

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ЯКИМЧУК НАТАЛІЯ МИКОЛАЇВНА



УДК 004.7.052:004.414.2; 629.735.051:004.7 (043.3)

**МЕТОДИ БОРОТЬБИ З ПЕРЕВАНТАЖЕННЯМИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ
МЕРЕЖ НОВИХ ПОКОЛІНЬ ШЛЯХОМ ФОРМУВАННЯ ПОТОКІВ
РІЗНОРІДНОГО МЕРЕЖНОГО ТРАФІКУ**

Спеціальність 05.12.02 – «Телекомунікаційні системи та мережі»

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2023

Дисертацією є рукопис.
Робота виконана на кафедрі електроніки та телекомунікацій
Луцького національного технічного університету
міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Козловський Валерій Валерійович,
Національний авіаційний університет,
завідувач кафедри засобів захисту інформації.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Толіпа Сергій Васильович
професор кафедри кібербезпеки та захисту інформації
Київського національного університету ім. Т. Шевченка

кандидат технічних наук, професор
Дробик Олександр Васильович
директор наукового центру
Державного університету телекомунікацій.

Захист дисертації відбудеться «8» червня 2023р. о 13.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.19 у національному авіаційному університеті за адресою: 03058, м. Київ, проспект Любомира Гузара, 1.

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

Автореферат розісланий «8» травня 2023 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.062.19
доктор технічних наук, доцент



О.Л. Туровський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність і обґрунтування вибору теми дослідження. Використання телекомунікаційних мереж нових поколінь (NGN, Future networks – FN) для передавання різномірного трафіку типу TriplePlay (мова+ відео+дані)/QuadruplePlay (мова+відео+дані+мобільні абоненти) породило проблеми, пов'язані з різномірністю такого трафіку. Основною специфікою самоподібного трафіку є виникнення швидких спорадичних сплесків інтенсивності при середній порівняно низькій інтенсивності трафіку на протяжних інтервалах передачі даних. Це приводить до наростання черг у буферній пам'яті і, як наслідок, перевантажень комутаційних вузлів. Різко збільшуються затримки обробки даних і, відповідно, втрати пакетів, що примушує повторювати передавання даних. У свою чергу, це призводить до ще більшого завантаження мережі.

Проблемами регулювання та формування мережного трафіку займалися вітчизняні та зарубіжні вчені: М.М. Климаш, О.І. Стасюк, В.М. Опанасенко, W.Stallings, A.Tanenbaum, В.М. Вишневський та інші.

Найбільш помітний внесок у боротьбу з перевантаженнями дає формування мережного трафіку (shaping) – перетворення його статистичних характеристик шляхом надання послідовності пакетів трафіку періодичного або хоча б квазіперіодичного характеру. При цьому досягається згладжування сплесків інтенсивності трафіку. Тому задача дослідження та розробки нових методів побудови пристроїв формування трафіку з адаптацією до змін параметрів та стану мережі є **актуальною**.

Зв'язок з науковими програмами, планами і темами. Отримані в дисертаційній роботі наукові результати були використані в науково-дослідних роботах «Організація науково-технічної експертизи завдань (проектів) Національної програми інформатизації» (ДР № 0116U000489) і «Дослідження щодо впровадження нових телекомунікаційних технологій на телекомунікаційних мережах загального користування України» (ДР № 0113U005217), які виконувались у Державному підприємстві «Український науково-дослідний інститут зв'язку», а також «Методи і алгоритми управління надійністю комп'ютерних мереж» (ДР № 0115U001472), які виконувались у Державному університеті телекомунікацій.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності функціонування телекомунікаційних мереж нових поколінь шляхом усунення перевантажень апаратно-програмними засобами адаптивного перетворення статистики вхідного трафіку.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі розв'язуються наступні завдання:

- аналіз принципів і методів моніторингу телекомунікаційних мереж нових поколінь;
- аналіз існуючих моделей ТКМ, включаючи детальний аналіз основних груп методів, які описують сучасні моделі трафіку;
- розробка моделей комутаційного мережного вузла як однолінійної системи масового обслуговування;
- синтез методів та пристроїв виявлення/прогнозування появи стану перевантажень мережних вузлів;
- розробка загального методу передавання пакетів мережного трафіку з формуванням та згладжуванням трафіку;
- розробка апаратних і програмних пристроїв адаптивного формування мережного трафіку.

Об'єктом дослідження є процес формування мережного трафіку та управління перевантаженнями телекомунікаційних мереж загального та спеціального призначення.

Предметом дослідження є моделі та методи усунення перевантажень та розробки адаптивних формувань мережного трафіку для забезпечення якості сервісу комп'ютерної мережі з різнорідним самоподібним трафіком.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі застосовувалися методи системного аналізу, теорії систем масового обслуговування, теорії ймовірності і математичної статистики, теорії телетрафіку, теорії оптимізації, моделювання та розрахунки на ЕОМ. У роботі використані теоретичні основи організації мереж з пакетною комутацією.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. *Удосконалено* модель управління параметрами інформаційних потоків у телекомунікаційних мережах. На відміну від існуючих, запропоновану модель побудовано на підґрунті теорії марківських процесів, що дозволяє аналізувати потоки самоподібного трафіку з не гаусівськими ймовірнісними розподілами, зокрема, розподілами з важкими хвостами (long-tale distributions).

2. *Вперше розроблено* алгоритм визначення перевантажень за інформаційним критерієм. В якості критерію пропонуємо використати апроксимовану ентропію параметрів часових рядів. Була розрахована залежність ентропії розподілів від ймовірності успішної передачі даних одного із мережних вузлів. Показано вплив ентропії розподілу на потрібний ресурс для обміну даними.

3. *Удосконалено* метод адаптивного формування потоків мережного трафіку з непрямым зворотним зв'язком. Метод відрізняється від раніше запропонованих тим, що має принципово розширений вектор керуючих дій, внаслідок чого виключається потреба у додатковому каналі зворотного зв'язку.

4. *Вперше розроблено* метод оптимізації параметрів та структури формувача мережного трафіку з контролем довжин інтервалів перевищення рівнів параметрів потоку та введенням додаткового модуля прогнозування необхідного розміру буфера B_{size} відповідно до змін інтенсивності надходження вхідних пакетів.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

1) Запропоновані в роботі моделі квазідетермінованого потоку $Qd / M / 1$, $Qd / D / 1$ придатні до алгоритмізації та з задовільною точністю можуть використовуватися при розрахунках та моделюванні самоподібного мережевого трафіку. Вони засновуються на уповні логічних правилах ймовірнісного оцінювання (зокрема, на правилі "трьох сігма"), що дозволяє отримувати практичні оцінки поточних характеристик квазідетермінованих потоків.

2) Розроблений алгоритм пошуку перевантажень з використанням апроксимованої ентропії часових рядів параметрів трафіку є універсальним і наочним, дозволяє ефективно здійснювати дослідження мереж, що працюють при високому навантаженні (при близьких до одиниці коефіцієнтах використання мережі, тобто на грані насичення). Використання методики при рівні граничного показника коефіцієнту використання $\rho \geq 10\%$ дозволяє зафіксувати ризик перевантаження мінімум на 0,2 умовних одиниці часу (тобто на 20%) раніше, ніж при періодичному вимірюванні середнього розміру буфера мережевого вузла.

3) Запропонований метод адаптивного формування потоку трафіку дозволить підвищити ефективність управління перевантаженнями мережних вузлів, шляхом перетворення вхідного трафіку до виду квазідетермінованого. Доведено зменшення швидкості наростання довжини черги заявок при зростанні коефіцієнта використання $\rho \geq 0,5$ на третину у порівнянні з моделями $M/M/1$ та $M/D/1$. Запропоновані методи й алгоритми адаптації управління частотою генераторів маркерів можна реалізувати програмно чи апаратно.

4) Розроблений метод оптимізації параметрів та структури формувача мережного трафіку, на відміну від існуючих, дає додаткові можливості згладжування викидів самоподібного трафіку з мінімальними втратами користувальницької інформації. Використання предиктора Сміта зі степеневим згладжуванням природно узгоджується зі

статистиками самоподібного трафіку, який має розподіли з "важкими хвостами". Спостерігається зменшення СКВ флуктуацій та інтервалу спадання частоти генератора маркерів до 25% у порівнянні із експоненціальним згладжуванням.

