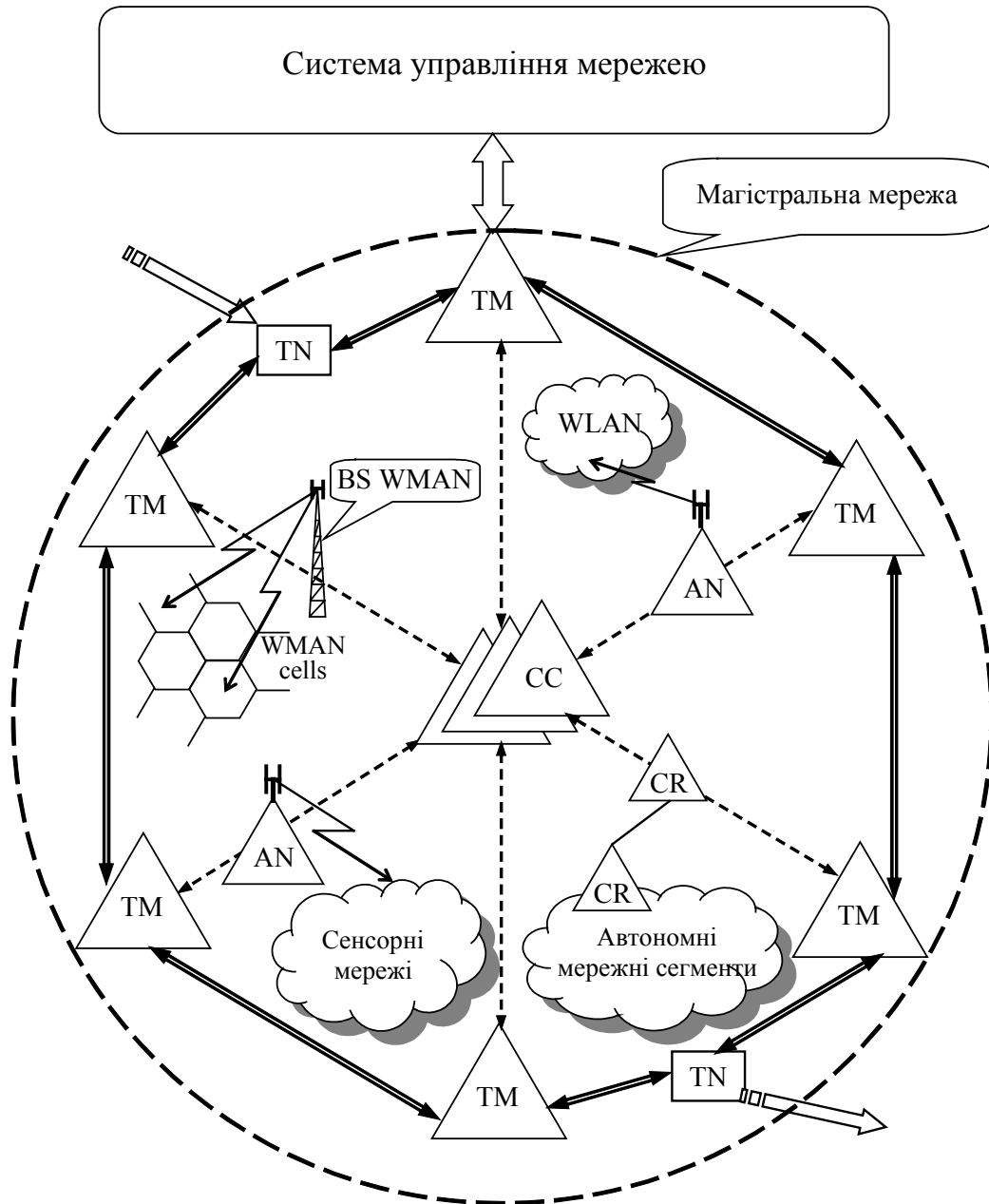


Рисунок 12 – Абстрактна модель корпоративної мережі. AN – вузол доступу; CC – комутаційний центр; CR – магістральний маршрутизатор; TN – транзитний вузол; TM – транзитний мультиплексор

Ймовірності станів p_{ij} , $\overline{p_{ij}}$, $i, j = 1, 4$: інтенсивності переходу λ_{ij} (μ_{ji}) з стану i в стан j (або навпаки). Події складають повну групу, тому сума згаданих ймовірностей

дорівнює одиниці за визначенням; стан s_4 – поглинаючий з такими ймовірностями: $p_{44} = 1; p_{41} = p_{42} = p_{43} = 0$; процес переходу з одного стану в інший є однорідним.

Стан повної відмови означає, що відновлення системи під час поточної роботи неможливо через фізичний збій. Мережна система може бути відновлена після повної зупинки і переконфігурації.

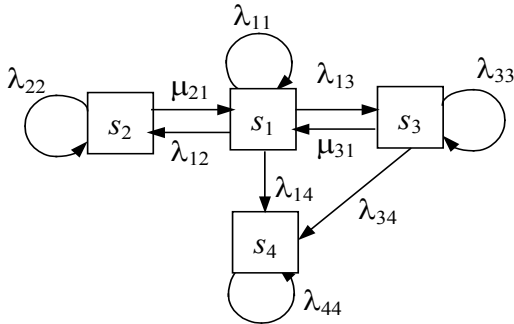


Рисунок 13 – Розмічений граф станів мережі. λ_{ij} – інтенсивність відмов; μ_{ji} – "інтенсивність" відновлень

З огляду на те, що плаваючі збої відбуваються частіше, ніж повні збої, а перевантаження не пов'язані з фізичними збоями, представлено спрощену модель мережі з двома станами: s_1 – працездатний; s_3 – тимчасова (плаваюча) відмова.

При $p_3(t) = 1 - p_1(t)$ відповідне диференціальне рівняння Колмогорова має вигляд:

$$\frac{dp_1(t)}{dt} = -\lambda_{13}p_1(t) + \mu_{31}(1 - p_1(t)), \text{ або}$$

$$\frac{dp_1(t)}{dt} = -(\lambda_{13} + \mu_{31})p_1(t) + \mu_{31}, \quad p_1(0) = 1. \quad (8)$$

Рівняння (8) для випадку $\lambda_{13}(t) = \lambda_{13} = \text{const}$, $\mu_{31}(t) = \mu_{31} = \text{const}$, має рішення

$$p_1(t) = \frac{\mu_{31}}{\lambda_{13} + \mu_{31}} + \frac{\lambda_{13}}{\lambda_{13} + \mu_{31}} \exp[-(\lambda_{13} + \mu_{31})t],$$

Чисельні значення λ_{13}, μ_{31} і їх асимптотична поведінка, перевірені експериментальним шляхом, відповідають граничним відношенням $\lambda < \mu$, $\lambda \approx \mu$, $\lambda \gg \mu$.

