

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ**

**Андрушко Юрій Володимирович**

УДК 621.391

**МЕТОД АКТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ЧЕРГОЮ ВУЗЛА  
ТРАНСПОРТНОЇ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ**

Спеціальність 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2011

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано в Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

**Науковий керівник:**

доктор технічних наук, доцент **Євсєєва Оксана Юрїївна**, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри телекомунікаційних систем.

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор **Серков Олександр Анатолійович**, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри систем інформації;

кандидат технічних наук, доцент **Акулінічев Артем Аркадійович**, Національний аерокосмічний університет ім. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», доцент кафедри прийому, передачі та обробки сигналів.

Захист відбудеться «16» травня 2012 р. о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.09 у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: Україна, 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: Україна, 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

Автореферат розісланий «10» квітня 2012 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Є.В. Дуравкін

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Задача побудови конвергованих мереж на основі концепції мереж наступного покоління (Next Generation Network, NGN), а також велика популярність технологій уніфікованих комунікацій (Unified Communications, UC) вивели на перше місце задачу надання послуг із гарантованою якістю обслуговування (Quality of Service, QoS). Нині існує декілька підходів до забезпечення гарантованої якості обслуговування, серед яких найбільш поширеним на практиці є підхід диференційованого обслуговування у рамках однойменної архітектури – DiffServ (Differentiated Services). Ця архітектура, по суті, є сукупністю окремих протоколів і механізмів управління трафіком, серед яких одне з найважливіших місць займають методи активного управління чергою (Active Queue Management, AQM) на вузлах транспортної телекомунікаційної мережі (ТКМ).

Методи цієї групи шляхом обмеження поточної довжини черги вирішують дві найважливіші і водночас суперечливі телекомунікаційні задачі: запобігання перевантаженням і обмеження максимальної затримки пакетів мережного трафіку. Як показує аналіз, серед усіх методів AQM найбільш поширеним є алгоритм довільного раннього виявлення (Random Early Detect, RED) і різні його модифікації. Проте базовий алгоритм довільного раннього виявлення, а також деякі з його модифікацій мають істотні недоліки, серед яких, передусім, статичність параметрів, які вручну конфігуруються, що не дозволяє динамічно реагувати на зміни стану мережі. Окрім цього, математична модель, яку покладено в основу процедури оцінювання середньої довжини черги більшості відомих методів, орієнтована на стаціонарний характер мережного трафіку і не враховує нестационарну компоненту, що має місце на практиці. Як результат, зазначене не дозволяє досягти максимально ефективного управління трафіком у рамках відомих методів AQM і стимулює дослідження щодо розробки нових і подальшого вдосконалення відомих методів активного управління чергою на вузлах транспортної телекомунікаційної мережі.

З іншого боку, для створення та апробації перспективних методів активного управління чергами важливою складовою є аналітичний опис мережного трафіку і процесу його обробки в ТКМ. Це дозволить оцінити характеристики якості обслуговування в умовах застосування методів, що розробляються. Як показано в літературі, мережний трафік з високою мірою адекватності може бути описаний як самоподібний випадковий процес. Тоді, розглядаючи вузол телекомунікаційної мережі як систему масового обслуговування (СМО), наприклад, виду  $M/G/1/\infty$  або  $M/G/\infty$  в літературі отримані аналітичні вирази для оцінки ряду ймовірнісно-часових характеристик – середньої довжини черги, ймовірності втрати і середнього часу затримки пакетів у вузлі. Проте, часто телекомунікаційний трафік, особливо трафік TCP/IP-мережі, володіє не всім на-

бором властивостей самоподібного випадкового процесу, а лише деякими з них, що не дозволяє трактувати його як самоподібний повною мірою і, відповідно, застосувати відомі формули. Нерідко серед усіх ознак самоподібного процесу є присутньою лише одна: час обслуговування в реальній ТСП/IP-мережі є випадковою величиною з дуже великою дисперсією, що, у свою чергу, пов'язано з наявністю «важких хвостів» у щільності її розподілу. Як результат, доцільним є аналіз відповідної СМО, тобто такої, що враховує «важкі хвости» в законах розподілу, з виведенням аналітичних виразів для оцінки показників якості обслуговування.

Таким чином, актуальною є науково-прикладна задача, пов'язана з розробкою математичної моделі ТСП/IP-мережі і вдосконаленням методів активного управління чергами вузла транспортної телекомунікаційної мережі.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами.** Дисертаційна робота виконана відповідно до положень «Концепції національної інформаційної політики», «Концепції Національної програми інформатизації», «Концепції конвергенції телефонних мереж і мереж з пакетною комутацією в Україні», «Основних засад розвитку інформаційного суспільства в Україні на 2007 – 2015 роки». і є продовженням і подальшим розвитком науково-дослідної роботи (НДР) №235-1 «Методи проектування телекомунікаційних мереж NGN і управління їх ресурсами», що виконувалася кафедрою телекомунікаційних систем Харківського національного університету радіоелектроніки, в якій здобувач виступав виконавцем. Впровадження результатів дисертаційної роботи підтверджене відповідними актами.

**Мета роботи** – підвищення ефективності функціонування телекомунікаційної мережі за рахунок вдосконалення методів активного управління чергами на вузлах мережі.

**Наукові завдання дослідження:**

1. Аналіз існуючих методів активного управління чергою і особливостей їх функціонування в сучасних телекомунікаційних мережах з метою виявлення шляхів їх подальшого вдосконалення.

2. Розробка аналітичної моделі ТСП/IP-мережі і отримання виразів для оцінки показників якості обслуговування в мережі.

3. Розробка процедури адаптивного підстроювання параметрів алгоритму довільного раннього виявлення.

4. Розробка процедури оцінювання середньої довжини черги вузла транспортної телекомунікаційної мережі на основі оцінок випадкових процесів.

5. Розробка методу активного управління чергою, що враховує нестаціонарність мережного трафіку, і комплексну дію випадкових чинників на чергу вузла транспортної мережі.

6. Проведення лабораторного експерименту та імітаційного моделювання з метою оцінки ефективності методу, що розробляється.

7. Розробка практичних рекомендацій щодо застосування запропонованих процедур і методу активного управління чергою в сучасних і перспективних ТКМ.

**Об'єкт дослідження.** Процеси активного управління чергою на вузлі транспортної телекомунікаційної мережі.

**Предмет дослідження.** Модель транспортної телекомунікаційної ТСП/IP-мережі і методи активного управління чергою вузла в умовах нестационарного мережного трафіку.

**Методи дослідження.** У роботі були застосовані як аналітичні методи, так і засоби імітаційного моделювання. Під час розробки аналітичної моделі ТСП/IP-мережі були використані апарат марківських випадкових процесів і результати теорії масового обслуговування. Під час розробки процедур і методу активного управління чергою вузла були використані методи імітаційного моделювання, рекурсивні методи оцінки випадкових величин і випадкових процесів, фільтр Калмана-Б'юсі.