Теоретичні результати і висновки доведені до конкретних алгоритмів і обчислювальних програм. Результати теоретичних досліджень характеристик мережі доведені до конкретних аналітичних виразів. По цих виразах побудовані відповідні графіки, які зручно використовувати при аналізі характеристик телекомунікаційних мереж різного масштабу і призначення.

Особистий внесок здобувача. Всі результати, що складають основний зміст дисертаційної роботи, отримані автором самостійно. В роботах, що були опубліковані у співавторстві, внесок здобувача такий: [5] – виконані асимптотичні порівняльні оцінки для класичного пуассонівського і самоподібного потоків одноканальної системи масового обслуговування з очікуванням, отримані аналітичні вирази для рекурентного обчислення розподілів тривалості очікування обслуговування для будь-якої заявки (пакета); [4, 12] – проведено моделювання функціонування різнорідної мережі для самоподібного вхідного трафіку даних, отримано ентропійні характеристики геометричного, біноміального, рівномірного, експоненціального та нормального модельних розподілів; [10, 16] – проведено порівняльний аналіз методів компенсації затримки зворотного зв'язку стосовно системи управління частотою генератора маркерів та предиктора Сміта зі степеневим згладжуванням з використанням моделі авторегресії і ковзного середнього (АРКС) або шляхом усереднення параметрів вікна; [13] – запропоновано алгоритм тестування телекомунікаційної мережі з оцінюванням пропускної здатності каналу, [9] – запропонований алгоритм для оптимального визначення біта затору керуючої схеми на основі використання функції чутливості продуктивності системи для створення зворотного зв'язку від мережі до джерел даних; [7] – розроблений спосіб динамічного розподілу смуги пропускання каналів передачі між користувачами з урахуванням їх пріоритетів, який дозволяє уникати періодичних місцевих перевантажень маршрутів, а також алгоритм вибору маршрутів по критерію рівномірного завантаження ліній передачі; [3, 8] – запропоновано і вдосконалено спосіб контролю стану мережних вузлів з урахуванням затримок інформації про параметри конкретного мережного вузла і затримок керуючої інформації, необхідної для регулювання параметрів мережного вузла як об'єкта управління; [14, 17] – проаналізовано математичні моделі процесів управління потоками трафіку, розроблено рекомендації щодо структури і параметрів системи управління залежно від інтенсивності потоків даних, їх статистичних описів; [2] – розроблено алгоритми аналізу появи перевантажень мережних вузлів.

Апробація результатів дисертації. Результати, отримані в дисертаційній роботі, апробовані та отримали позитивну оцінку на шести науково-технічних конференціях. Основні положення роботи доповідались на:

- 3 Міжнародній конференції передових інформаційних і комунікаційних технологій (АІСТ), 2-6 червня, 2019, Львів;
- НТК «Актуальні проблеми інформаційних технологій» (АРІТ); 8-10 листопада 2017 р. Київський національний університет імені Тараса Шевченка;
- НТК «Актуальні проблеми інформаційних технологій» (АРІТ); 20-21 листопада 2018 р., Київський національний університет імені Тараса Шевченка;
- XXXI МНТК «Актуальные научные исследования в современном мире. Секция: Технические науки», Переяслав-Хмельницький державний педагогічний університет ім. Григорія Сковороди, 26-27 листопада 2017 р.;
- XII МНТК «Проблеми інформатизації», Київ, Державний університет телекомунікацій. – 12-13 грудня 2018 р.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 19 наукових працях, серед яких: 5 публікацій у виданнях, що представлені в наукометричній базі SCOPUS, 8 статей у фахових виданнях за переліком МОНУ, 7 тез доповідей на

міжнародних наукових конференціях, 4 одноосібних публікації.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, списку використаної літератури і додатка. Загальний об'єм дисертаційної роботи складає 160 сторінок з них: основна частина 116 сторінок, 42 рисунки, 2 таблиці. Список використаної літератури налічує 134 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** визначено проблему, що підлягає вирішенню, обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету дослідження, визначено коло задач, що вирішуються, вказано на наукову новизну, практичне значення отриманих результатів, наведено дані про їх апробацію та впровадження.

У **першому розділі** здійснено аналіз сучасного стану проблеми проектування, впровадження та застосування формувачів мережного трафіку, перспектив реалізації єдиного інформаційного простору у будь-якій мережі, контрольованій за допомогою системи формування мережного трафіку і т.д.

Надзвичайно важливим станом мережі (комп'ютерної, телекомунікаційної тощо) є стан перевантаження окремих мережних вузлів, маршрутів передавання даних, автономних мережних сегментів. Цей стан викликає зниження пропускну здатності мережі, збільшення часу проходження пакетів або їх втрату і при неналежному контролі, аналізі та моніторингу може бути помилково прийнятий за відмову обладнання (і навпаки). Тому контроль та усунення перевантажень є важливою задачею статистичного характеру.

Проаналізовано основні чинники виникнення перевантажень, сформульовано мету й задачі та досліджені механізми управління мережами, такі як управління мережними ресурсами за стандартами концепції управління *TMN (Telecommunication Management Network)*. Досліджено математичні моделі мережного трафіку; особливу увагу приділено статистиці самоподібного трафіку з повільно убуваючими часовими та частотними залежностями й імовірнісними розподілами з "важкими хвостами".

За результатами аналізу сформульовано завдання дослідження.

Другий розділ присвячений методам моніторингу та аналізу мережного обладнання, яке використовується для розв'язання задач управління характеристиками мережі. Побудовано узагальнену модель управління параметрами інформаційних потоків у телекомунікаційних мережах. Сформульовані спрощуючі припущення щодо початкових умов функціонування мережного сегменту.

При аналізі наявності перевантажень виявляються періоди рівномірного споживання мережних ресурсів та пікових навантажень, коли імовірність появи відмов стає значною. Для пуасонівського трафіку можна у замкненій формі отримати розв'язки рівнянь для оцінок імовірності часу затримки пакетів, довжини черг, тощо. Для самоподібного трафіку рівняння для оцінок не мають прямих розв'язків. Тому у роботі запропоновано аналізувати динаміку перевантажень за інформаційним критерієм. Розраховані порівняльні ентропійні характеристики модельних розподілів: геометричного, нормального розподілів та розподілу Парето. При розрахунку ентропійних мір використовуються різні параметри, найбільш придатні для кожного конкретного модельного розподілу.

Сформовано алгоритм визначення мережних аномалій на основі ентропії часових рядів. В якості критерію пропонуємо використати апроксимовану ентропію (Approximate Entropy – ApEn), що кількісно визначає ступінь складності сигналу. До плюсів такого підходу відносяться:

1. Масштабованість. Запропоновані методи здатні використовувати агреговані дані (наприклад, записи Netflow), що робить можливим використання в будь-яких складних і високонавантажених мережах.

2. Чутливість до змін розподілу характеристик трафіку. Ентропійний підхід допомагає зреагувати на аномалію, і в тих випадках, коли такі класичні характеристики трафіку, як packets rate (rps) не виявляють значної аномальної поведінки (тобто, здатний виявляти перевантаження з низьким відносним packets rate).

3. Легкість реалізації та доступна інтерпретація. Вона дозволяє отримати надійні оцінки самоподібних властивостей сигналів, використовуючи невеликі вибірки даних. Результати експериментів показали, що як для довгих, так і для більш коротких послідовностей виходять стійкі оцінки ентропії. Використання методики при рівні граничного показника коефіцієнту використання $\rho \geq 10\%$ дозволяє зафіксувати ризик перевантаження мінімум на 0,2 умовних одиниці часу (тобто на 20%) раніше, ніж при періодичному вимірюванні середнього розміру буфера мережевого вузла.

Розглянуто модель гіпотетичної мережі пакетної комутації; записано рівняння балансу потоків для W вузлів розглянутої мережі:

$$\lambda_i(r) = \lambda_{0i}(r) + \sum_{R=1}^W \lambda_R(r) \pi_R(\lambda_R) P_{Ri} + \lambda_i(r)(1 - \pi_i(\lambda_i)), \quad i = \overline{1, W}; \quad r = \overline{1, R}, \quad (1)$$

де $\lambda_R = \sum_{r=1}^W \lambda_R(r)$; $\pi_R(\lambda_R)$ – стаціонарна імовірність наявності вільного буфера в R -му вузлі мережі. При однорідних буферах досить великого об'єму система рівнянь (1) записується у виді

$$\gamma_i(r) = \lambda_{0i}(r) + \sum_{R=1}^W \gamma_R P_{Ri}(r), \quad (2)$$

де $\gamma_i(r) = \lambda_i(r) \pi_i(\lambda_i)$, $i = \overline{1, W}$; $r = \overline{1, R}$.

