

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

МОХАММАД АМІН САЛЕХ



УДК 004.728.5.057.4

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ УПРАВЛІННЯ ПЕРЕДАЧЕЮ ДАНИХ У  
БЕЗПРОВІДНИХ МЕРЕЖАХ

05.13.05 – Комп'ютерні системи та компоненти

АВТОРЕФЕРАТ  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2012

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

**Науковий керівник:** кандидат технічних наук, доцент  
Завизіступ Юрій Юрійович, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри електронних обчислювальних машин.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
Борисенко Олексій Андрійович, Сумський державний університет, завідувач кафедри електроніки і комп'ютерної техніки;

доктор технічних наук, професор  
Хажмурадов Манап Ахмадович, Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут», начальник відділу математичного моделювання та дослідження ядерно-фізичних процесів і систем.

Захист відбудеться "13" червня 2012 року о 16<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.01 у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166 Харків, просп. Леніна, 14.

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

Автореферат розісланий "12" травня 2012 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Литвинова Є.І.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Дисертаційна робота присвячена розробці методів управління передачею даних у безпроводних мережах, у тому числі з використанням сучасного транспортного протоколу TCP (Transmission Control Protocol – протокол управління передачею даних) та його перспективних модифікацій. В Україні такі мережі використовуються науковими центрами, освітніми закладами, різноманітними підприємствами, приватними користувачами, у космічній та військовій галузях. Незважаючи на те, що сьогодні продовжується досить стрімкий розвиток комунікаційних безпроводних мереж передачі даних, їх можливостей часто замало для передачі необхідної кількості трафіка у визначений термін часу.

Безпроводні мережі характеризуються відносно невисокою пропускнуою здатністю, великою кількістю помилок і підвищеними затримками при передачі даних, а також рядом інших чинників, що призводять до зниження їх пропускнуої здатності в порівнянні з сучасними провідними мережами. Досить часто безпроводні мережі об'єднуються з провідними, що призводить до появи додаткових проблем при їх спільній роботі. Пропускна здатність безпроводних мереж, у середньому, в декілька разів нижче пропускнуої здатності традиційних провідних мереж; при цьому на процес передачі даних у безпроводних мережах істотний вплив має підвищений рівень каналних помилок, що спричиняються як переміщеннями вузла, так і фізичним станом середовища передачі.

До сьогодні ще недостатньо досліджені властивості параметрів процесу передачі даних сучасними транспортними протоколами, які б враховували вплив різноманітних факторів і типів трафіка, що потрібно для забезпечення гарантованої пропорційності розподілу доступних ресурсів мереж, у тому числі безпроводних, та необхідної якості обслуговування користувачів.

Таким чином, зменшення часу передачі даних з урахуванням характеристик типів трафіка та особливостей безпроводних мереж, поряд із впливом зовнішніх факторів та гетерогенністю структури мережі є актуальним науковим завданням. Задачі, які виникають під час вирішення таких питань, і обумовили напрямок досліджень, які були проведені у цій роботі.

Проблемами розробки методів управління передачею даних у безпроводних мережах успішно займаються вчені: Л. Петерсон, С. Флойд, К. Фол, М. Олмен, В. Джейкобсон, Р. Стивенс, Л. Бракмо, М. Подольський, В. Паксон, К. Рамкришна, С. Лоу.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Розробка основних положень дисертаційної роботи здійснювалась в рамках розділу держбюджетної теми Д/Б № 245-3 «Еволюційні гібридні методи і моделі інтелектуальної обробки інформації зі змінною структурою за умов невизначеності» (тема Д/Б № 245 «Еволюційні гібридні системи обчислювального інтелекту зі змінною структурою для інтелектуального аналізу даних»), що виконувалася у ХНУРЕ, в якій автор брав безпосередню участь як виконавець.

**Мета дослідження** – розробка методів та засобів управління передачею даних у безпроводних мережах на основі більш раціонального перерозподілу

смуги пропускання безпроводного каналу для збільшення пропускної здатності безпроводної мережі, а також зменшення часу передачі даних, завантаження буферної пам'яті маршрутизатора та кількості втрачених пакетів.

Для досягнення поставленої мети запропоновано розв'язати такі основні задачі:

1. Провести аналіз стану проблем управління передачею даних у безпроводних мережах, які впливають на час передачі даних та пропускну здатність.