#### **Наукова новизна отриманих результатів.**

Основними науковими результатами, отриманими в дисертаційній роботі, є:

1. Набула подальшого розвитку модель ТСП/IP-мережі. Новизна полягає в поданні мережі у вигляді системи масового обслуговування з марківським процесом на вході, гама-розподілом часу обслуговування, одним обслуговуючим пристроєм і обмеженим буфером. Це дозволило отримати оцінки середньої довжини черги ТСП-сегментів, які очікують на підтвердження, імовірність втрати і середній час затримки сегментів у системі, а також їх середньоквадратичні відхилення.

2. Вдосконалено процедуру відкидання пакетів при активному управлінні чергою вузла транспортної телекомунікаційної мережі. Новизна процедури полягає у динамічному адаптивному підстроюванні знаменника граничної імовірності відкидання та експоненціального вагового коефіцієнта черги. Це дало можливість підвищити ефективність використання пропускну здатності мережі.

3. Вдосконалено процедуру оцінювання середньої довжини черги вузла транспортної телекомунікаційної мережі. Новизна рішення полягає в тому, що в основу запропонованої процедури покладено фільтр Калмана-Б'юсі. Це дозволило врахувати нестационарний характер мережного трафіку при активному управлінні чергою.

4. Набув подальшого розвитку метод активного управління чергою вузла транспортної телекомунікаційної мережі. Новизна методу полягає в застосуванні вдосконаленої процедури оцінювання середньої довжини черги на основі фільтру Калмана-Б'юсі спільно з процедурою динамічного адаптивного підстроювання параметрів відкидання пакетів. Запропонований метод в умовах обслуговування нестационарного мережного трафіку дозволяє підвищити ефективність використання пропускну здатності мережі.

**Практичне значення результатів роботи.** Запропонована в роботі аналітична модель TCP/IP-мережі може бути використана під час аналізу і синтезу як існуючих, так і перспективних методів управління трафіком. Запропоновані метод активного управління чергою і процедура оцінювання середньої довжини черги дозволяють більш ефективно використати пропускну здатність транспортної мережі у разі виникнення перевантажень (в середньому на 10 – 14%). Окрім цього, результати дисертаційної роботи були використані у рамках НДР №235-1 «Методи проектування телекомунікаційних мереж NGN і управління їх ресурсами», що проводилася в Харківському національному університеті радіоелектроніки. Запропоновані математична модель і методи експериментального дослідження використані у навчальному процесі Харківського національного університету радіоелектроніки, що підтверджується відповідними актами.

**Особистий внесок здобувача.** Всі основні наукові результати, подані у дисертаційній роботі, отримані автором самостійно. Крім того, у спільній роботі [5] авторові належить практичне обґрунтування й опис розподілу навантаження з точки зору забезпечення необхідних параметрів QoS. У роботі [8] автором реалізована ідея адаптивного підстроювання параметрів алгоритму, розроблена методика і реалізовано імітаційне моделювання досліджуваного фрагмента мережі.

**Апробація.** Результати дисертації докладалися на 6-и науково-технічних конференціях міжнародного і загальноукраїнського рівнів, на кафедральних і загальноузівських семінарах і конференціях, серед яких : 11-й і 13-й міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у ХХІ ст.» (Харків, 2007, 2009); науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій» (Київ, 2007); міжнародні радіоелектронні форуми «Прикладна радіоелектроніка. Стан і перспективи розвитку» МРФ-2008 (Харків, 2008), МРФ-2011(Харків, 2011).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 11 наукових роботах, серед яких 5 виконано без співавторства. Серед праць 4 статті опубліковані в наукових спеціалізованих виданнях, затверджених Міністерством освіти і науки, молоді та спорту України [5], [8 –10]. Окрім цього, матеріали дисертації опубліковані в семи тезах доповідей на науково-технічних форумах і конференціях [1 – 4] [6 –7], [11].

**Структура та обсяг роботи.** Робота складається зі вступу, 4 розділів і одного додатку. Загальний обсяг дисертації становить 168 сторінок основного тексту, серед яких 30 сторінок з рисунками і таблицями, 2 сторінки додатків, 106 джерел бібліографічного огляду на 10 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** розкрито стан досліджуваної наукової проблеми, обґрунтовано актуальність теми роботи, сформульовано наукову задачу та визначено мету досліджень. Зазначено наукову новизну та практичне значення отриманих у ро-

боті результатів. Наведено дані про апробацію на конференціях і публікацію результатів дисертаційної роботи.

У **першому розділі** зроблено аналіз сучасного стану і тенденцій розвитку телекомунікаційних мереж з точки зору якості послуг, що надаються. На підставі аналізу різних телекомунікаційних технологій і мереж, а також відомих способів надання гарантій щодо якості обслуговування, була встановлена важлива роль методів активного управління чергою для запобігання перевантаженням і їх місце у рамках архітектури DiffServ.

Було проаналізовано відомі методи активного управління чергою та їх модифікації, серед яких RED, Weighted RED (WRED), Flow WRED (FRED), Adaptive RED (ARED) та інші. З'ясовано, що загальним недоліком існуючих методів активного управління чергою є використання наближених математичних моделей, які не відповідають дійсності повною мірою, та евристичність схем, покладених в основу цих методів, а також статичність параметрів, що адміністративно настроюються. На підставі результатів аналізу сформульовані вимоги до перспективних методів контролю і запобігання перевантаженням у телекомунікаційних мережах, які стосуються передусім важливості урахування динаміки і нестационарності процесів інформаційного обміну; зменшення кількості й ступеня впливу статичних параметрів, що адміністративно настроюються, і спрямовані на перехід до адаптивної зміни значень параметрів методу відповідно до змін характеристик каналу зв'язку та на заміну використовуваного математичного апарату.

Як показав аналіз, сучасний трафік TCP/IP-мереж NGN характеризується самоподібністю та наявністю «важких хвостів» у законах розподілу більшості його характеристик (інтервали надходження, тривалість обслуговування, тривалість сеансу зв'язку та ін.). За наявності цих властивостей розрахунок показників якості обслуговування мережі та параметрів мережних пристроїв, виконаний з використанням формул Ерланга, дає великі похибки. Було проведено огляд найбільш поширених методів і моделей, що використовуються для аналізу й синтезу самоподібного трафіку та мереж, в яких цей трафік циркулює. Зазначено труднощі у використанні деяких моделей і методів, пов'язані зі складністю математичного апарату та неможливістю здобуття точних параметрів та виразів для них. Також було показано, що у деяких випадках мережний трафік не має всіх властивостей самоподібного процесу, а тільки деякі з них. У такому випадку є можливість спростити подання TCP/IP-мережі у вигляді СМО та отримати аналітичні вирази для показників QoS.