З виразів (1) і (2) випливає, що при збереженні балансу потоків, що пропускаються мережею, інтенсивності потоків у вузлах з обмеженою буферною пам'яттю перевершують відповідну інтенсивність потоків у мережі з необмеженою пам'яттю в $1/\pi_i(\lambda_i)$ разів. При цьому число повторень передачі по каналах мережі (R, i) $R \neq i; R, i = \overline{1, W}$ вважається розподіленим по геометричному закону із середнім $1/\pi(\lambda_i)$.

Система рівнянь стосовно імовірностей зайнятості буферної пам'яті вузла має вигляд:

$$B_i = 1 - \pi_i(\lambda_i), \quad i = \overline{1, W}; \quad B_i = f_i(B_1, B_2, \dots, B_W) \dots \quad (3)$$

Систему рівнянь (2) було розв'язано методом Ньютона, швидкість збіжності якого істотно залежить від вибору початкового наближення. Середній час затримки пакетів для розглянутої мережі визначається виразом (3), де сумарні початкові імовірності P_{0i} по всіх

$$R \text{ класах пакетів: } P_{0i} = \sum_{r=1}^R P_{0i}(r); \quad \alpha_i = \lambda_i / \lambda_0$$

У разі, коли зростає навантаження, пакети починають розміщуватися в буферній пам'яті мережних вузлів, що приводить до затримок. Якщо буфер маршрутизатора (комутатора) переповнюється, деякі пакети взагалі можуть бути втрачені. Проте збільшення об'єму буферної пам'яті не приводить до поліпшення ситуації з перевантаженнями, а іноді може навіть погіршити її, оскільки відбудуться повторні передачі пакетів, що дасть додаткове навантаження на мережу.

В сучасних мережах пропускна здатність каналу є досить сталою величиною. Тому її вплив на відносний час передачі пакетів не враховується. Отже, основним параметром, за яким можна судити про завантаженість мережі, є час затримки в буфері маршрутизатора.

Висока надійність мережі та швидкість передавання даних забезпечуються завдяки policing/shaping. Ця задача є не тривіальною внаслідок її неоднозначності та суперечливості критеріїв оптимальності, але її принципово можна розв'язати методами багатокритеріальної оптимізації, наприклад, нелінійної згортки критеріїв. Як показали

наші дослідження, у мережі з ієрархічною інфраструктурою нелінійну згортку критеріїв можна звести до лінійної згортки – різновиду методу аналізу ієрархій Сааті.

Третій розділ присвячений розробці методів ефективної маршрутизації та боротьби з перевантаженнями. При розробці і впровадженні мереж виникла об'єктивна необхідність роздільної обробки трафіку не тільки з різними статистичними характеристиками, але і з принциповими відмінностями в структурі: трафіку "Triple Play" (мова + відео + дані), а потім "Quadruple Play" (мова + відео + дані + мобільні абоненти). Специфічні характеристики мережного трафіку пояснюються високим ступенем групування пакетів на клієнтських ділянках, в маршрутизаторах і вузлах комутації мереж. Навіть якщо джерело породжує регулярний потік пакетів, дані до споживача доставляються серіями з інтервалами простою. Причинами цього є обмежена швидкість роботи мережних пристроїв, недостатній обсяг буферів та ін.

Заявки надходять в послідовні дискретні моменти $t_i, t_{i+1}, \dots, t_n, \dots, t_j \leq t_{j+1}$ для будь-якого j , інтервали між ними $\tau_n = t_n - t_{n-1}$ незалежні і розподілені по одному і тому ж закону $F_n(\tau) = P\{\tau_n < \tau\}$, $n \geq 2$.

Тривалості обслуговування заявок – незалежні величини з законом розподілу $\Psi_n(\zeta) = P\{\zeta_n < \zeta\}$, $n \geq 1$. Позначимо $\xi_n = \zeta_{n-1} - \tau_n$. Тоді за умови, що послідовності $\{\tau_n\}$ і $\{\zeta_n\}$ взаємно незалежні, визначено ймовірність:

$$\Theta(\tau) = P\{\xi_n < \tau\} = \int_0^{\infty} \overline{F}_n(\eta - \tau) d\Psi_n(\eta), \quad (4)$$

де $\overline{F}_n(\eta - \tau) = 1 - F_n(\eta - \tau)$.

Якщо n -а заявка надійде відразу слідом за $(n-1)$ -ою, n -ій заявці, з урахуванням величини інтервалу τ_n , доведеться чекати обслуговування впродовж $\omega_{n-1} + \zeta_{n-1} - \tau_n = \omega_{n-1} + \xi_n$ одиниць часу.

У роботі проведено розрахунки затримок SNMP-повідомлення при централізованому управлінні на мережному й транспортному рівнях та при управлінні на рівні автономних сегментів, коли основні функції управління реалізуються на каналному рівні (рис. 1).

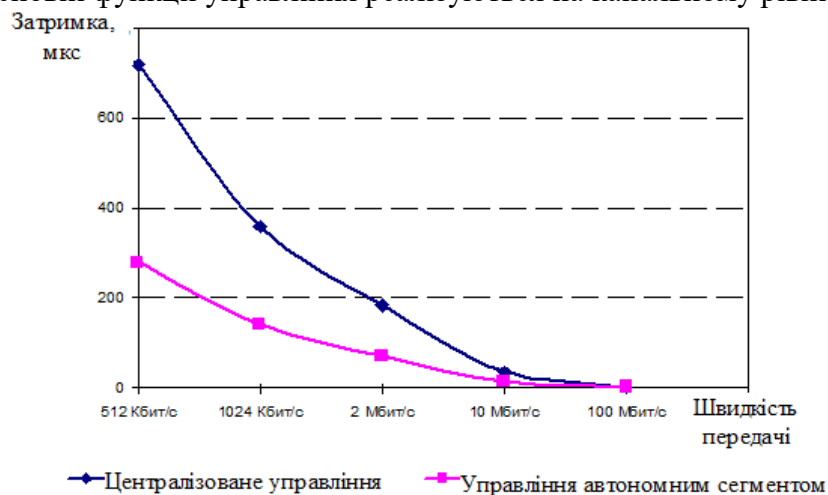


Рис. 1. Затримка управляючих SNMP-повідомлень при централізованому управлінні та при управлінні на рівні автономних сегментів

За результатами порівняльного аналізу різних методів управління великою корпоративною комп'ютерною мережею, можна зробити висновок, що використання стратегії управління на рівні автономних сегментів призведе до скорочення затримки

сигнальної і керуючої інформації мінімум в 2,5 рази, що дозволить значно підвищити якість управління. У кожному із сегментів команди керуючого протоколу прикладного рівня можуть упаковуватися в кадри каналного рівня, минаючи 4 проміжних рівня. Це дозволить значно скоротити час зворотного зв'язку з елементами мережі і підвищити якість управління сегментом.

Запропоновано метод адаптивного формування потоків мережного трафіку і способи настройки структур управління систем з непрямим зворотним зв'язком, які керують параметрами і структурою формувача. Адаптацію до зміни тривалості послідовностей, що надходять, можна здійснювати наступним чином:

- змінюючи тривалість маркера при постійній тривалості захисного інтервалу або змінюючи тривалість захисного інтервалу при постійній тривалості маркера;
- змінюючи розмір та форму "жовтого діапазону", де знаходяться пакети, інтенсивність надходження яких тимчасово знаходиться між гарантованою C_{IR} та граничною E_{IR} пропускними спроможностями комутаційного вузла;
- змінюючи об'єм даних та буферної пам'яті маркерного відра.

У дисертаційній роботі розширено набір параметрів формувача, які оптимізуються. У формувачі з двохрозрядним вимірюванням параметрів потоку додані пакети з умовно зеленим забарвленням, інтенсивність надходження яких короткочасно перевищує гарантовану пропускну спроможність не більше ніж на m секунд. Також додані пакети з умовно жовтим забарвленням, інтенсивність надходження яких короткочасно перевищує граничну пропускну спроможність не більше ніж на n секунд ($n > m$) див. рис.2.