Абсолютна пропускна спроможність сегменту ККМ дорівнює

$$C_{\text{abs}} = \lambda_{13} C_{\text{rel}}; \quad \lim_{t \rightarrow \infty} C_{\text{abs}} = \lambda_{13} \frac{\mu_{31}}{\lambda_{13} + \mu_{31}}.$$

Оцінка продуктивності всієї мережі, проводиться на основі системи диференціальних рівнянь Колмогорова. Застосувавши до системи рівнянь метод перетворення Лапласа, і визначивши фундаментальну матрицю рішення $\Phi_p(\tau)$, отримано при $t_0 = 0$ і $\mathbf{P}_0^T = \{1 \ 0 \ 0 \ 0\}$ вираз для безумовних ймовірностей станів мережі:

$$\begin{cases} p_1(t) = \frac{\lambda_{21}}{\lambda_{12} + \lambda_{21}} e^{-(\lambda_{13} + \lambda_{14})t} + \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{12} + \lambda_{21}} e^{-(\lambda_{13} + \lambda_{14} + \mu_{21} + \mu_{31})t}; \\ p_2(t) = \frac{\lambda_{21}}{\lambda_{12} + \lambda_{21}} e^{-(\lambda_{12} + \lambda_{21})t} - \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{12} + \lambda_{21}} e^{-(\lambda_{12} + \lambda_{21} + \mu_{21})t}; \\ p_3(t) = e^{-(\lambda_{13} + \lambda_{14})t} - e^{-(\lambda_{12} + \lambda_{21} + \mu_{31})t}; \\ p_4(t) = e^{-(\lambda_{13} + \lambda_{34})t} + e^{-(\lambda_{12} + \lambda_{21} + \lambda_{34})t}. \end{cases} \quad (9)$$

При цьому вираз для $p_4(t)$ можна отримати з умови нормування

$$p_4(t) = 1 - \sum_{i=1}^3 p_i(t). \quad (10)$$

На рис. 14 зображені графіки ймовірностей $p_1(t)$, $p_2(t)$, $p_3(t)$, $p_4(t)$, побудовані відповідно до виразів (9 – 10).

Вихідні дані: число мережних вузлів $N_{net} = 50$; інтервал спостереження $T_{search} = 8$ годин; сумарна інтенсивність повних (фізичних) відмов мережних вузлів $\lambda_{1\Sigma} = 0,07$ 1/год; сумарна інтенсивність виникнення перевантажень маршрутів $\lambda_{12} = 0,6$ 1/год; середня інтенсивність відновлення маршрутів $\lambda_{21} = 0,1$ 1/год.

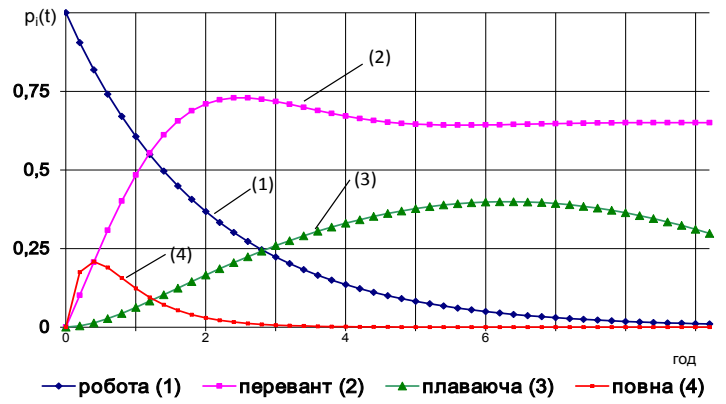


Рисунок 14 – Графіки ймовірностей станів "робота" (1), "перевантаження" (2), "плаваюча відмова" (3), "повна відмова" (4)

Запропоновано вираз для умовного критерію ефективності системи управління, що враховує коефіцієнт бітових помилок, інтервал часу доставки даних, ступінь захисту мережі. В такому випадку кожен стан H_i сегменту ККМ в момент t характеризується ймовірністю $p_i(t)$. Коли мережа вирішує конкретну задачу на інтервалі $[t_0, t]$ в певний момент часу t_i , можна зв'язати значення деякого функціоналу $\Psi_i(t)$, що характеризує якість рішення проблеми системою в H_i -ому стані.

Функціонал $\Psi_i(t)$ можна інтерпретувати як умовний критерій ефективності управління. Вираз для критерію безумовної ефективності має вигляд

$$\Psi_j(t) = \sum_{i=1}^{L_j} p_{ij}(t) \psi_{ij}(t),$$

де $\Psi_j(t)$ – узагальнений критерій ефективності для L_j робочих станів ККМ; $\psi_{ij}(t)$ – умовним критерієм ефективності при стані мережі, що дорівнює H_i .

Як умовний критерій ефективності управління мережею при вирішенні даної проблеми доставки трафіку на заданому маршруті доцільно вибрати ймовірність того, що в заданому інтервалі часу ΔT_d мережа матиме заданий допустимий рівень бітових помилок (BER). Умовний критерій ефективності управління в цьому випадку представляється як

$$\Psi_j(t) = \int_0^{BER_1} \int_{T_d \min}^{T_d \max} \int_{P_T \min}^{P_T \max} \psi_{ij}(BER, T_d, P_T, t) d(BER) d(T_d) d(P_T), \quad (11)$$

де BER – коефіцієнт бітових помилок; T_d – інтервал часу доставки; P_T – ступінь захисту мережі; в загальному випадку інтеграл (11) розуміється в сенсі Стільтьєса.

Використовуючи загальний критерій (11), можна отримати часткові критерії. Для показника ефективності мережі, по якій доставляються повідомлення довільної довжини, можна встановити в якості умовного критерію ймовірність передачі без

втрат. Беручи до уваги співвідношення між загальною кількістю біт і числом помилкових біт в переданому повідомленні, правомірно прийняти геометричний розподіл $G[p, n]$ з цілим числом $n=1, 2, \dots$, параметром Бернуллі $p, 0 < p < 1$ (ймовірність успіху) і $q=1-p$. Тоді ймовірність передачі без втрат повідомлення довжиною K біт дорівнює

$$\Psi_j(K) = 1 - q^K = 1 - (1 - p)^K.$$

Ефективність управління ККМ оцінюється по впливу на продуктивність мережі. Поточний коефіцієнт ефективності R_{eff} :

$$R_{eff} = \Psi_1(t) / \Psi_2(t),$$

де Ψ_1 – ефективність мережі з управлінням, а Ψ_2 – ефективність мережі без управління.

При вирішенні інших завдань з доставки даних (передача, обмін і тощо) необхідно застосовувати інші критерії ефективності. Для оцінки впливу системи управління мережею на ефективність мережі як об'єкта функціонування управління необхідно знати ймовірності станів СУ.

На основі запропонованих методів у дисертаційній роботі розроблено інформаційну технологію управління корпоративною комп'ютерною мережею з еталонною моделлю та використанням концепції «оптимального адміністратора» на основі психофізіологічних моделей професійної діяльності адміністратора ККМ з використанням принципів оптимального управління та технології експертних систем.

Структурна схема розробленої інформаційної технології управління ККМ показана на рис. 15. Основними складовими технології є:

- модуль обробки вхідної інформації про стан мережі у вигляді бази даних для зберігання статистик функціонування мережі;
- модуль ідентифікації стану мережі;
- еталонна інформаційна та математична модель АС ККМ з прогнозуванням;
- модуль «оптимального адміністратора» для формування оптимальних управлінь;
- база знань з набором правил щодо стратегій управління ККМ;
- база даних для аналізу ефективності управління;
- модуль реалізації управління.