Відповідно до проведеного у розділі аналізу було сформульовано наукову задачу, на розв'язання якої спрямована дисертаційна робота, а також окремі задачі дослідження, розв'язання яких було забезпечене в наступних розділах дисертації.

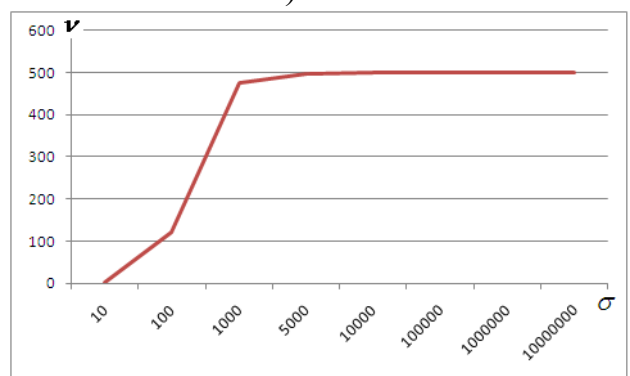
У другому розділі отримано наближені вирази, які можуть бути використані для аналітичного моделювання процесу обслуговування трафіку в телекомунікаційній мережі. На підставі аналізу сучасних телекомунікаційних TCP/IP-мереж, що зроблено у першому розділі, було встановлено, що в сучасних мережах трафік характеризується самоподібністю. Відповідно до цього існує досить велика кількість сучасних розробок аналітичного характеру. Водночас, реальний мережний трафік серед усіх ознак самоподібного процесу часто володіє лише одним: час обслуговування в реальній TCP/IP-мережі характеризується наявністю «важких хвостів» у щільності його розподілу, ознакою чого є дуже велика дисперсія  $\sigma \rightarrow \infty$ . Тому доцільно розглядати телекомунікаційну мережу як систему масового обслуговування, в якій розподіли тривалості обслуговування заявки мають «важкі хвости».

З огляду на це, в роботі було проведено аналіз СМО  $M / \Gamma / 1 / m$ , в якій час обслуговування пакета має гама-розподіл. Було показано, що в граничному випадку, коли середньоквадратичне відхилення (СКВ) часу обслуговування трафіку в мережі  $\sigma \rightarrow \infty$  і при фіксованому його середньому значенні, гама-розподіл набуває властивості «важкого хвоста».

З цією метою було проведено аналітичне моделювання СМО  $M / \Gamma / 1 / m$ , де досліджувалася телекомунікаційна мережа в умовах малого і великого завантаження з варіюванням СКВ часу обслуговування. За результатами аналітичного моделювання було побудовано залежності значень різноманітних параметрів QoS від СКВ часу обслуговування. Дві з цих залежностей – для часу перебування заявки в системі та втрати пакету – наведені на рис. 1, інші мають схожий якісний вигляд. Аналіз залежностей показав, що всіх їх об'єднує наявність трьох зон – зони повільного зростання, інтенсивного зростання і зони насичення. Досягнення зони насичення при вищих значеннях СКВ часу обслуговування у разі малого завантаження мережі має прямий фізичний зв'язок з реальними мережами. При невисокому навантаженні досягнення граничних показників



а)



б)

Рис.1. Залежність часу перебування заявки в системі (а) та втрати пакету від СКВ часу обслуговування



продуктивності потребує великих значень СКВ часу обслуговування, а отже, і високої заповненості буферів.

На підставі аналізу СМО  $M/G/1/m$  в умовах  $\sigma \rightarrow \infty$  у розділі були отримані аналітичні вирази для визначення більшості найважливіших показників якості обслуговування системи, таких як середня кількість заявок у системі  $\bar{N}$ , середня довжина черги  $\bar{Q}$ , інтенсивність обслуговування заявок  $\bar{\lambda}_D$  і ймовірність втрати заявки  $P_{nz}$ :

$$\bar{N} = M\bar{p}_M = \frac{M\rho}{1+\rho}, \quad (1)$$

$$\bar{Q} = m\bar{p}_M = \frac{m\rho}{1+\rho}, \quad (2)$$

$$\bar{\lambda}_D = \frac{\lambda}{1+\rho}, \quad (3)$$

$$P_{nz} = \bar{p}_M = \frac{\rho}{1+\rho}, \quad (4)$$

де  $m$  – об'єм накопичувача СМО;  $M = m + 1$ ;  $\lambda$  – інтенсивність надходження потоку;  $\rho$  – відносний рівень завантаження СМО.

На додаток до аналітичних виразів (1) – (4) для базових показників якості обслуговування телекомунікаційної мережі був отриманий ряд не менш важливих специфічних виразів для СКВ середньої довжини черги і кількості заявок у системі, середнього часу очікування і середнього часу перебування заявки в системі та їх граничних значень.

Був проведений аналіз СМО  $MAR/G/1/m$  з марківським процесом на вході в умовах  $\sigma \rightarrow \infty$ , що дозволяє моделювати специфіку протоколу ТСП, на підставі чого вдалося отримати наближені аналітичні співвідношення для оцінки таких показників якості обслуговування, як середня довжина черги ТСП-сегментів, які чекають на підтвердження, імовірність втрати і середній час затримки сегментів у системі, а також їх середньоквадратичні відхилення.

**Третій розділ** присвячено розробці вдосконаленої процедури відкидання пакетів методу довільного раннього відкидання. З метою визначення базових показників ефективності було проведено імітаційне моделювання існуючого методу довільного раннього відкидання у середовищі NS-2. Структурна схема експерименту наведена на рис. 2.