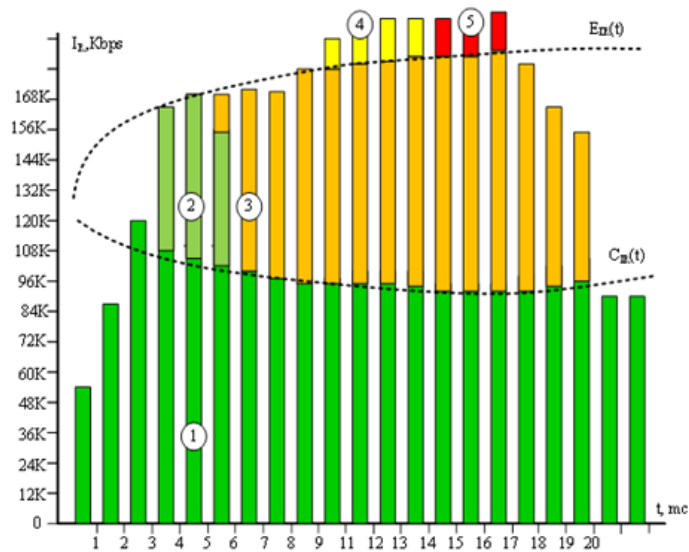


Рис.2. Управління специфікацією пакетів з адаптацією розміру вікна "жовтої області"

Коректне формування трафіку можливо за умов контролю довжин інтервалів перевищення рівнів C_{IR} та E_{IR} . По результатах контролю обчислюються припустимі значення числа m умовно зелених та числа n умовно жовтих пакетів. Таким чином, при додатковому урахуванні параметрів потоку та швидкості зростання черги у буферній пам'яті набір параметрів, що оптимізуються, розширюється на два елементи, які описуються додатковим забарвленням. Природно очікувати відповідного прискорення поновлень інформації про параметри завантаження та скорочення часу реакції маркерного відра. Ці міркування перевірені шляхом розрахунків та комп'ютерного моделювання.

Короткочасні інтенсивності C_{IR} та E_{IR} змінюватимуться в межах, які залежать від максимальної пропускної спроможності комутатора. Тому доцільно адаптуватися до середньої інтенсивності пакетів шляхом зміни інтенсивностей i та управління розміром "діапазону жовтого".

У четвертому розділі проведений аналіз ефективності розроблених методів та пристроїв формування трафіку телекомунікаційних мереж нових поколінь.

Розроблено загальний функціонал ефективності передачі з основними та додатковими ключовими мережними функціями. Сенсори, які використовуються як елементи службових ресурсів, розміщуються на певних вузлах мережної інфраструктури для збору даних, пов'язаних з продуктивністю, наприклад, накопичувальні лічильники протокольних подій. В якості параметрів завдання, які оптимізуються, обрано:

- затримку передачі τ ;
- пропускна спроможність C_p ;
- відносна кількість втрачених пакетів при передачі даних L_p ;
- рівень безпеки та захисту даних при передачі по мережі D_{sp} ;
- якість мережного сервісу S_{Net} ;
- швидкість і надійність обміну файлами по протоколам TCP/IP , UDP тощо.

Використано часткові коефіцієнти кореляції оптимізованих параметрів.

Поточна затримка передачі є одним з найважливіших параметрів якості обслуговування. При розгляді компонентів втрат із-за затримки передачі використаний нормалізований коефіцієнт втрат

$$k_l = \frac{N_{total} - N_{rec}}{N_{total}} = 1 - \frac{N_{total} - N_{rec}}{N_{total}},$$

де N_{total} – загальна кількість переданих пакетів;

N_{rec} – кількість успішно прийнятих пакетів.

Визначено структуру функціоналу для оптимального вибору значення часу тайм-ауту t_{to} :

$$t_{to} = \Psi(a_1 \Delta t_{dc} + a_2 \Delta t_{ack} + a_3 k_{tt} + a_4 k_l) \xrightarrow{V_{to}} \min, t_{to} \geq t_{dc}, \quad (5)$$

де t_{dc}, t_{ack} – затримка доставки та підтвердження відповідно;

k_{tt}, k_l – нормалізовані коефіцієнти кругової затримки та втрат при доставці;

Δt_{dc} та Δt_{ack} – відхилення затримок від нульового значення.

Нормалізація проводиться відносно мінімально можливого часу доставки на найкоротшому маршруті "відправник – отримувач".

Варіації нормалізованого тайм-ауту досить плавні через усереднення часу обігу на інтервалі спостереження. Зі збільшенням варіації часу обігу результуючий тайм-аут швидко зростає. Тому постійний контроль параметрів і стану мережі для запобігання погіршення затримки доставки, швидкого тремтіння (джиттеру) та повільного блукання (вандеру) є актуальною проблемою.

Розглянуті порівняльні характеристики часу очікування та середньої кількості повідомлень у чергах; проведено порівняння параметрів черг $M/M/1$, $M/D/1$ та $Qd/D/1$ і дослідження впливу якості формування трафіку на імовірності блокування та відкидання пакетів для різних моделей очікування. Математична модель комутаційного мережного вузла розглянута як однолінійна система масового обслуговування (СМО). При ідеальному регулюванні та формуванні вхідного потоку в СМО останній стає детермінованим і графік зростання черги представляє собою лінійно-ламану лінію. На практиці, як трафік на виході формувача типу "маркерне відро", так і час обробки пакетів є квазидетермінованими (Qd) з періодом слідування пакетів T_{arr} . Він описується моделями $Qd|G|1|k$ або $Qd|M|1|k$.

Період слідування пакетів набуває вигляду $T_{arr} = T_0 + \xi(n)$, де $\xi(n)$ – нормально розподілена випадкова величина з нульовим математичним сподіванням m_ξ . Середньоквадратичне відхилення (СКВ) $\sigma_\xi < T_0/6$.

Запропоновано формувач трафіку зі змінними швидкостями C_{IR} та E_{IR} . Вони змінюються відповідно до швидкості та прискорення зростання інтенсивності трафіку. Лічильник підраховує число пакетів, що поступають на вхід формувача. Накопичувач, по суті, є дискретний інтегратор, скалярний або векторний. Частота генератора маркерів регулюється у залежності від числа накопичених пакетів, швидкості їх накопичення (теоретично – також і вищих похідних). При спустошенні буферної пам'яті (маркерного відра) швидкість має бути обмежена у залежності від параметрів вхідного трафіку та потенційних можливостей вузла призначення. Схему адаптивного багатошвидкісного формувача трафіку M -го порядку наведено на рис.3. На практиці не має сенсу розраховувати похідні вищого порядку, ніж другий (швидкість і прискорення), оскільки точність статистичного оцінювання швидко погіршується. Відповідно до приведених вище міркувань слід вибирати $M \leq 2$.

Інтегратор M -го порядку зі змінними ваговими коефіцієнтами $k_1 = k_1(t), k_2 = k_2(t), \dots, k_m = k_m(t)$ в принципі може оцінювати швидкість, прискорення і вищі похідні степеню заповнення буфера. Сигналами, які управляють $y_{db}(t-\tau)$, $y_{ib}(t-\tau)$, $y_{ig}(t-\tau)$ регулюється сумарний розмір даних і маркерів в буферах, а також частота надходження маркерів.