На початковому етапі роботи інформаційна технологія передбачає здійснення пошуку об'єктів в ККМ, аналіз параметрів і структури автономних сегментів ККМ S_i . На основі отриманих результатів формується вектор стану АС мережі $Y_{asi}(y_{asi}, a, t_0)$.

Набір параметрів мережі, які контролюються, дозволяє враховувати такі відхилення параметрів АС, від яких явно залежить досягнення цільових показників якості QoS для різних сервісів: затримка передачі і варіація затримки, кількість втрачених пакетів та бітових помилок.

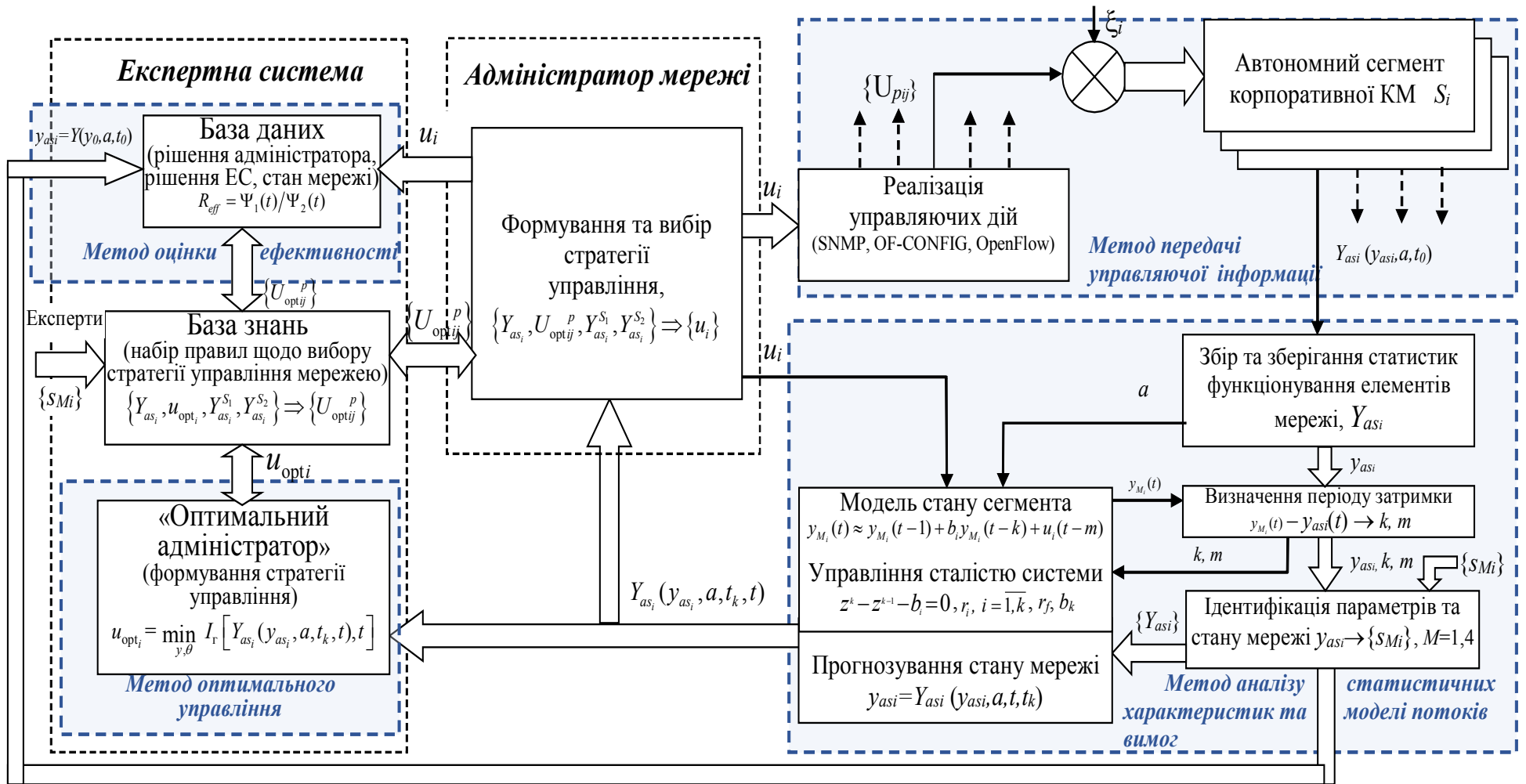


Рисунок 15 – Узагальнена структурна схема інформаційної технології управління ККМ

Дані про стан ККМ передаються в дворівневу i -у еталону модель АС M_i . Перший рівень відповідає за стан кожного елемента мережі окремо і прив'язаний до конкретного обладнання (маршрутизаторів, комутаторів, програмних комутаторів Softswitch, пограничних контролерів сесій SBC тощо). Другий (мереженезалежний) рівень відповідає за загальний стан АС ККМ. Такий підхід дозволяє відокремити завдання управління надійністю обладнання від завдання аналізу і управління топологією комп'ютерної мережі.

При зборі статистики враховуються розбіжності параметрів вектору поточного стану АС $Y_{asi}(y_{as_i}, a, t_0)$, інформація про які надходить із запізненням інформаційного (k) сигналу, та вектором стану еталонної моделі y_{M_i} .

Модуль ідентифікації на основі вектору поточного стану мережі та інформаційно-ентропійних критеріїв дозволяє визначити відповідність одному з чотирьох станів: s_1 – працездатний; s_2 – перевантаження; s_3 – тимчасова (плаваюча) відмова; s_4 – повна відмова.

Еталонна модель, яка описує процеси обміну інформацією в АС, побудована на основі диференційно-різницевого рівнянь з аргументами, що відхиляються, які дозволяють врахувати затримки як сигнальної (k) так і управляючої (m) інформації. Стійкість стану АС ККМ при затримках сигналів забезпечується завдяки розробленому методу управління сталістю.

На основі методу аналізу статистичних характеристик та моделей потоків вимог формується вектор вихідних сигналів першого рівня еталонної моделі, який дозволяє отримати прогноз щодо стану елементів та інтенсивності трафіку в контрольних точках мережі.

На основі вектору вихідних сигналів другого рівня еталонної моделі формується вектор прогнозу працездатності АС $Y_{as_i}(y_{as_i}, a, t_k, t)$ на майбутні періоди. Модуль «оптимального адміністратора» використовує розроблений метод оптимального управління для приведення АС у бажаний стан t_k з мінімальним затратами управляючого ресурсу. Тут номінальні значення цільових показників якості QoS (і деяких інших) параметрів вводяться як компоненти (скалярні функції) у вектор оптимальних управлінь u_{opt} , після одноразово вирішується задача оптимізації – пошуку глобального екстремуму $u_{opt_i} = \min_{y, \theta} I_{\Gamma} [Y_{as_i}(y_{as_i}, a, t_k, t), t]$. В процесі подальшого функціонування мережі проводиться стеження за екстремумом і «підстроювання» під нього при виникненні відхилень параметрів системи управління a .