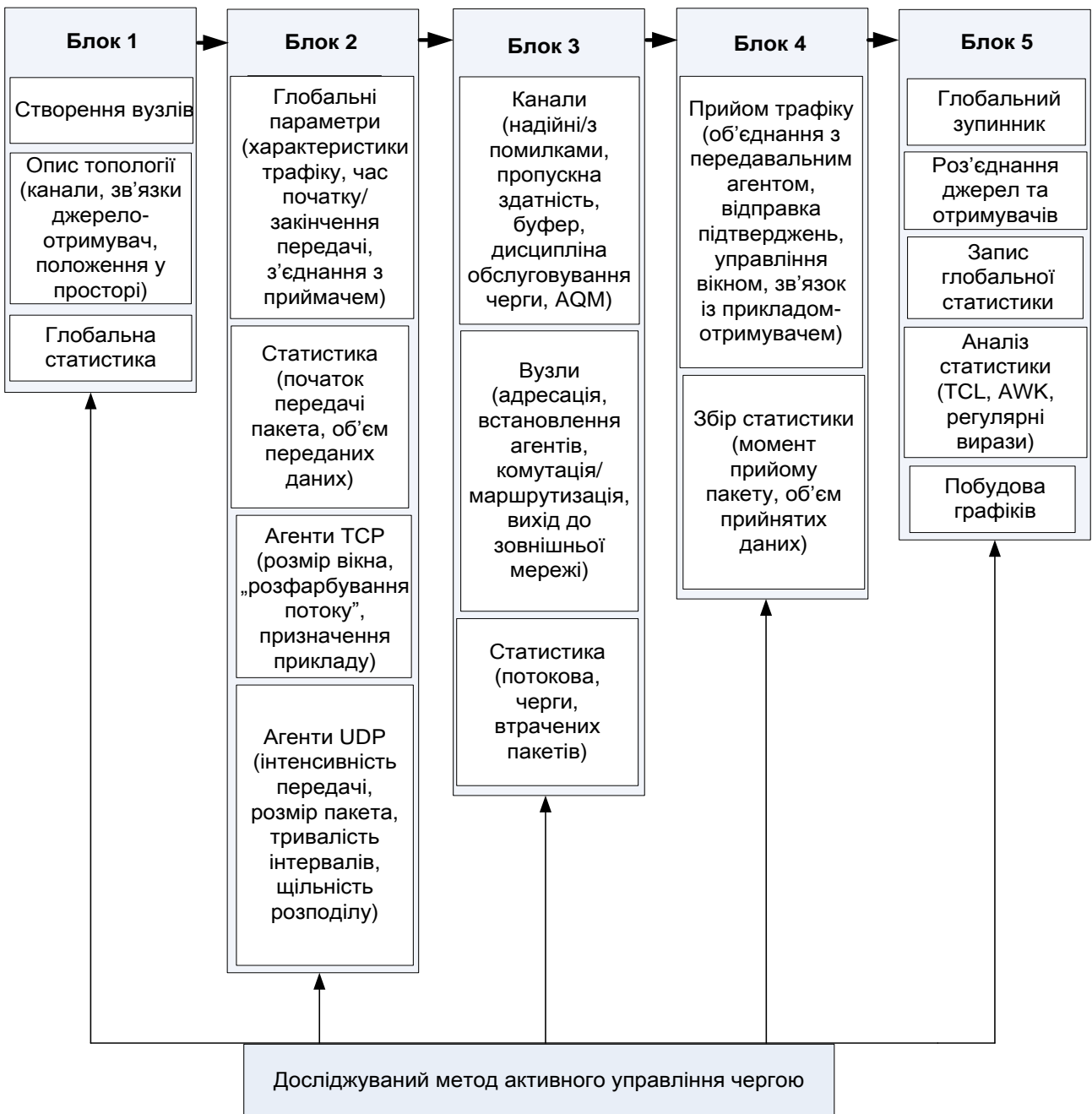


Рис. 2. Структурна схема експерименту

Під час аналізу результатів експериментального дослідження використовувалися два показники ефективності:  $G$ , що відбиває корисну пропускну здатність на прикладному рівні та  $E$ , який характеризує долю даних, що не повторюються, успішно доставлених одержувачеві  $i$ -м потоком  $D_i$  відносно об'єму переданих  $i$ -м потоком даних  $T_i$ :

$$G = \frac{8 \cdot \sum_{i=1}^N D_i}{1000 \cdot \tau_{\text{сум}}}, \quad (5)$$

$$E = \frac{\sum_{i=1}^N D_i}{\sum_{i=1}^N T_i}, \quad (6)$$

де  $\tau_{\text{сум}}$  – тривалість моделювання.

Досліджувана топологія (рис. 3) містила набір передавальних і приймальних пристроїв. Основним об'єктом дослідження були потоки протоколу TCP. Додатково в мережі були присутні джерела фонового трафіку, поданого протоколом UDP. Доля фонового трафіку складала 20 – 40%. Передбачалося, що передача даних у досліджуваній топології відбувається в одному напрямку. Бітові помилки під час передачі даних через канал зв'язку були відсутні для аналізу впливу виключно результатів роботи методу активного управління чергою і переповнення буфера.

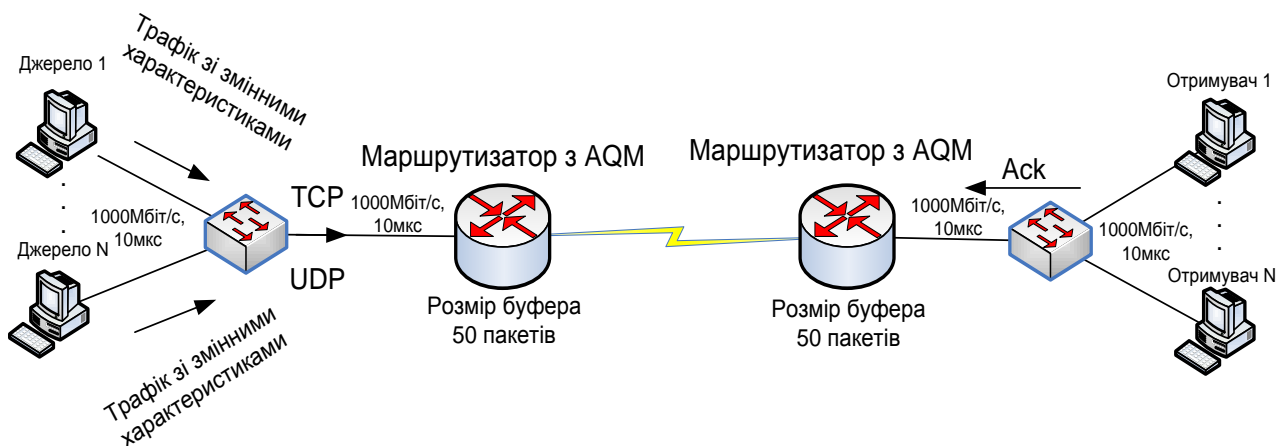


Рис. 3. Топологія досліджуваної мережі

Проведене дослідження базового методу RED у різних топологіях і в умовах різного навантаження дозволило встановити залежність показників ефективності функціонування мережі (5) та (6) від основних параметрів методу RED – знаменника граничної ймовірності відкидання  $P_d$ , вагового коефіцієнта черги  $W_q$ , мінімального  $\Theta_{\min}$  і максимального  $\Theta_{\max}$  порогу спрацьовування методу.