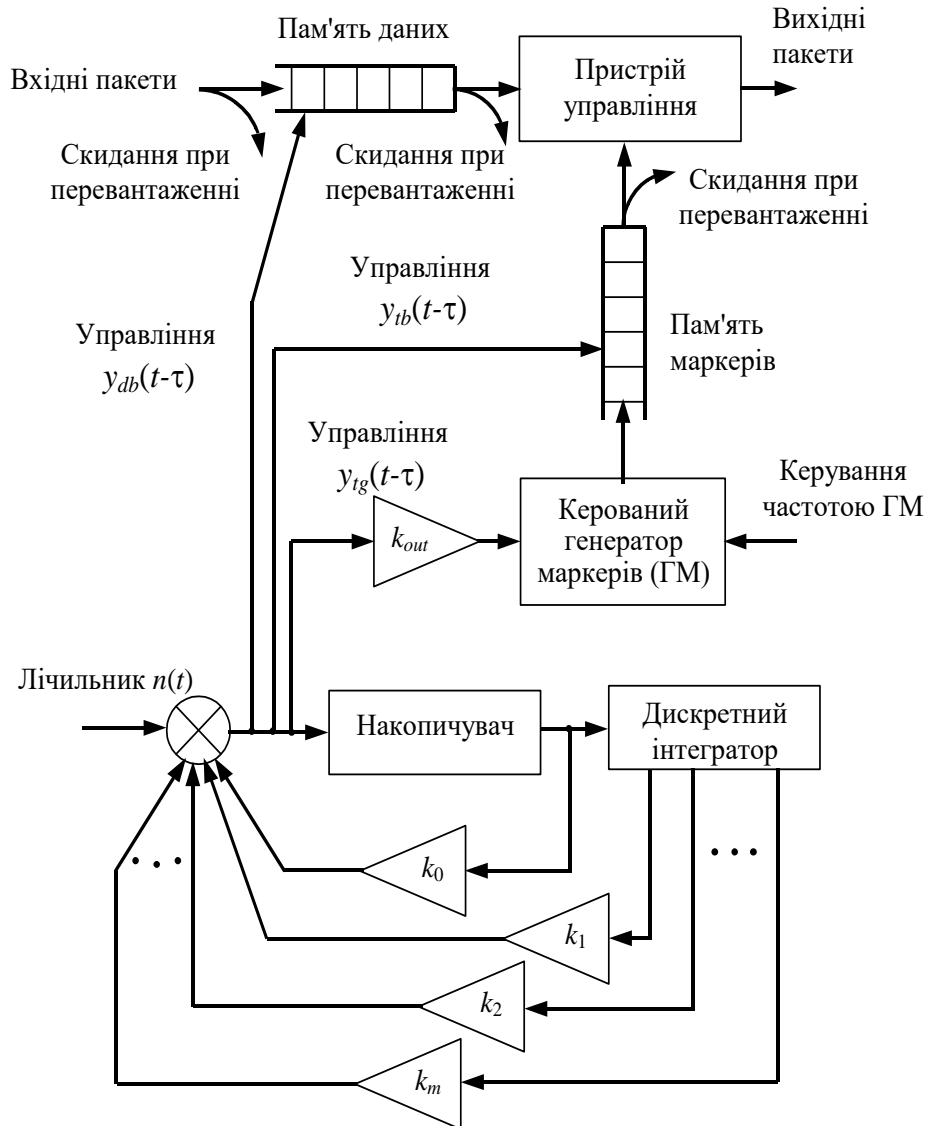
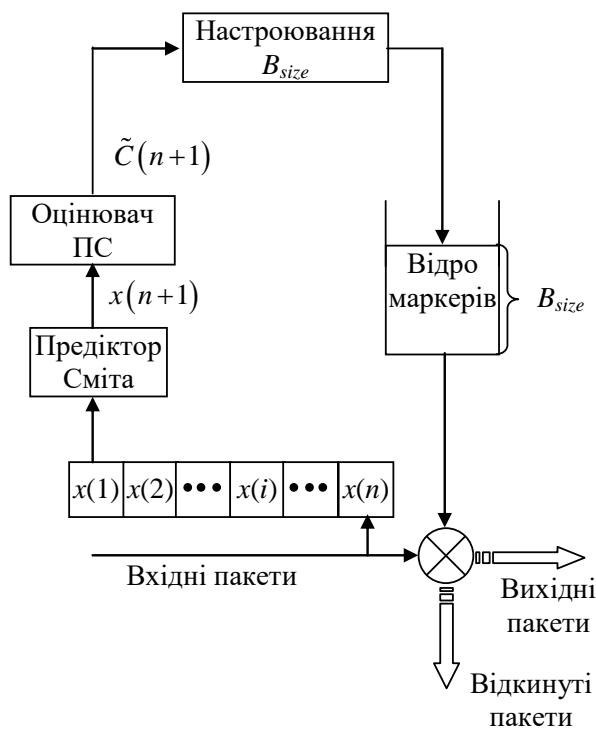


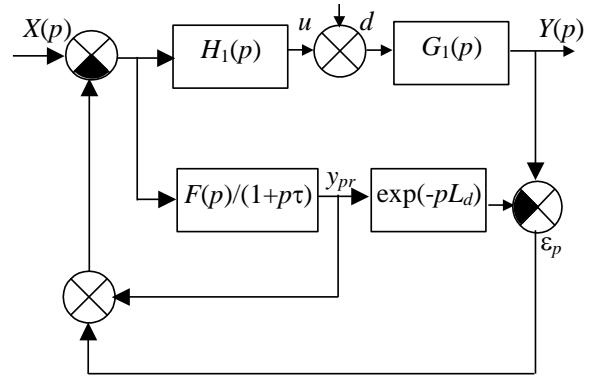
Рис. 3. Схema багатошвидкісного адаптивного маркерного формувача

Основною функцією, яку забезпечує багатошвидкісний ієрархічний формувач трафіку, є розподіл пропускної спроможності. Управління розміром "жовтої області" здійснюється шляхом зміни частоти генератора маркерів (ГМ) на підґрунті результатів прогнозування необхідної пропускної спроможності системи та потрібного розміру буфера. Схема додаткового модуля прогнозування, розробленого у роботі на основі предиктора Сміта, показана на рис. 4, а схема пристрою керування частотою ГМ – на рис. 5.

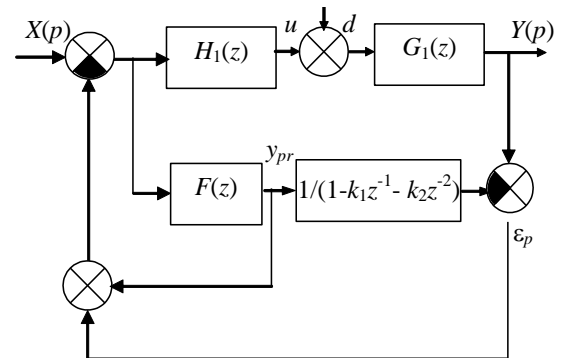
Модифікація предиктора Сміта заключається у заміні функції експоненціального згладжування на функцію степеневого згладжування, яка є оптимальною для згладжування самоподібних процесів з важкими хвостами імовірнісних розподілів.



а) Механізм маркерного відра з n -кроковим прогнозуванням та керуванням пропускною спроможністю (ПС)



б) Класичний предиктор Сміта з експоненціальним згладжуванням



в) Модифікований предиктор Сміта зі степеневим згладжуванням

Рис. 4. Багатошвидкісний формувач мережного трафіку

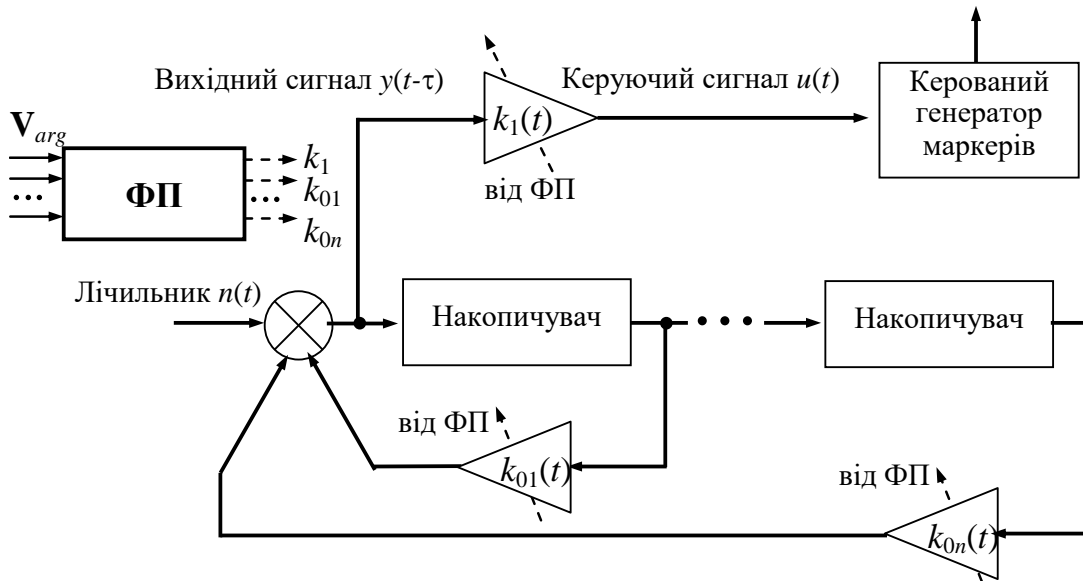


Рис. 5. Схема пристрою керування частотою генератора маркерів

Для самоподібного трафіку, який розглядається у дисертації, моделі та результати теорії МО були модифіковані, зокрема, стосовно стаціонарності трафіку. З огляду на пульсуючий характер самоподібного трафіку, в цілому вже не можна вважати потік заявок найпростішим. Встановлено, що на виході формувача трафіку маємо квазідетерміновані процеси, а час обслуговування розподілений експоненціально. Іншими словами, дисципліна обслуговування за класифікацією Кендала визначається як $Qd/M/1$.