Паралельно з адміністратором, що має стандартну кваліфікацію і досвід роботи, ті ж завдання вирішує експертна система, оптимальна в сенсі мінімізації заданих цільових функціоналів, – «оптимальний адміністратор». Ця система, як і адміністратор, отримує інформацію про стан мережі і прогноз працездатності. Мінімізуючи цільовий функціонал, виробляється оптимальне управління, на основі якого, за допомогою бази знань, формується стратегія управління. База знань повинна містити набір правил щодо оптимальних стратегій управління $\{Y_{as_i}, u_{opt_i}, Y_{as_i}^{S_1}, Y_{as_i}^{S_2}\} \Rightarrow \{U_{opt_{ij}}^p\}$, які необхідно приймати в ситуації, що склалася.

Концептуальна структура експертної системи заснована на виявленні понятійної структури мережі, її елементів, параметрів та можливих станів за допомогою парадигми концептуального аналізу та принципів побудови ієрархії понять. База знань побудована за продукційною моделлю та містить інформацію про оптимальні стратегії управління мережею відповідно до бажаного стану АС та мінімуму управляючих дій. Модуль робочої пам'яті містить інформацію щодо поточного стану системи та прийнятих рішень. Засіб пояснення рішення надає адміністратору мережі список правил, використаних в процесі логічного виведення стратегії оптимального управління, що дозволяє підвищити довіру до триманого результату. Машина логічного виведення базується на декларативних мовах програмування. В якості експертів, що наповнюють базу знань можуть виступати: фахівці фірм-виробників мережного обладнання; досвідчені адміністратори або група адміністраторів мережі; користувачі – замовники послуг. Рішення, вироблені експертною системою, розглядаються як еталонні і надаються операторові, забезпечуючи інтелектуальну підтримку в ухваленні рішення і автоматизоване навчання.

Адміністратор на основі інформації про поточний і прогнозований стан ККМ, рекомендації щодо оптимальних управляючих дій, формує стратегію управління та реалізує її за допомогою модуля реалізації управляючих дій у вигляді команд відповідних протоколів $\{U_{pij}\}$.

Для аналізу ефективності управління у базі даних фіксуються оптимальні управління (вироблені експертною системою), управляючі дії адміністратора, стани мережі. Ефективність управління оцінюється по впливу на продуктивність мережі. Поточний коефіцієнт ефективності $R_{eff} = \Psi_1(t)/\Psi_2(t)$, визначає співвідношення Ψ_1 – ефективності мережі з управлінням до Ψ_2 – ефективності мережі без управління. Експериментальним шляхом доведено, що застосування запропонованої інформаційної технології управління дозволяє підвищити ефективність ККМ в сенсі збільшення рівня корисної пропускної спроможності каналів зв'язку автономного сегмента в середньому на 9% (рис. 16).

Таким чином в цьому розділі розроблено інформаційну технологію управління ККМ, перевагою якої є відповідність загальним психофізіологічним моделям професійної діяльності адміністратора, а також застосування методу оптимального управління, який дозволяє переводити систему у бажаний кінцевий стан при мінімальних затратах на управління.

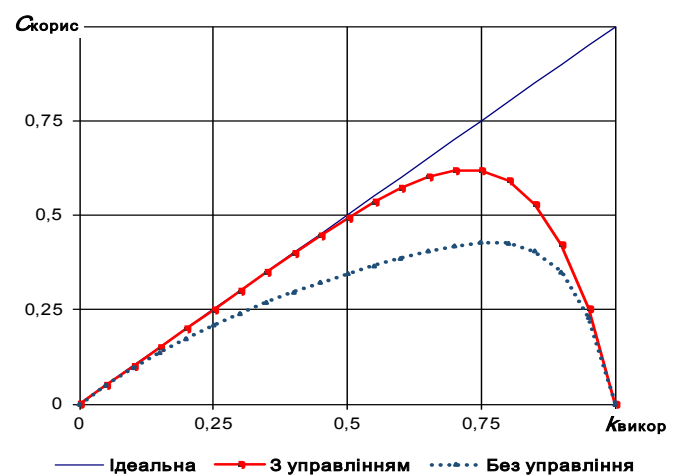


Рисунок 16 – Графік залежності корисної пропускної здатності мережі від коефіцієнту завантаження

ВИСНОВКИ

На основі виконаних теоретичних та експериментальних досліджень вирішено важливу науково-прикладну проблему в галузі інформаційних технологій: підвищення ефективності функціонування корпоративних комп'ютерних мереж у сенсі збільшення корисної пропускну здатності при фізичних обмеженнях на мережний ресурс в системах з нестаціонарними потоками, засобами сучасних інформаційних технологій з використанням нових методів розподіленого управління наявними мережними ресурсами, що дозволить, за рахунок зменшення числа повторних передач внаслідок втрат пакетів навіть на одиниці відсотків у масштабах глобальної інформаційної системи, значно скоротити витрати на забезпечення функціонування мережі.

При цьому отримані такі нові результати:

1. Проведене дослідження сучасного стану проблеми управління ККМ в умовах нестаціонарних потоків вимог показало, що існуючі методи не враховують в комплексі всі особливості управління комп'ютерними мережами, як складними стохастичними системами, зокрема: розподіленість інфраструктури, наявність повної та достовірної інформації про стан та параметри мережі, затримки доставки сигнальної та управляючої інформації, оптимальність вироблених управляючих впливів та мінімальність витрат ресурсу (мінімум службової управляючої інформації), що є необхідною умовою забезпечення ефективного функціонування корпоративних комп'ютерних мереж. Сформульовано завдання управління ККМ: виходячи з поточного стану мережі визначення оптимальних управляючих дій для досягнення бажаного стану мережі (цільових показників QoS) для різних сервісів. Виходячи з поставленого завдання запропоновано розробити інформаційну технологію, яка дозволяє завдяки ідентифікації, прогнозуванню, вибору оптимальної стратегії управління, дає можливість досягнення цільових показників QoS для різних сервісів при мінімальних затратах інформаційного ресурсу (мінімум сигнальної та управляючої інформації) необхідних для цього.

2. Запропоновано удосконалений метод аналізу статистичних характеристик та моделі потоків вимог різноманітного мережного трафіку з маркуванням (пріоритизацією) потоків, сумарних та проріджених потоків, які завдяки урахуванню самоподібності сучасного трафіка та використанню диференціальної ентропії відповідних розподілів, дозволяє отримувати оцінки прогнозованого навантаження на мережу та відповідно налаштовувати параметри регуляторів системи управління.

Аналіз особливостей функціонування корпоративних комп'ютерних мереж, дозволив виділити чотири основні групи потоків вимог: від незалежного джерела, сумарні, проріджені і марковані. Обґрунтовано, що адекватною моделлю потоку заявок від незалежного джерела є модель із самоподібними властивостями. Для сумарного потоку характеристики збігаються до простого потоку вимог. Характеристики рідіючих потоків залежать від ступеню прорідження та характеристик початкового потоку.