На підставі проведеного аналізу було виявлено недолік статичних параметрів роботи алгоритму, що вручну настроювалися, і неоптимальність їх використання в умовах мережного навантаження, що змінюється. Враховуючи це, була запропонована процедура відкидання пакетів з адаптацією знаменника граничної ймовірності відкидання пакету і вагового коефіцієнта черги, що отримала назву Ad-RED, де на кожному кроці розрахунок нових значень  $P_d$  і  $W_q$  відбувається згідно з такими законами

$$P_d(k) = \begin{cases} P_d(k-1) + \alpha, & \text{зростання черги} \\ P_d(k-1) * \beta, & \text{зменшення черги} \end{cases}, \quad (7)$$

$$W_q = K(1 - \exp(-1/C)), \quad (8)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт збільшення;  $\beta$  – коефіцієнт зменшення;  $K = 0,5...2$  – коефіцієнт адаптації;  $C$  – пропускна здатність каналу зв'язку, виражена у пакетах за секунду.

Структурна схема запропонованої процедури Ad-RED наведена на рис. 4.

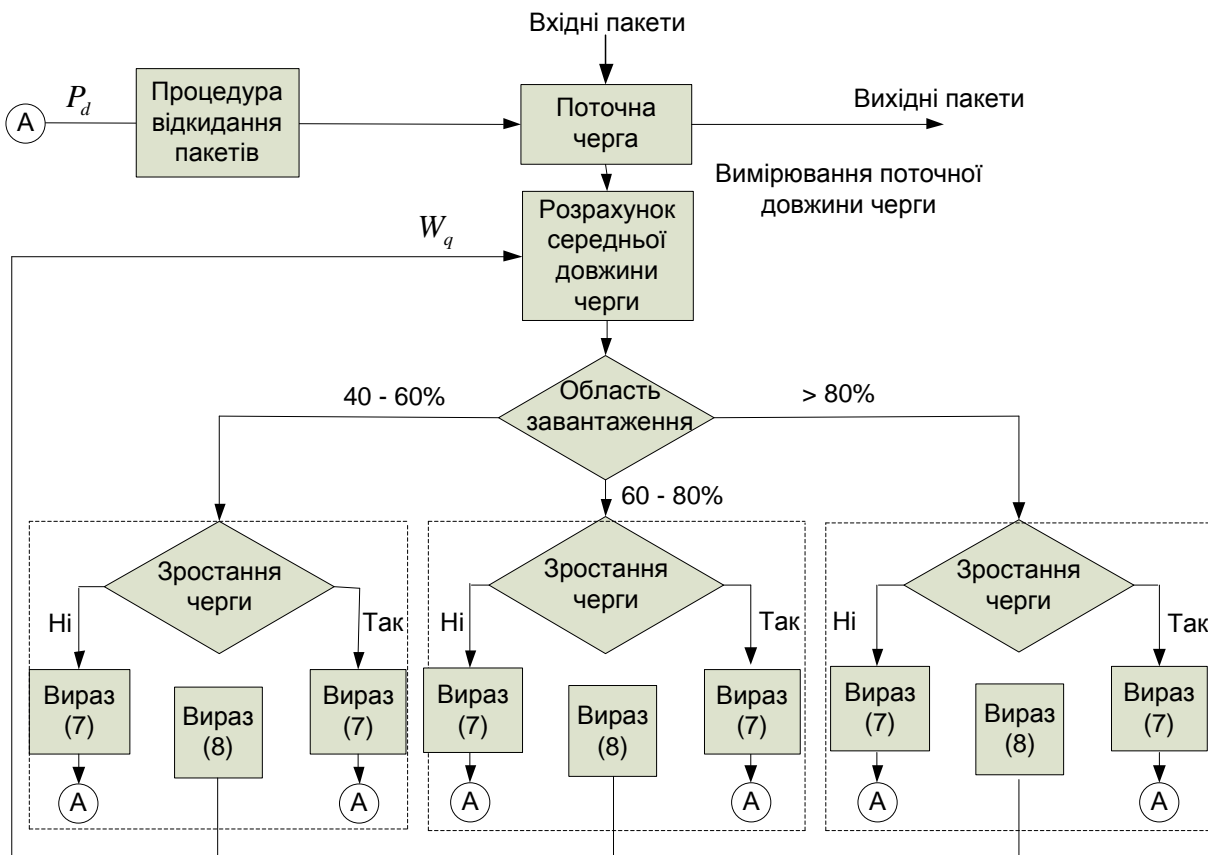


Рис. 4. Структурна схема процедури з двома адаптивними параметрами

Результати застосування процедури Ad-RED в досліджуваній мережі показали збільшення ефективності за показником (5) на 6 – 10% (до 10 Мбіт/с) і за показником (6) – на 2 – 4% порівняно з базовою процедурою відкидання пакетів RED.

У **четвертому розділі** проведено аналіз методів опису взаємодії протоколу TCP та методу активного управління чергою RED. Був зроблений висновок, що сучасні розробки в цьому напрямі рухаються у бік трактування мережних подій (надходження пакетів, їх обслуговування в черзі, зростання самої черги) як випадкового процесу. Внаслідок впливу ряду випадкових чинників на розмір черги телекомунікаційного вузла (моменти надходження пакетів, їх довжина тощо) зміну довжини черги слід трактувати як випадковий процес. У роботі формалізована процедура оцінки середньої довжини черги  $\hat{x}(k)$  з точки зору її такого трактування, яка базується на використанні дискретного фільтра Калмана-Б'юсі:

$$K(k) = V(k, k-1) H^T(k) N_v^{-1}(k), \quad (9)$$

$$\hat{x}(k) = A(k, k-1)x(k-1) + K(k)[y(k) - H(k)A(k, k-1)\hat{x}(k-1)], \quad (10)$$

$$V_x(k) = [I - K(k)H(k)]V_x(k | k-1), \quad (11)$$

$$V_x(k+1 | k) = A(k+1, k)V_x(k)A^T(k+1, k) + G(k)N_\xi(k)G^T(k), \quad (12)$$

де  $K(k)$  – коефіцієнт посилення;  $V_x(k+1 | k)$  – апіорна дисперсія;  $V_x(k)$  – апостеріорна дисперсія,  $A$  – коефіцієнт посилення під час спостереження,  $N_\xi$  – щільність потужності шуму в моделі стану;  $N_v$  – щільність потужності шуму в рівнянні спостереження;  $\hat{x}(k-1)$  – попередня оцінка;  $y(k)$  – процес що спостерігається;  $G(k)$  – коефіцієнт посилення породжуючого шуму.

Отримана процедура оцінки середньої довжини черги на основі оцінок випадкових процесів у рамках методу активного управління чергою RED отримала назву RED+KB. Для оцінки ефективності її функціонування було проведено ряд експериментальних досліджень. Отримані внаслідок експериментальних досліджень дані показали, що запропоновані зміни в процедурі оцінювання середньої довжини черги дозволяють підвищити пропускну здатність на прикладному рівні (5) порівняно з базовою процедурою оцінки середньої довжини черги методу RED не менше, ніж на 9 – 14% (до 14 Мбіт/с), і досягти значень показника (6) на рівні 98-99%, підвищивши таким чином його значення на 4 – 5 % порівняно із базовою процедурою.