Для отримання асимптотичних порівняльних оцінок для вхідного самоподібного потоку заявок та квазідетермінованого потоку заявок, отриманого після згладжування пульсацій трафіку, розглядалися інтенсивності наступних процесів:

- вхідний потік з середньою інтенсивністю $\lambda(t)$;
- потік обслужених заявок з інтенсивністю $\mu(t)$;
- потік заявок, що не дочекалися обслуговування та покинули чергу;
- інтенсивність потоку покидань черги $\gamma(t)$, за визначенням $\gamma(t) < \lambda(t)$.

На рис. 6 зображені отримані розрахунковим шляхом залежності довжини черги заявок (потрібної пам'яті буфера q_{buff}) від коефіцієнта використання ρ для різних моделей вхідного трафіку.

Графіки зображені для відповідних випадків з коефіцієнтом варіації $k_{var} = \sigma_p / T_{mid p}$. Для моделі $Qd/D/1$ лінія зростання довжини черги $D/D/1$ буде мати випадкові відхилення від прямої, причому чим більше σ_p^2 , тим більше розкид цих відхилень. Однак, бачимо, що при всіх випадках швидкість наростання довжини черги $Qd/M/1$ буде менше, ніж для випадку $M/M/1$ та $M/D/1$. Вже при $\rho \geq 0,5$ значення черги перетвореного трафіку (крива $Qd/M/1$) до 30% менше у порівнянні з моделями $M/M/1$ та $M/D/1$. Чим краща ступінь згладжування розкидів мережного трафіку, тим повільніше наростатиме черга в буферній пам'яті обслуговуючого пристрою.

При збільшенні коефіцієнту варіації викиди та немонотонність залежностей довжини черги заявок стають більш помітними.

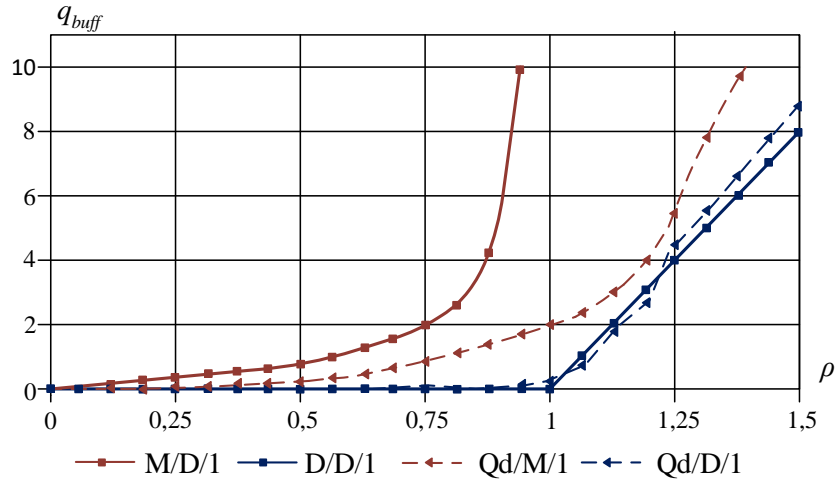


Рис. 6. Залежності довжини черги заявок від коефіцієнта використання ρ для різних моделей вхідного трафіку. $k_{\text{var}} = 0,09$

Формування трафіку представляє собою циклічний процес: вимірювання – переформування – згладжування – прогноз. Для отримання порівняльних оцінок досліджувалися класичний предиктор Сміта з експоненціальним згладжуванням, формувач трафіку без прогнозування та формувач з прогнозом на два кроки.

При зростанні навантаження, обумовленого сплесками інтенсивності самоподібного трафіку, виникають викиди відносної частоти $F_{\text{відн}}$ маркерів, що формуються керованим генератором. При моделюванні досліджувалася статистична динаміка стану формувача трафіку.

У дисертаційній роботі та в статтях автора наведені результати моделювання та проведений їх докладний аналіз. Тут обмежимося найбільш суттєвими результатами (рис. 7 – 11) та короткими висновками.

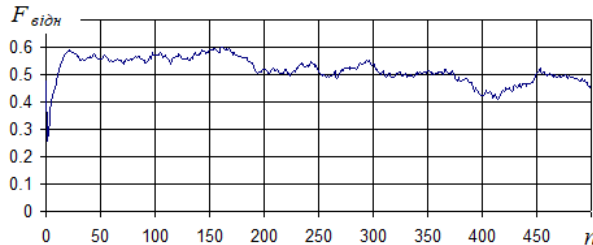


Рис. 7. Пуассонівський трафік, експоненціальне згладжування

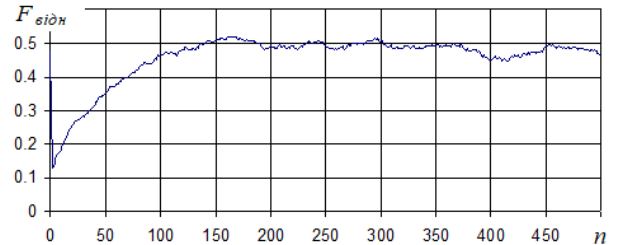


Рис. 8. Пуассонівський трафік, степеневе згладжування

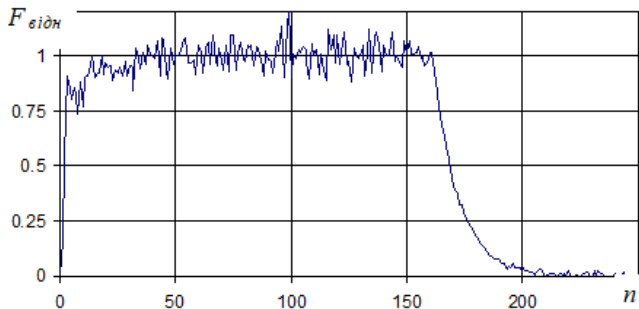


Рис. 9. Самоподібний трафік, експоненціальне згладжування

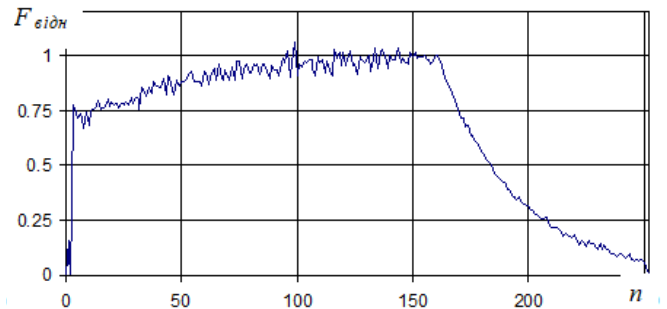


Рис. 10. Самоподібний трафік, степеневе згладжування без прогнозу

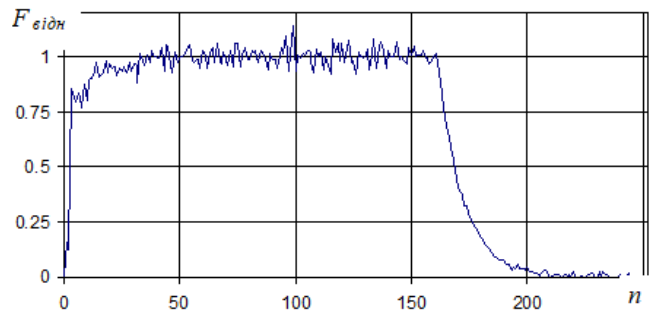


Рис. 11. Самоподібний трафік, степеневе згладжування, прогноз на два кроки

Кидки відносної частоти маркерів $F_{відн}$, які формуються генератором, є короткочасними і швидко приводяться до стаціонарного стану. При цьому ліквідація перевантаження у той чи інший спосіб відбувається досить швидко, так що відносні викиди частоти генератора маркерів порівняно малі. В процесі моделювання неконтрольоване зростання частоти генератора маркерів не спостерігалось.

Експоненціальне згладжування дає більш швидке спадання частоти $F_{відн}$, ніж степеневе, але флуктуації частоти вищі. СКВ флуктуацій при експоненціальному згладжуванні приблизно на 60% більше, ніж при степеневому згладжуванні.