3. Розроблено метод оптимального управління комп'ютерною мережею, який завдяки застосуванню модифікованого критерію узагальненої роботи О. А. Красовського з використанням інформаційної функції втрат дає можливість

знаходити оптимальні управління для складеної мережі в реальному часі, причому обчислювальна складність запропонованого методу в два рази нижча порівняно з використанням класичних функціоналів. При реалізації методу для завдання управління ККМ прогноз визначається чисельними методами в прискореному часі (за допомогою імітаційної прогнозуючої моделі), і чисельним шляхом реалізується алгоритм. Для визначення компонентів градієнта (часткових похідних) використовується метод синхронного диференціювання, який є найпростішим в сенсі обчислювальної складності при чисельному диференціюванні функціонала за багатьма змінними. Аналіз обчислювальної складності запропонованого алгоритму доводить його перевагу відносно класичних методів оптимального управління при збільшенні кількості інтерпольованих функцій.

4. Розроблено метод управління сталістю системи, який завдяки монотонно-повільному поверненню особливих точок (полісів) передатної функції в область сталості забезпечує зменшення варіабельності перехідних процесів у системі управління та дозволяє забезпечувати стійкий стан системи при випадкових затримках сигнальної та управляючої інформації і дозволяє підвищити якість перехідних процесів у системі управління в середньому на 16%.

Для урахування затримок сигнальної та управляючої інформації у ККМ використано метод на основі різницевих рівнянь з аргументом, що відхиляється. Асимптотичну стійкість об'єкту управління досліджено через перехідні характеристики за різних значень затримки сигнальної, управляючої інформації, та коефіцієнтах зворотного зв'язку. При незначній затримці інформаційного сигналу ($k=2$) система залишається стійкою в широкому діапазоні значень коефіцієнта зворотного зв'язку до значення $|b_i| \leq 0,8$. При збільшенні затримки сигналу ($k=6, 12$) стійкість системи спостерігається тільки при малих значеннях коефіцієнта зворотного зв'язку $|b_i| \leq 0,2$ і $|b_i| \leq 0,1$ відповідно.

5. Запропоновано удосконалену математичну модель у вигляді передаточної функції мережного вузла як керованого об'єкту, яка, на відміну від відомих, враховує наявність затримок сигнальної і управляючої інформації, що забезпечує оптимальний вибір постійної часу реакції керованого об'єкта, що дозволяє уникнути локального перерегулювання та забезпечити достатній ресурс стійкості системи. Досліджені параметри системи управління для різних параметрів мережного трафіку (зокрема, трафіку Triple / Quadruple Play з самоподібними властивостями) і з різними випадковими похибками і спотвореннями. Для забезпечення глобальної стабільності системи управління були спеціально підібрані коефіцієнти зворотного зв'язку.

6. Запропоновано удосконалений метод передачі сигнальної та управляючої інформації, який завдяки визначенню оптимальної розподіленої ієрархічної структури управління та здійсненню транспорту управляючої інформації в автономному сегменті на каналному рівні, дозволяє скоротити час доставки службової інформації на 25%. При визначенні оптимальної розподіленої ієрархічної структури управління на першому етапі визначаються число і специфіка сервісів, параметри конфігурації мережі тощо. На другому етапі робиться огляд зони можливого розміщення комутаторів, прив'язка до реальної мережі, вибір методики розрахунку втрат при передачі, розрахунок мережного ресурсу. На підставі цих

даних і обраної моделі передачі плануються параметри комутаторів. На третьому етапі проводиться налаштування та узгодження параметрів і структури мережі за результатами тестування кожного комутатора. Для скорочення часу затримки службової інформації, управління в автономному сегменті, визначеної оптимальної розподіленої ієрархічної структури, запропоновано реалізовувати на каналному рівні.

7. Розроблено метод оцінки ефективності системи управління розподіленою комп'ютерною мережею, який в якості умовного критерію ефективності визначає рівень бітових помилок та затримок пакетів, що дозволяє оцінити якість роботи системи управління по її впливу на продуктивність мережі. Як умовний критерій ефективності управління мережею при вирішенні задачі доставки трафіку на заданому маршруті обрано ймовірність того, що в заданому інтервалі часу ΔT_a мережа матиме заданий допустимий рівень бітових помилок (*BER*). Ефективність управління ККМ оцінюється по впливу на продуктивність мережі і визначається відношенням критерію ефективності мережі з управлінням до критерію ефективності мережі без управління.

8. *Вперше* розроблено інформаційну технологію управління корпоративною комп'ютерною мережею, яка за рахунок етапів ідентифікації, прогнозування, вибору оптимальної стратегії управління стосовно до великої інформаційно-обчислювальної мережі з різнорідним обладнанням (складеної мережі), різними фізичними каналами доставляння даних, дає можливість досягнення цільових показників QoS для різних сервісів при мінімальних затратах інформаційного ресурсу (мінімум сигнальної та управляючої інформації) необхідних для цього.

На початковому етапі роботи інформаційної технології формується вектор стану АС і передається в дворівневу *i*-у еталону модель. Перший рівень відповідає за стан кожного елементу мережі окремо, другий – за загальний стан АС ККМ. При зборі статистики враховуються розбіжності параметрів АС та стану еталонної моделі. Модуль ідентифікації на основі вектору поточного стану мережі визначає приналежність до одного з чотирьох станів. На основі вектору вихідних сигналів другого рівня еталонної моделі формується вектор прогнозу працездатності АС.

Для приведення АС у бажаний стан з мінімальними затратами управляючого ресурсу номінальні значення цільових показників якості QoS (і деяких інших) параметрів вводяться як компоненти у вектор оптимальних управлінь, після чого одноразово вирішується задача оптимізації – пошуку глобального екстремуму. В процесі подальшого функціонування мережі проводиться стеження за екстремумом і «підстроювання» під нього при виникненні відхилень параметрів системи управління.

База знань побудована за продукційною моделлю та містить інформацію про оптимальні стратегії управління мережею відповідно до бажаного стану АС. Адміністратор на основі інформації про поточний і прогнозований стан ККМ, рекомендації щодо оптимальних управляючих дій, формує стратегію управління та реалізує її за допомогою модуля реалізації управляючих дій у вигляді команд відповідних протоколів. Для аналізу ефективності управління у базі даних фіксуються оптимальні управління (вироблені експертною системою), управляючі дії адміністратора, стани мережі.

Експериментальним шляхом доведено, що застосування запропонованої інформаційної технології управління дозволяє підвищити ефективність ККМ в сенсі збільшення рівня корисної пропускної спроможності каналів зв'язку автономного сегмента в середньому на 9%.

9. Практичне значення отриманих результатів визначається тим, що запропоновані моделі і методи є науково-методологічною основою для розробки інформаційної технології створення систем управління ККМ з використанням нових методів розподіленого управління наявними мережними ресурсами в умовах затримки сигнальної та управляючої інформації.

Розроблено алгоритмічне забезпечення відповідно до методу аналізу статистичних характеристик трафіку для потоків вимог різнорідного мережного трафіку з маркуванням (пріоритизацією), сумарних та проріджених, яке дозволяє отримувати оцінки прогнозованого навантаження на мережу (довжина черги, завантаженість буферної пам'яті тощо), що підтверджено актом впровадження в ТОВ «Об'єднання ЮГ».

Розроблено алгоритмічне забезпечення відповідно до методу управління сталістю системи, яке дозволяє переводити систему до стійкого стану шляхом розрахунку та застосування нових коефіцієнтів зворотного зв'язку, при яких системи залишається стійкою, що підтверджено актом впровадження у дата-центрі ТОВ «Об'єднані мережі України».