Шляхом об'єднання двох запропонованих процедур – Ad-RED та RED+KB у рамках єдиного методу було отримано адаптивний метод активного

управління чергою вузла транспортної телекомунікаційної мережі на основі оцінок випадкових процесів. На додаток до викладених раніше процедур у рамках методу запропоновано перейти до виразу порогових показників  $\Theta_{\min}$  та  $\Theta_{\max}$  у процентному співвідношенні до загального обсягу черги, що дозволяє позбутись необхідності їхнього ручного статичного конфігурування. Структурна схема запропонованого методу наведена на рис. 5. Результати експериментальних досліджень вказують на підвищення пропускної здатності на прикладному рівні в умовах запропонованого адаптивного методу активного управління чергою на основі оцінок випадкових процесів не менше, ніж на 10 – 14%, та скоротити обсяг повторно переданої інформації не менше, ніж на 4% особливо в умовах нестационарного мережного трафіку.

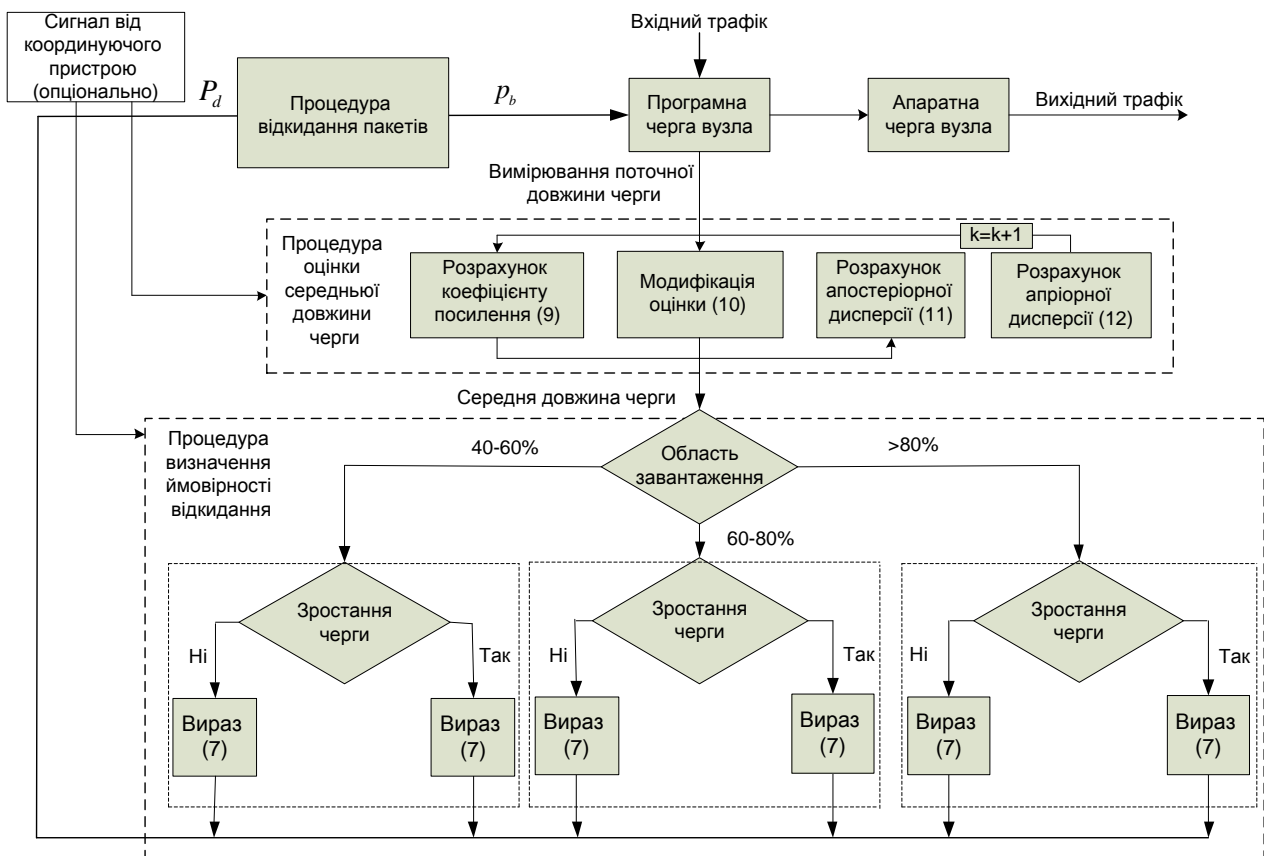


Рис. 5. Структурна схема адаптивного методу активного управління чергою на основі оцінок випадкових процесів

На підставі отриманих у ході проведеного дослідження результатів і логіки запропонованих змін в методах активного управління чергою були дані рекомендації щодо їх практичного використання. Як перехідний засіб запобігання перевантаженню в сучасній архітектурі DiffServ може бути використана запропонована процедура Ad-RED. Також показано, що перспективна архітектура

побудови телекомунікаційних мереж FSA (рекомендація ITU-T Y.1221) передбачає частковий або повний моніторинг за станом та інтенсивністю потоків у мережі на вузлі управління. В зв'язку з цим найбільш перспективною є реалізація процедури RED+KB та запропонованого методу активного управління чергою вузла транспортної телекомунікаційної мережі на основі оцінок випадкових процесів саме у рамках цієї архітектури. Це дозволить реалізувати якнайповніший контроль перевантажень у мережі на підставі інформації про потоки, що зберігається на координуючому пристрої.

## ВИСНОВКИ

Таким чином, у дисертаційній роботі було вирішено актуальну науково-прикладну задачу, пов'язану з розробкою математичної моделі TCP/IP-мережі і вдосконаленням методів активного управління чергами вузла транспортної телекомунікаційної мережі. В ході її розв'язання були зроблені такі висновки:

1. Процес побудови сучасних телекомунікаційних систем на основі концепції мереж наступного покоління NGN вивів на перше місце задачі надання послуг гарантованої якості, що пов'язано з підвищенням ролі задач управління трафіком. При цьому одне з найважливіших місць у загальній архітектурі управління трафіком займають методи активного управління чергами на вузлі транспортної телекомунікаційної мережі. Як показав проведений аналіз, серед методів активного управління чергами найбільше поширення отримав метод RED. Водночас, недоліки методу RED, серед яких, передусім, статичність його параметрів, неможливість диференціації трафіку, лінійна залежність ймовірності відкидання від середньої довжини черги тощо, стимулюють розробку нових методів активного управління.