При степеневому згладжуванні та двохкроковому прогнозі спостерігається зменшення інтервалу спадання частоти приблизно на 25% (порівнюємо рис. 10 та 11). Плата за це – додаткові витрати буферної пам'яті.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

Основні наукові та практичні результати дисертаційного дослідження зводяться до наступних положень:

1. Вдосконалено модель управління параметрами інформаційних потоків у телекомунікаційних мережах. На відміну від існуючих, запропоновану модель побудовано на підґрунті теорії марківських процесів, що дозволяє аналізувати потоки самоподібного трафіку з не гаусівськими імовірнісними розподілами, зокрема, розподілами з важкими хвостами (long-tale distributions).

2. З використанням методів імітаційного моделювання, отримано результати аналізу:

а) порівняння часу очікування та середньої кількості повідомлень у чергах;

б) порівняння параметрів черг M/M/1, M/D/1 та Qd/D/1 і вивченню впливу якості формування трафіку на імовірності блокування та відкидання пакетів для різних моделей очікування.

Запропоновано кількісне визначення феномену черг очікування з використанням ключових параметрів ефективності, таких як середня довжина черги (середня кількість клієнтів у черзі), середній час очікування в черзі та середня пропорція часу використання сервісного центру.

3. Розроблений алгоритм пошуку перевантажень з використанням апроксимованої ентропії (Approximate Entropy) часових рядів параметрів трафіку, що кількісно визначає ступінь складності сигналу. Вона дозволяє отримати надійні оцінки самоподібних сигналів, використовуючи невеликі вибірки даних. Алгоритм дозволяє ефективно здійснювати дослідження мереж, що працюють при високому навантаженні (при близьких до одиниці коефіцієнтах використання мережі, тобто на грані насичення). Була розрахована залежність ентропії розподілів від імовірності p успішної передачі даних одного із мережних вузлів. Показано вплив ентропії розподілу на потрібний ресурс для обміну даними та зменшення часу виявлення появи перевантажень.

4. Розроблено метод адаптивного формування потоків мережного трафіку з непрямым зворотним зв'язком. Метод відрізняється від раніше запропонованих тим, що має принципово розширений вектор керуючих дій, внаслідок чого виключається потреба у додатковому каналі зворотного зв'язку.

4. Проблема фрактального трафіку – спорадичні сплески інтенсивності при досить незначному середньому рівні інтенсивності на порівняно довгому інтервалі спостереження. Тому в роботі запропонований новий підхід – забезпечення якості обслуговування при наявності ефекту самоподібності. Ідея цього алгоритму полягає у модифікації механізмів формування трафіку для забезпечення необхідних класів QoS шляхом введення додаткового модуля прогнозування необхідного розміру буфера B_{size} на деякий час вперед відповідно до змін інтенсивності надходження вхідних пакетів.

5. Вперше розроблено метод оптимізації параметрів та структури формувача мережного трафіку з контролем довжин інтервалів перевищення рівнів параметрів потоку. Показано зменшення швидкості наростання довжини черги заявок при зростанні коефіцієнта використання $\rho \geq 0,5$ на третину у порівнянні з моделями $M/M/1$ та $M/D/1$. Розроблений метод, на відміну від існуючих, дає додаткові можливості згладжування викидів самоподібного трафіку з мінімальними втратами користувальницької інформації.

6. Доведено, що на виході формувача типу "маркерне відро" з адаптацією до швидкості зростання черги трафік має квазідетермінований (Qd) характер з періодом слідування пакетів T_{arr} та описується моделями $Qd/G/1/k$, $Qd/M/1/k$. Період слідування пакетів $T_{arr} = T_0 + \xi(n)$, де $\xi(n)$ – нормально розподілена випадкова величина з нульовим математичним чеканням m_ξ та середньоквадратичним відхиленням $\sigma_\xi < T_0 / 6$.

7. Запропоновані процедури формування мережного трафіку досить прості та ефективні. Результати моделювання показують, що можна обмежити частоту генератора маркерів до такої величини, коли весь вхідний трафік буде отриманий, а потім переданий без втрат і повторних передач. Усунення перевантаження досягається за невеликий час, тому коливання навантаження також порівняно невеликі. Для отримання порівняльних оцінок досліджувалися класичний предиктор Сміта з експоненціальним згладжуванням, формувач трафіку без прогнозування та формувач з прогнозом на два кроки. Показано зменшення СКВ флуктуацій та інтервалу спадання частоти генератора маркерів до 25% у порівнянні із експоненціальним згладжуванням.

Запропоновані моделі та методи формування трафіку забезпечують ефективні механізми боротьби з перевантаженнями та підвищення якості обслуговування в телекомунікаційних мережах нових поколінь, Таким чином ціль роботи досягнута, наведені результати можуть бути корисними для теоретичних досліджень та практичних розробок телекомунікаційних мереж різного масштабу і призначення.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових періодичних виданнях, які включено до наукометричної бази SCOPUS:

1. Kozlovskiy V., **Yakymchuk N.**, Selepyna Y., Moroz S., & Tkachuk A. Development of a modified method of network traffic forming. *Informatyka, automatyka, pomiary w gospodarce i ochronie środowiska*, 13(1), 2023, P. 50-53. DOI: <https://doi.org/10.35784/iapgos.3452>

2.Yakymchuk, N., Selepyna, Y., Yevsiuk, M., Prystupa, S., Moroz, S. Monitoring of link-level congestion in telecommunication systems using information criteria. *Informatyka, automatyka, pomiary w gospodarce i ochronie środowiska*, 12(4), 2022, P. 26-30. DOI: <https://doi.org/10.35784/iapgos.3076>

3. Zablotskyi, V., Selepyna, Y., Lyshuk, V., **Yakymchuk, N.**, Tkachuk, A. Method for evaluation quality parameters of telecommunications services | sposób oceny parametrów jakości usług telekomunikacyjnych *Informatyka, automatyka, pomiary w gospodarce i ochronie środowiska*, 2022, 12(2), P. 30–33. DOI: <https://doi.org/10.35784/iapgos.2918>

Статті у вітчизняних та закордонних наукових фахових виданнях:

4. Moshenskyi A., Stanko P., Toroshanko A., **Yakymchuk N.** Algorithms for searching congestions on the basis of the analysis of entropic characteristics of network traffic. *Magyar Tudományos Journal (Hungary)*. 2021. No 49. P. 52-57.

5. Valerii Kozlovsky, **Nataliia Yakymchuk**, Andrii Toroshanko. Comparative evaluation of Puasson's and self-similar traffic of telecommunications networks. *Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології*. 2021. №2(21). С. 41-50. DOI 10.36994/2788-5518-2021-02-02-033

6. **Якимчук Н.М.** Статистичні моделі мережного трафіку. *Зв'язок*. 2021. (1). С.27-34. DOI: 10.31673/2412-9070.2021.012734

7. Штіммерман А.М., **Якимчук Н.М.**, Сорокін Д.В., Торошанко А.І. Управління мережним трафіком на основі диференційованих і інтегрованих послуг. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2020. №4(69). С. 60-68. DOI: 10.31673/2412-4338.2020.046068

8. **Якимчук Н.М.** Торошанко А.І. Методи ідентифікації та комплексної діагностики телекомунікаційних систем. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. 2020. №69. С. 58-65. DOI: <https://doi.org/10.17721/2519-481X/2020/69-06>

9. Торошанко Я.І., **Якимчук Н.М.** Використання функцій чутливості для контролю заторів в телекомунікаційних мережах. *Вісник Університету «Україна». Серія: Інформатика, обчислювальна техніка та кібернетика*. 2019. № 1(22). С. 142-147. DOI: 10.36994/2707-4110-2019-1-22-07

10. Торошанко Я.І., **Якимчук Н.М.** Статистичні моделі управління телекомунікаційними мережами та методи боротьби з перевантаженнями. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2017. №3(56). С. 111-118. http://nbuv.gov.ua/UJRN/vduikt_2017_3_16

11. **Якимчук Н.М.** Порівняльний аналіз методів кореляційного та регресійного аналізу телекомунікаційних мереж. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2017. № 5. С. 128-131.

12. Торошанко Я.І., **Якимчук Н.М.** Аналіз і моделювання різноманітного самоподібного трафіку комп'ютерних мереж. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2017. №4(57). С. 42-51. http://nbuv.gov.ua/UJRN/vduikt_2017_4_7

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

13. Tkachuk, A., Zablotskyi, V., Zabolotnyi, O., Čagaňová, D., **Yakymchuk, N.** Basic Stations Work Optimization in Cellular Communication Network *EAI/Springer Innovations in*

Communication and Computing this link is disabled, 2021, pp. 1–19. DOI: 10.1007/978-3-030-69705-1_1

14. Yaroslav Toroshanko, **Nataliia Yakymchuk**, Yosyp Selepyna, Vyacheslav Cherevyk. Control of Traffic Streams with the Multi-Rate Token Bucket. 2019 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT), 2-6 July, 2019, Lviv, Ukraine. pp. 352-355. DOI: 10.1109/AIACT.2019.8847860.