Розроблено алгоритмічне забезпечення відповідно до моделі мережного вузла, як керованого об'єкту, яке дозволяє розраховувати оптимальне значення часу реакції мережного вузла залежно від часу затримки доставки даних, що підтверджено актом впровадження в ТОВ «Об'єднання ЮГ».

Запропоновані «Система управління телекомунікаційною мережею» (патент на корисну модель № 82963, 27.08.2013 р.) та «Спосіб управління телекомунікаційною мережею» (патент на корисну модель № 82964, 27.08.2013 р.) впроваджені шляхом інтеграції їх з системою управління корпоративною мережею і дають можливість оптимального перерозподілу ресурсів комутаційного обладнання для забезпечення показників якості обслуговування (QoS) різних типів мережних сервісів, що підтверджено актом впровадження у Національне бюро з розслідування авіаційних подій та інцидентів з цивільними повітряними суднами.

Розроблено алгоритмічне забезпечення відповідно до інформаційної технології управління мережею та методу оптимального управління дає можливість досягнення заданого рівня якості обслуговування при мінімальних затратах інформаційного ресурсу (мінімум сигнальної та управляючої інформації) необхідних для цього, що підтверджено актами впровадження у ПАТ «Укртелеком», дата-центрі ТОВ «Об'єднані мережі України», ТОВ «Головне підприємство обробки польотних даних».

Результати дисертаційної роботи пропонується використовувати науково-дослідним організаціям, підприємствам та телекомунікаційним операторам, дата-центрам України, країн СНД і інших країн при побудові вискоефективних корпоративних комп'ютерних мереж та їх систем управління, а також для підвищення ефективності існуючих мереж.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ НАУКОВИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Малежик О. І., Савченко А. С. Інформаційне, алгоритмічне та програмне забезпечення мережевих комп'ютерних технологій оперативного контролю окремих етапів польотів повітряних суден за польотною інформацією. Монографія. К.: НАУ, 2012. 112 с.
2. Савченко А. С., Чанг Шу Повышение качества сервиса в сетях доступа с использованием адаптивных алгоритмов формирования и упорядочения трафика. *Проблеми інформатизації та управління*: зб. наук. праць. 2008. Вип.2(24). С. 161-169.
3. Савченко А. С., Чанг Шу Адаптивное формирование трафика путем управления частотой генератора маркеров. *Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку*: зб. наук. праць. 2009. Вип. 1(9). С.58-64.
4. Виноградов Н. А., Лесная Н. Н., Савченко А. С., Колисник Е. В. Исследование характеристик полезной пропускной способности в условиях меняющейся нагрузки. *Проблеми інформатизації та управління*: зб. наук. праць. 2009. Вип.4(28). С. 28-31.
5. Жуков И. А., Савченко А.С., Кудзиновская И. П. Методы и технологии управления корпоративными компьютерными сетями. *Проблеми інформатизації та управління*: зб. наук. праць. 2010. Вип.3(31). С. 48-52.
6. Савченко А. С. Экспериментальное исследование свойств суммарных потоков в вычислительных сетях. *Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку*: зб. наук. праць. 2010. Вип.4(16). С.101-107.
7. Савченко А. С. Концептуальная модель системы управления крупной корпоративной сетью. *Проблеми інформатизації та управління*: зб. наук. праць. 2011. Вип.2(34). С. 120-128.
8. Савченко А. С. Модификация критерия обобщенной работы для оптимального управления вычислительной сетью. *Вісник Державного університету інформаційнокомунікаційних технологій*. 2011. №4. Т.9. С.366-370.
9. Савченко А. С. Системный анализ протоколов управления крупной корпоративной сетью. *Проблеми інформатизації та управління*: зб. наук. праць. 2012. Вип.3(39). С.135-143.
10. Савченко А. С. Метод принудительного ввода системы управления в области устойчивости. *Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку*: зб. наук. праць. 2012. Вип. 2(22). С. 100-105.
11. Савченко А. С. Исследование характеристик устойчивости системы управления корпоративной сетью. *Вісник Державного університету інформаційнокомунікаційних технологій*. 2013. № 1. С. 79-85.
12. Савченко А. С. Модель системи управління корпоративною мережею із затримками сигнальної та управляючої інформації. *Проблеми інформатизації та управління*: зб. наук. праць. 2013. Вип. 2(42). С. 99-103.
13. Виноградов М. А., Савченко А. С. Концепція управління корпоративною комп'ютерною мережею на основі психофізіологічних механізмів професійної

діяльності людини. *Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку*: зб.наук.праць. 2013. Вип. 3(27). С. 5-14.

14. Савченко А. С., Холявкина Т. В., Гуйда О. Г. Обеспечение устойчивости системы управления телекоммуникационной сетью. *Науковий вісник Академії муніципального управління. Серія «Техніка»*: зб. наук. праць. 2013. Вип. 6. С. 141-151.

15. Савченко А. С., Василенко В. А., Данилина Г. В. Математические модели сетевых коммутационных узлов как объектов управления. *Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій*. 2013. № 3. С. 56-61.

16. Савченко А. С. Информационно-энтропийный подход к оценке производительности компьютерных сетей с разнородным трафиком. *Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку*: зб. наук. праць. 2014. Вип. 1(29). С. 44-50.

17. A. S. Savchenko, V. A. Vasylenko, O. V. Kolisnyk, T. V. Holiavkina Computer networks monitoring and management methods. *Science-based Technology*. 2018. T. 39. №. 3 С. 281-288. DOI: 10.18372/2310-5461.39.13075 (eng).

18. Савченко А. С., Моденов Ю. Б., Климова А. С., Чуба І. В., Куликовський Р. М. Аналітичне конструювання системи оптимального управління комп'ютерною мережею. *Наукоємні технології*. 2019. Т. 44. Вип 4. С. 417-425.

19. Василенко В. А., Климова А. С., Куклінський М.В., Савченко А.С., Харченко О.Г. Математичні моделі функцій частинних критеріїв в задачах векторної оптимізації складних технічних систем. *Наукоємні технології*. 2020. Т. 45. Вип 1. С.

20. Савченко А. С., Чуба І. В., Охремчук О. С. Методи прогнозування потоків у комп'ютерних мережах на основі апроксимації Паде. *Наукоємні технології*. 2020. Т. 46. Вип 2. С. 191-199.

21. Савченко А.С. Методи управління корпоративною інформаційною системою на базі теорії оптимального управління. *Наукоємні технології*. 2020. Т. 47. Вип 3. С. 350-357.