2. З метою оцінки ефективності як існуючих, так і перспективних методів активного управління чергою необхідною є адекватна математична модель TCP/IP-мережі і мережного трафіку. При цьому одним з найбільш ефективних підходів пов'язаний із використанням результатів теорії масового обслуговування. Як показав аналіз, трафік у сучасних мережах характеризується самоподібністю. Водночас, строгий аналітичний опис властивостей самоподібних процесів пов'язаний з рядом складнощів, таких як відсутність точних виразів або складність вибору параметрів моделі. Крім того, часто реальний мережний трафік не має усіх властивостей самоподібних процесів, але, як правило, характеризується наявністю «важких хвостів» у щільності розподілу вірогідності, однією з ознак чого є СКВ  $\sigma \rightarrow \infty$ .

3. В зв'язку з цим у роботі був проведений аналіз TCP/IP-мережі як систем масового обслуговування  $M/G/1/m$  та  $MAP/G/1/m$ , у тому числі при  $\sigma \rightarrow \infty$ . Були отримані аналітичні вирази для оцінки середньої довжини черги

ТСР-сегментів, які чекають на підтвердження, ймовірність втрати і середній час затримки сегментів у системі, а також їх середньоквадратичні відхилення.

4. З метою оцінки ефективності і виявлення шляхів вдосконалення базового методу RED було проведено імітаційне моделювання, у рамках якого було досліджено впливи усіх його параметрів на ефективність функціонування мережі в умовах різних мережних характеристик і рівнях навантаження.

5. На підставі результатів експериментального дослідження базового методу RED була запропонована адаптивна процедура відкидання пакетів Ad-RED, що передбачає два адаптаційні параметри – знаменника граничної ймовірності відкидання і вагового коефіцієнта черги. Як показали результати імітаційного моделювання, процедура Ad-RED дозволяє підвищити ефективність функціонування мережі порівняно з базовою процедурою RED за швидкісним показником (корисна пропускна здатність на прикладному рівні) в середньому на 10%, а за ефективністю передачі даних – на величину до 4%.

6. У роботі запропонована нова процедура оцінювання середньої довжини черги RED+KB, де, на відміну від базового методу RED, передбачається здійснювати оцінювання середньої довжини черги із використанням фільтру Калмана-Б'юсі. Як показали результати експериментального дослідження процедури RED+KB, її застосування в мережі дозволило підвищити корисну пропускну здатність мережі на прикладному рівні на величину до 9 – 14% та ефективність передачі даних – на 4 – 5% особливо в умовах нестационарного мережного трафіку.

7. Розроблено метод адаптивного активного управління чергою вузла транспортної телекомунікаційної мережі на основі оцінок випадкових процесів, що містить процедури Ad-RED і RED+KB. Метод дозволяє підвищити пропускну здатність на прикладному рівні не менше, ніж на 10 – 14%, та скоротити обсяг повторно переданої інформації не менше, ніж на 4%, особливо в умовах нестационарного мережного трафіку.

8. Розроблено комплекс практичних рекомендацій зі застосування запропонованих процедур і методу активного управління чергами вузлів транспортної телекомунікаційної мережі.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Андрушко Д.В. Алгоритм поиска множества независимых кратчайших путей для сетей MPLS-TE/ Андрушко Д.В., Андрушко Ю.В. // Глобальні інформаційні системи. Проблеми та тенденції розвитку: 1-а Міжнарод. конф.: зб. матеріалів конференції. – Харків: ХНУРЕ, 2006. – С. 358 – 359.

2. Андрушко Ю.В. Методика проверки достоверности моделей многопутевой маршрутизации с использованием сетевого оборудования компании Cisco Systems / Андрушко Ю.В., Симоненко Д.В., Тугай А.В. // Радіоелектроні-



ка і молодь у ХХІ ст.: 11-й між народ. молодіжний форум: зб. матеріалів форуму, Ч.1. – Харків: ХНУРЕ, 2007. – С. 104.

3. Андрушко Д.В. Оптимизация перераспределения ресурсов в сетях MPLS-TE при быстрой ремаршрутизации / Андрушко Д.В., Андрушко Ю.В., Фурсова О.Б. // Радіоелектроніка і молодь у ХХІ ст.: 11-й між народ. молодіжний форум: зб. матеріалів форуму, Ч.1. – Харків: ХНУРЕ, 2007. – С. 104.

4. Андрушко Ю.В. Экспериментальное исследование сетевых параметров при различных режимах работы сети / Андрушко Ю.В. // Проблемы телекоммуникаций: науч.-техн. конф.: зб. тез. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – С. 195 – 196.

5. Андрушко Д.В. Оптимизация перераспределения ресурсов в сетях MPLS-TE при быстрой ремаршрутизации / Андрушко Д.В., Андрушко Ю.В., Фурсова О.Б. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2007. – № 1/2 (25). – С. 15 – 19.

6. Андрушко Ю.В. Экспериментальное исследование характеристик агрегированного сетевого трафика / Андрушко Ю.В. // Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития: 3-й Междунар. радиоэлектронный форум: сб. науч. трудов. Т. 2. – Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ, 2008. – С. 26 – 27.

7. Андрушко Ю.В. Експериментальне дослідження методів активного управління чергами / Андрушко Ю.В. // Радіоелектроніка і молодь у ХХІ ст.: 13-й між народ. молодіжний форум: зб. матеріалів форуму, Ч.1. – Харків: ХНУРЕ, 2009. – С. 162.

8. Андрушко Д.В. Принципы адаптации в механизмах активного управления очередями / Андрушко Д.В., Андрушко Е.В., Андрушко Ю.В. // Радиотехника: всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2009. – № 159. – С. 93 – 98.

9. Андрушко Ю.В. Анализ производительности узла сети в условиях нестационарного трафика / Андрушко Ю.В. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 3/2 (51). – С. 10 – 13.

10. Андрушко Ю.В. Метод оценки времени кругового обращения сегмента в сети при наличии зашумленных наблюдений / Андрушко Ю.В. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 4/9 (52). – С. 25 – 27.

11. Андрушко Ю.В. Процедура оценки RTT сегмента в сети на основе зашумленных наблюдений / Андрушко Ю.В. // Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития: 4-й Междунар. радиоэлектронный форум: сб. науч. трудов. Т. 2. – Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ, 2011. – С. 161 – 164.

## АНОТАЦІЯ

Андрушко Ю.В. Метод активного управління чергою вузла транспортної телекомунікаційної мережі. – Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – Телекомунікаційні системи і мережі. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2011.