15. Торошанко Я. І., **Якимчук Н. М.** Використання функцій чутливості для контролю заторів в телекомунікаційних мережах: Міжнародний науково-технічний симпозиум «Теоретичні та прикладні аспекти новітніх технологій інфокомунікацій», 13-17 січня 2019 р., Вишків-Карпати-УУ'19. Вісник Університету «Україна». Серія: Інформатика, обчислювальна техніка та кібернетика. 2019, № 1(22). С. 142-147.

16. **Якимчук Н.М.**, Станко П.О. Кореляційно-регресійний аналіз інформаційних мереж з нестационарним трафіком. Науково-технічна конференція «Актуальні проблеми інформаційних технологій», 20-21 листопада 2018 р. Київський національний університет ім. Тараса Шевченка. С. 25-26.

17. Торошанко Я.І., **Якимчук Н.М.** Діагностика телекомунікаційної мережі на основі множинної та покрокової регресії. XII міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми інформатизації», 12-13 грудня 2018 р. Київ: ДУТ. С. 52.

18. **Якимчук Н.М.** Марківські моделі розвитку навантаження на телекомунікаційну мережу. Науково-технічна конференція «Актуальні проблеми інформаційних технологій», 8-10 листопада 2017 р., Київський національний університет імені Тараса Шевченка. С.49-50.

19. **Якимчук Н.М.** Аналіз та оптимізація комп'ютерних мереж з різнорідним самоподібним трафіком. XXXI Міжнародна наукова конференція «Актуальні наукові дослідження в сучасному світі», Секція: Технічні науки. Переяслав-Хмельницький державний педагогічний університет ім. Григорія Сковороди, 26-27 листопада 2017 г. Вип. 11(31), частина 12. С. 81-86.

АНОТАЦІЯ

Якимчук Н.М. Методи боротьби з перевантаженнями телекомунікаційних мереж нових поколінь шляхом формування потоків різнорідного мережного трафіку.
– На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі. Луцький національний технічний університет.

Дисертаційна робота присвячена створенню методів та пристроїв формування потоків різнорідного мережного трафіку. Телекомунікаційні мережі нового покоління (*NGN, FN*) – це цифрові мережі обміну інформацією різних видів. Відповідно і мережний трафік є різнорідним і самоподібним (фрактальним) за визначенням. У той же час при передаванні квазіперіодичних потоків зростання черг у буферній пам'яті є помітно повільнішим, а час обробки пакетів у комутаційному вузлі – значно меншим. Цей шлях є новим і перспективним для розвитку телекомунікаційних мереж нового покоління та їх конвергенції з "чистими" *IP*-мережами. У дисертаційній роботі сформульовані завдання боротьби з перевантаженнями шляхом усунення сплесків інтенсивності різнорідного мережного трафіку, обумовлених наявністю його самоподібності. Розроблено метод кондиціонування трафіку шляхом надання йому квазіперіодичного характеру. Проаналізовано математичну модель квазіперіодичного потоку трафіку. Такий потік представляє собою послідовність пакетів з майже постійним періодом слідування $T_r = T_r + \delta_r T_r$, де $T_r = \text{const}$ – теоретично постійний період слідування; δ_r – нормально розподілена випадкова величина з нульовим математичним сподіванням.

В дисертаційній роботі у відповідності до моделі квазіперіодичного потоку сформульовано модифіковані моделі обслуговування пакетів, що поступають до n -канальної системи; їх позначено $Qd/D/n$, $Qd/M/n$. У класифікацію Кендала додано клас Qd – квазідетермінований потік з нормально розподіленим відхиленням від постійного періоду надходження заявок. Виведено приблизні вирази для отримання асимптотичних оцінок середньої довжини черги та середнього часу очікування заявок.

Розроблено адаптивні багатошвидкісні пристрої формування/згладжування послідовності пакетів різнорідного самоподібного трафіку. Для передбачення потреб пропускної спроможності різних каналів передавання даних розроблено модифікований предиктор Сміта зі степеневим згладжуванням, яке є оптимальним для згладжування самоподібних процесів з важкими хвостами імовірнісних розподілів. В залежності від швидкості змін степеню самоподібності трафіку запропоновані різні методи адаптації: по ширині діапазону жовтих, умовно жовтих та червоних пакетів, по швидкості зростання сплеску інтенсивності та по іншим параметрам трафіку. Вибрано та обґрунтовано функціонал ефективності передачі пакетів різнорідного трафіку зі сплесками інтенсивності та різними степенями самоподібності.

Проведено аналіз ефективності методів формування трафіку. Виконані комп'ютерні розрахунки та моделювання процесів обслуговування пуасонівського, самоподібного та квазіперіодичного мережного трафіку. Результати розрахунків та моделювання свідчать, що при всіх випадках швидкість наростання довжини черг $Qd/D/n$, $Qd/M/n$ буде найменшою.

Таким чином, доведено, що при використанні адаптивних ієрархічних багатошвидкісних пристроїв згладжування різнорідного трафіку вдається усувати короткочасові сплески інтенсивності та, відповідно, позбавитися втрат пакетів, затримок та повторних передач.

Ключові слова: телекомунікаційна мережа, самоподібний трафік, регулювання/згладжування, класифікація Кендала, предиктор Сміта

ABSTRACT

Yakymchuk N.M. Methods of combating congestion of telecommunication networks of new generations by forming flows of heterogeneous network traffic. – On the right of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.12.02 – telecommunication systems and networks. – Lutsk State Technical University.

The dissertation work is devoted to creation of methods and devices of formation of streams of heterogeneous network traffic. Next Generation Networks (NGN) are digital networks of information exchange of various types. Accordingly, network traffic is heterogeneous and self-similar (fractal) by definition. At the same time, when transmitting quasi-periodic streams, the queue growth in the buffers increases the queue growth in the buffer memory, and the packet processing time in the switching node is much shorter. This path is new and promising for the development of new generation telecommunication networks and their convergence with "pure" IP networks. The dissertation formulates the tasks of overload control by eliminating bursts of intensity of heterogeneous network traffic due to the presence of its self-similarity. The method of air conditioning of traffic by giving it a quasi-periodic character is developed. The mathematical model of quasi - periodic traffic flow is analyzed. This flow is a sequence of packets with an almost constant follow-up period $T_r = T_r + \delta_r T_r$, where $T_r = \text{const}$ is a theoretically constant follow-up period; δ_r - normally distributed random variable with zero mathematical expectation.

In the dissertation work in accordance with the model of quasi-periodic flow the modified models of service of the packages arriving to n-channel system are formulated; they are marked $Qd/D/n$, $Qd/M/n$. A class Qd , which is a quasi-deterministic flow with a normally distributed deviation from the constant period of receipt of orders is added to Kendall's classification. Approximate expressions for deriving asymptotic estimates of the average queue length and the average waiting time of applications are derived.

Adaptive multi-speed devices for forming / smoothing the sequence of packets of heterogeneous self-similar traffic have been developed. To predict the bandwidth needs of different data transmission channels, a modified Smith predictor with power smoothing has been developed, which is optimal for smoothing self-similar processes with heavy tails of probability distributions. Depending on the rate of change in the degree of self-similarity of traffic, different methods of adaptation are proposed: the width of the range of yellow, conditionally yellow and red packets, the rate of growth of the intensity surge and other traffic parameters. The functional of transmission efficiency of heterogeneous traffic packets with bursts of intensity and different degrees of self-similarity is selected and substantiated.

The analysis of efficiency of proposed methods is carried out. Computer calculations and modeling of Poisson, self-similar and quasi-periodic network traffic maintenance processes are performed. The results show that in all cases the rate of increase in the length of the queues $Qd/D/n$, $Qd/M/n$ will be the lowest.

Thus, it is proved that when using adaptive hierarchical multi-speed smoothing devices of heterogeneous traffic it is possible to eliminate short-term bursts of intensity and, accordingly, to get rid of packet losses, delays and retransmissions.

Keywords: telecommunication network, self-similar traffic, policing/shaping, Kendall's classification, Smith's predictor