22. Nikolay Vinogradov, Mikhailo Stepanov, Yaroslav Toroshanko, Vyacheslav Cherevyk, Alina Savchenko, Valerii Hladkykh, Oleksandr Toroshanko, Tetiana Uvarova Development of the method to control telecommunication network congestion based on a neural model. *Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies*. 2019. Vol 2, No 9 (98). P. 67-73. doi.org/10.15587/1729-4061.2019.164087 **Scopus**

23. Nataliia Kraus, Nataliia Andrusiak, Alina Savchenko, Maksim Iavich Practices of Using Blockchain Technology in ICT under the Digitalization of the World Economy. CEUR Workshop Proceedings (Computer Science-Information Systems-Information Technology), Volume 2588, 2 April 2020, ISSN 1613-0073, PP. 80-89 **Scopus**

24. Воронин А.Н., Савченко А.С. Многокритериальная оптимизация: системный подход. *Кібернетика і системний аналіз*. ISSN 1019-5262. 2020, Том 56, № 6. С. 160-174 **Scopus**

25. Савченко А.С. Система управління телекомунікаційною мережею. Пат. 82963 Україна, МПК Н 04 L 12/70. Заявник і власник Національний авіаційний університет. № u201301393; заявка 06.02.2013; опубл. 27.08.2013, бюл. № 16/2013.

26. Савченко А.С. Спосіб управління телекомунікаційною мережею. Пат. 82964 Україна, МПК Н 04 L 12/70. Заявник і власник Національний авіаційний університет. № u201301395; заявка 06.02.2013; опубл. 27.08.2013, бюл. № 16/2013.
27. Nick A. Vinogradov, Vladimir I. Drovovozov, Alina S. Savchenko, Inna P. Kudzinovskaya An analysis of singularity of the matrices of priorities and sensibility of decisions as key performance indicators of the analytic hierarchies process. *Journal of Qafqaz University Mathematics and Computer Science*. 2011. №32. С. 40-48. ISSN 2310-9017. (Index Copernicus)
28. Nick A. Vinogradov, Alina S. Savchenko Comparative analysis of the functionals of optimal control corporate computer network. *Journal of Qafqaz University Mathematics and Computer Science*. 2013. –V.1. № 2. С. 156-167. ISSN 2310-9017. (Index Copernicus)
29. Nikolay Vinogradov Alina Savchenko Impact of network control system performance on efficiency of large corporate network. IEEE-AICT-2019. 3rd IEEE International Conference. *Advanced Information and Communication Technologies-2019: Next-Generation Networking for the Internet of Things: 5G, SDN, NFV and Cloud Computing 2~6 July, 2019 // Lviv, Ukraine IEEE-AICT-2019*. Electronic ISBN: 978-1-7281-2399-8 USB ISBN: 978-1-7281-2398-1 DOI:10.1109/AIACT.2019.8847838 Corpus ID: 203566065 **Scopus**
30. Виноградов Н. А., Савченко А.С., Колисник Е. В. Методы расчета полезной пропускной способности в условиях меняющейся нагрузки. Комп'ютерні системи та мережні технології (CSNT-2009): II міжнар. наук.-техн. конф., 10-12 червня 2009 р.: тези доп. К., 2009. С. 24.
31. Савченко А.С., Кудзиновская И.П. Устойчивость метода многокритериальной маршрутизации на основе анализа иерархий. Проблемы телекоммуникаций: V міжнар. наук.-техн. конф., 19-22 квітня 2011 р.: тези доп. К., 2011. С. 129.
32. Савченко А.С. Экспериментальное исследование процессов и потоков в сетях. Системний аналіз та інформаційні технології (SAIT 2011): XIII міжнар. наук.-техн. конф, 23-28 травня 2011 р.: тези доп. К., 2011. С.152.
33. Chang Shu, Savchenko A.S. Analysis of sensibility of method of multicriterion routing to large disturbances of a priori data. Комп'ютерні системи та мережні технології (CSNT-2011): IV міжнар. наук.-техн. конф., 14-16 червня 2011 р.: тези доп. К., 2011. С. 58.
34. Савченко А.С. Модель системы управления корпоративной сетью. ПОЛІТ. Сучасні проблеми науки: XII міжнар. наук.-практ. конф. студ. та молодих учених, 4-5 квітня 2012 р.: тези доп. К., 2012. С. 251.
35. Савченко А.С. Метод учета задержек управляющей и сигнальной информации в крупных корпоративных сетях. Системний аналіз та інформаційні технології (SAIT 2012): XIV міжнар. наук.-техн. конф, 24 квітня 2012 р.: тези доп. К., 2012. С.123.
36. Савченко А.С. Метод оптимального управления вычислительной сетью. Проблемы телекоммуникаций: VI міжнар. наук.-техн. конф., 24-27 квітня 2012 р.: тези доп. К., 2012. С. 173.

37. Савченко А.С. Минимизация задержек служебной информации в крупных сетях. Комп'ютерні системи та мережні технології (CSNT-2012): V міжнар. наук.-техн. конф., 13-15 червня 2012 р.: тези доп. К., 2012. С. 115.

38. Савченко А.С. Системный анализ протоколов управления крупной корпоративной сетью. Сучасні інформаційно-комунікаційні технології (COMINFO'2012-Livadia): VIII міжнар. наук.-техн. конф., 1-5 жовтня 2012 р. –с.м.т. Лівадія (АР Крим): тези доп. К., 2012. С. 212.

39. Савченко А.С. Управление корпоративной сетью на основе технологии экспертных систем. Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем (MPZIS-2012): X ювілейна міжнар. наук.-практ. конф., 21-23 листопада 2012 р. м. Дніпропетровськ: тези доп. Дніпропетровськ, 2012. С. 274-275.

40. Савченко А.С., Холявкина Т.В. Метод обеспечения устойчивости системы управления корпоративной сетью. Проблемы телекоммуникаций: VII міжнар. наук.-техн. конф., 16-19 квітня 2013 р.: тези доп. К., 2013. С. 176-179.

41. Савченко А.С., Холявкина Т.В. Анализ асимптотической устойчивости системы управления телекоммуникационной сетью. Системний аналіз та інформаційні технології (SAIT 2013): 15 міжнар. наук.-техн. конф., 27-31 травня 2013 р.: тези доп. К., 2013. С.182-183.

42. Савченко А.С. Якість обслуговування в телекомунікаційних мережах. ПОЛІТ. Сучасні проблеми науки: XIII міжнар. наук.-практ. конф. студ. та молодих учених, 3-4 квітня 2013 р.: тези доп. К., 2013. С. 175.

43. Савченко А.С. Интеллектуальные компьютерные средства в управлении корпоративной компьютерной сетью. Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту (ISDMCI'2013): Міжнар. наук. конф., 20–24 травня 2013р. Евпаторія: тез доп. Херсон.: ХНТУ, 2013. С. 384-386.

44. Савченко А.С. Метод обеспечения качества обслуживания в корпоративных сетях. Комп'ютерні системи та мережні технології (CSNT-2013): VI міжнар. наук.-техн. конф., 11–13 червня 2013 р.: тези доп. К., 2013. С. 107.

45. Савченко А.С. Подход к оценке производительности компьютерных сетей с разнородным трафиком. Проблемы телекоммуникаций: VIII міжнар. наук.-техн. конф., 22-25 квітня 2014 р.: тези доп. К., 2014. С. 224-226.

46. Віноградов М. А., Савченко А. С., Даніліна Г.В. Процеси конфліктного управління мережним комутаційним вузлом з функцією фільтрації шкідливого трафіку. Актуальні проблеми інформаційних технологій» (АПІТ). Науково-технічна конференція молодих учених (20 – 21 листопада, 2018, Київ), К., 2018. С. 11-12.