Дисертація присвячена підвищенню ефективності функціонування телекомунікаційної мережі шляхом розробки математичної моделі ТСП/IP-мережі, процедур і методу активного управління чергою вузла. В роботі на підставі моделювання ТКМ як СМО  $M/G/1/m$  та  $MAR/G/1/m$  отримано оцінки середньої довжини черги ТСП-сегментів, які очікують на підтвердження, імовірність втрати і середній час затримки сегментів у системі, а також їх середньоквадратичні відхилення. В роботі запропоновано дві нові процедури: адаптивну процедуру відкидання пакетів з динамічним підстроюванням знаменника граничної імовірності відкидання та експоненціального вагового коефіцієнта черги і процедуру оцінювання середньої довжини черги вузла на основі фільтру Калмана-Б'юсі. На підставі розроблених процедур запропоновано новий адаптивний метод активного управління чергою вузла транспортної телекомунікаційної мережі. Запропоновані процедури та метод активного управління чергою дозволяють підвищити корисну пропускну здатність транспортної телекомунікаційної мережі на прикладному рівні на величину до 9 – 14% та ефективність передачі даних – на 4 – 5%.

**Ключові слова:** телекомунікаційна мережа, методи управління і запобігання перевантаженням, методи активного управління чергою.

## АННОТАЦІЯ

Андрушко Ю.В. Метод активного управління очередью узла транспортной телекоммуникационной сети. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.02 – Телекоммуникационные системы и сети. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2011.

Диссертация посвящена повышению эффективности функционирования телекоммуникационной сети путем разработки математической модели ТСП/IP-сети, процедур и метода активного управления очередью на ее узлах.

В работе показано, что современные телекоммуникационные системы строятся на базе концепции сетей следующего поколения NGN (Next Generation Network), где в качестве основного предполагается использование стека протоколов ТСП/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol). Для обеспечения гарантий предоставления требуемых показателей качества обслуживания (Quality of Service, QoS) в рамках сетей следующего поколения наиболее популярной является архитектура DiffServ, предполагающая использование алгоритмов активного управления очередью на узлах сети с целью предотвращения перегрузок. Как показал проведенный анализ, среди методов активного управления очередями наибольшее распространение получил метод RED. Показано,

что в основе существующих методов активного управления очередью на узлах лежат математические модели, не отвечающие в полной мере сетевым реалиям, и эвристические процедуры, требующие административного вмешательства для корректной работы сети. В связи с этим сформулированы требования к перспективным методам активного управления очередью, среди которых учет динамики информационного обмена, учет нестационарного характера сетевого трафика, повышение адекватности и качества получаемых оценок уровня загрузки сети.

С целью оценки эффективности как существующих, так и перспективных методов активного управления очередью востребованной является адекватная математическая модель ТСП/IP-сети и сетевого трафика. При этом одним из наиболее эффективных подходов является использование результатов теории массового обслуживания. Как показал анализ, трафик в современных сетях характеризуется самоподобием. В то же время, строгое аналитическое описание свойств самоподобных процессов связано рядом сложностей, таких как отсутствие точных выражений или сложность выбора параметров модели. Кроме того, зачастую реальный сетевой трафик не обладает всеми свойствами самоподобных процессов, но, как правило, характеризуется наличием «тяжелых хвостов» в плотностях распределения вероятностей, одним из признаков чего является СКО  $\sigma \rightarrow \infty$ . В этой связи в работе был проведен анализ ТСП/IP-сети как систем массового обслуживания  $M/\Gamma/1/m$  и  $MAR/\Gamma/1/m$ , в том числе при  $\sigma \rightarrow \infty$ . Были получены аналитические выражения для оценки средней длины очереди ТСП-сегментов, которые ожидают подтверждения, вероятность потери и среднее время задержки сегментов в системе, а также их среднеквадратические отклонения.

С целью оценки эффективности и выявления путей совершенствования базового метода RED было проведено имитационное моделирование, в рамках которого было исследовано влияния всех его параметров на эффективность функционирования сети в условиях различных сетевых характеристик и уровней нагрузки.

На основании результатов экспериментального исследования базового метода RED была предложена адаптивная процедура отбрасывания пакетов Ad-RED, предполагающая два адапционных параметра – знаменателя граничной вероятности отбрасывания и экспоненциального весового коэффициента очереди. Как показали результаты имитационного моделирования, процедура Ad-RED позволяет повысить эффективность функционирования сети по сравнению с базовой процедурой RED по скоростному показателю (полезная пропускная способность на прикладном уровне) в среднем на 10%, а по эффективности передачи данных – на величину до 4%.

В работе предложена новая процедура оценивания средней длины очереди RED+KB, где, в отличие от базового метода RED, предполагается осуществлять оценивание средней длины очереди на основании фильтра Калмана-Бьюси. Как показали результаты экспериментального исследования процедуры RED+KB, ее применение в сети позволило повысить полезную пропускную способность сети на прикладном уровне на величину до 9 – 14% и эффективно-

сти передачи данных – на 4 – 5%, особенно в условиях нестационарного сетевого трафика.

Разработан метод адаптивного активного управления очередью узла транспортной телекоммуникационной сети на основе оценок случайных процессов, включающий в себя процедуры Ad-RED и RED+KB. Метод позволяет повысить пропускную способность на прикладном уровне не менее, чем на 10 – 14% и сократить объем передаваемой повторяющейся информации не менее чем на 4%, особенно в условиях нестационарного сетевого трафика.

Разработан комплекс практических рекомендаций по применению предлагаемых процедур и метода активного управления очередями в современных и перспективных телекоммуникационных сетях.

**Ключевые слова:** телекоммуникационная сеть, методы управления и предотвращения перегрузок, методы активного управления очередью.

## ABSTRACT

Andrushko I.V. Method of transport telecommunication network active queue management. – Manuscript.

Dissertation on the competition for candidate's degree of technical science in a specialty 05.12.02 – Telecommunication systems and networks. – Kharkiv national university of radio electronics, Kharkiv, 2011.

Dissertation is devoted to the efficiency increase of telecommunication network (TCN) node functioning by development of TCP/IP-network mathematical model, procedures and method of active queue management. On the basis of TCN representation as queuing systems  $M/\Gamma/1/m$  and  $M\Lambda P/\Gamma/1/m$ , the estimations of unacknowledged TCP-segments mean queue length, loss probability and mean delay of segments in the system were obtained, as well as their standard deviations. Two new procedures offered: adaptive procedure of packet drop with the dynamic tuning of maximum drop probability denominator and exponential queue weight coefficient and procedure of mean queue estimation on the basis of Kalman filter. On the basis of the developed procedures the new transport TCN node's adaptive active queue management method has been offered. The offered procedures and active queue management method allow to increase the goodput of a transport TCN on application layer by 9 – 14% and efficiency of data transmission by 4 – 5%.

**Keywords:** telecommunication network, methods of congestion management and avoidance, methods of active queue management.

Підп. до друку 09.04.12. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub> Спосіб друку – ризографія  
Умов. друк. арк. 1 Тираж 100 прим. Ціна договірна.

---

ХНУРЕ, 61166, Харків, просп. Леніна, 14

---

Віддруковано в навчально-науковому  
видавничо-поліграфічному центрі ХНУРЕ.  
Харків, просп. Леніна, 14