47. Віноградов М. А., Савченко А.С. Ефективність системи управління стохастичною корпоративною мережею. Вісник Університету «Україна» Серія: Інформатика, обчислювальна техніка та кібернетика», К., 2019, №1(22), С. 166-174.

АНОТАЦІЯ

Савченко А.С. Методи розподіленого управління корпоративними комп'ютерними мережами. Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.13.06 – Інформаційні технології. Національний авіаційний університет. Київ, 2021.

Робота присвячена вирішенню науково-прикладної проблеми: підвищенню ефективності функціонування корпоративних комп'ютерних мереж у сенсі збільшення корисної пропускної здатності при фізичних обмеженнях на мережний ресурс в системах з нестационарними потоками.

Запропонований підхід включає: удосконалений метод аналізу статистичних характеристик та моделі потоків вимог різнорідного мережного трафіку, новий метод оптимального управління комп'ютерною мережею на основі модифікованого критерію узагальненої роботи з інформаційною функцією втрат, який дає можливість знаходити оптимальні управління для складеної мережі в реальному часі, новий метод управління сталістю системи який завдяки монотонно-повільному поверненню особливих точок (полюсів) передатної функції в область сталості забезпечує зменшення варіабельності перехідних процесів у системі управління, удосконалену математичну модель у вигляді передаточної функції мережного вузла як керованого об'єкту, удосконалений метод передачі сигнальної та управляючої інформації на каналному рівні, новий метод оцінки ефективності системи управління, нову інформаційну технологію управління корпоративною комп'ютерною мережею, яка за рахунок етапів ідентифікації, прогнозування, вибору оптимальної стратегії управління, дає можливість досягнення цільових показників QoS для різних сервісів при мінімальних затратах інформаційного ресурсу.

Запропоновані моделі і методи є науково-методологічною основою для розробки інформаційної технології створення систем управління ККМ з використанням нових методів розподіленого управління наявними мережними ресурсами в умовах затримки сигнальної та управляючої інформації, і втілені у вигляді відповідних методик та алгоритмічного забезпечення.

Ключові слова: інформаційна технологія, корпоративна комп'ютерна мережа, мережні ресурси, оптимальне управління, функціонал узагальненої роботи, ефективність.

АННОТАЦИЯ

Савченко А.С. Методы распределенного управления корпоративными компьютерными сетями. Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.06 – Информационные технологии. Национальный авиационный университет. Киев, 2021.

Работа посвящена решению научно-прикладной проблемы: повышению эффективности функционирования корпоративных компьютерных сетей в смысле увеличения полезной пропускной способности при физических ограничениях на сетевой ресурс в системах с нестационарными потоками.

Предложенный подход включает: усовершенствованный метод анализа статистических характеристик и модели потоков заявок разнородного сетевого трафика, новый метод оптимального управления компьютерной сетью на основе модифицированного критерия обобщенной работы с информационной функцией потерь, новый метод управления устойчивостью системы, усовершенствованную математическую модель в виде передаточной функции сетевого узла как управляемого объекта, усовершенствованный метод передачи сигнальной и управляющей информации на канальном уровне, новый метод оценки эффективности системы управления, новую информационную технологию управления корпоративной компьютерной сетью, которая за счет этапов идентификации, прогнозирования, выбора оптимальной стратегии управления, дает возможность достижения целевых показателей QoS для различных сервисов при минимальных затратах информационного ресурса.

Предложенные модели и методы являются научно-методологической основой для разработки информационной технологии создания систем управления корпоративными компьютерными сетями с использованием новых методов распределенного управления наявными сетевыми ресурсами в условиях задержки сигнальной и управляющей информации, и воплощены в виде соответствующих методик и алгоритмического обеспечения.

Ключевые слова: информационная технология, корпоративная компьютерная сеть, сетевые ресурсы, оптимальное управление, функционал обобщенной работы, эффективность.

ABSTRACT

Savchenko A.S. Methods of distributed management of corporate computer fences. – Manuscript.

Dissertation on the scientific level of the Doctor of Technical Sciences on the by specialty 05.13.06 – Information Technologies. National Aviation University. Kyiv, 2021.

Represented work has solved an important scientific and applied problem in the field of information technology based on the performed theoretical and experimental research. We had increased the efficiency of corporate computer networks in terms of increasing usable throughput with physical constraints on network resources in computer systems with non-stationary traffic flows. The study of the current state of corporate computer network (CCN) management in non-stationary flow of requirements allowed to select the main areas of research, such as the adequacy of analysis and forecast of information on the state of the network, delivery delays of signal and control information, optimality of produced control impacts with minimal resource costs.

The improved method of analysis of statistical characteristics and flow models of heterogeneous network traffic requirements with marking (prioritization) of traffic flows, aggregated and sparse flows allows to obtain estimates of the predicted network load and adjust the parameters of controllers. A method of optimal control of a computer network has been developed, which, due to the application of a modified criterion of generalized work of Alexander A. Krasovskiy using the informational criterion function, makes it possible to find optimal controls for a composite network in real time. The developed method of system stability control allows ensuring a stable state of the system with

random delays of signal and control information. The mathematical model was improved in the form of the transition function of the network node as a controlled object. This model, in contrast to the known ones, takes into account the presence of delays in signal and control information. It provides optimal choice of response time constant of the controlled object and sufficient stability resource of the system. The improved method of signal and control information transfer, due to the definition of the optimal distributed hierarchical control structure and the implementation of control information transport in the autonomous network segment at the data link layer reduces the delivery time of service information by 25%. The developed method of evaluating the effectiveness of the network management system allows evaluating the quality of the control system on its impact on network performance. Developed information technology for corporate computer network management makes it possible to achieve quality of service (QoS) objectives for various services at minimal cost of information resources.

The practical significance of the obtained results is determined by the fact that the proposed models and methods are the scientific and methodological basis for the development of information technology for CCN control systems using new methods of distributed control of available network resources in terms of signal and control information delays. The developed methods and information technology are implemented by integrating them with the corporate network management system and allow optimal redistribution of switching equipment resources to ensure QoS of different types of network services.

The first section reviews and analyzes the current state of the problem of CCN management in non-stationary request flows, existing approaches, methods, hardware and software to solve the tasks. The second section discusses the features of modern traffic in corporate computer networks, identifies four main groups of flows and presents mathematical models for each type of flow: flow from an independent source, aggregated, sparse and labeled flows. The results of experimental traffic analysis are presented in third section and the method of analysis of statistical characteristics and flow patterns of modern CCM was improved. The fourth section develops a method of optimal computer network management based on vector functional with informational criterion function. The fifth section analyzes the stability of the state of the autonomous segment with delays in signal and control information and develops a method for control stability of the system based on forced return in the field of stability. The sixth section presents a mathematical model in the form of the transfer function of the router as a controlled object and proposes an approach to the choice of time constants of the switching node based on the results of asymptotic estimation of signal information delays. The seventh section develops the method for estimation the efficiency of control and develops information technology of management of CCN with stages of identification, forecasting, selection of optimal management strategy, which allows achieving QoS objectives for different services with minimal information resources required for this.

Keywords: information technology, corporate computer network, network resources, optimal management, function of generalized work, efficiency.