2. Розробити метод зменшення часу передачі даних у безпроводній мережі, який дозволить враховувати інтервали надмірного завантаження процесорів маршрутизаторів з метою збільшення інтенсивності обслуговування трафіка мережею.

3. Розвинути метод зменшення завантаження буферної пам'яті маршрутизатора за рахунок динамічного управління інформаційними потоками на його вході.

4. Розробити метод перерозподілу пропускної здатності у безпроводній мережі, який дозволяє зменшити час передачі даних.

5. Удосконалити метод параметричного управління передачею даних на основі протоколу TCP Freeze для збільшення його пропускної здатності та пропорційності розподілу доступних ресурсів у безпроводній мережі.

6. Розробити програмні засоби, що реалізують розроблені методи управління передачею даних.

*Об'єкт дослідження* – процес передачі даних у безпроводній мережі передачі даних.

*Предмет дослідження* – методи та засоби управління передачею даних у безпроводній мережі.

Методи дослідження: теорія масового обслуговування та теорія інформації – на етапі дослідження характеристик процесу передачі даних та існуючих методів управління передачею даних у безпроводних мережах; теорія масового обслуговування, теорія інформації – для розробки моделі процесу передачі даних у безпроводній мережі та моделі трафіка, а також для розробки методів, що дозволяють зменшити час передачі даних та збільшити пропускну здатність безпроводної мережі; теорія графів – для розробки математичної моделі маршрутизатора; теорія ймовірності та математичної статистики – для перевірки адекватності отриманих результатів.

#### **Наукова новизна отриманих результатів:**

1. Вперше запропоновано метод зменшення часу передачі даних у безпроводній мережі, який враховує максимальну пропускну здатність процесорів маршрутизатора та частоту розповсюдження службової інформації, що дозволяє підвищити інтенсивність обслуговування трафіка мережею.

2. Вперше запропоновано метод перерозподілу пропускної здатності у безпроводній мережі, який передбачає використання результатів прогнозування поведінки фрактального трафіка у мережі, що дозволяє зменшити час передачі даних у безпроводній мережі.

3. Набув подальшого розвитку метод зменшення завантаження буферної пам'яті маршрутизатора шляхом врахування наявності та довжини періодів неповного завантаження процесорів маршрутизатора при динамічному управлінні інформаційними потоками, що дозволяє прискорити процес передачі даних у безпроводній мережі.

4. Набув подальшого розвитку метод параметричного управління передачею даних, що використовується у протоколі TCP Freeze, шляхом змінювання параметрів управління процесом передачі даних у залежності від поточного часу передачі пакета даних на встановленому маршруті, що дозволяє досягти збільшення пропускної здатності у безпроводній мережі.

#### **Практичне значення отриманих результатів:**

1. Розроблені в дисертаційній роботі методи доведені до рівня алгоритмів і програмних засобів управління процесом запобігання перевантажень під час передачі даних у реальному часі. Це дозволило підвищити ефективність управління процесом передачі даних у безпроводних мережах передачі даних.

2. Розроблено та досліджено моделі транспортних протоколів передачі даних, методи управління процесом передачі даних були використані у ТОВ «Софтсервіс» під час розробки нових алгоритмів і програмного забезпечення для підвищення ефективності функціонування існуючих безпроводних мереж (акт впровадження від 30.12.2011 р.).

3. Теоретичні результати дисертації використано у навчальному процесі на кафедрі ЕОМ Харківського національного університету радіоелектроніки під час підготовки курсів «Корпоративні комп'ютерні мережі», «Комп'ютерні системи та мережі» та «Комп'ютерні мережі», а також у курсовому та дипломному проектуванні (акт впровадження від 27.12.2011 р.).

**Особистий внесок здобувача.** У роботах, написаних у співавторстві, здобувачу належать: [2 – 6] – аналіз сучасного стану та перспектив розвитку методів і засобів управління передачею даних у безпроводних мережах; [7] – метод зменшення часу передачі даних у безпроводній мережі, який характеризується врахуванням інтервалів надмірного завантаження процесорів маршрутизаторів; [8] – метод перерозподілу пропускної здатності у безпроводній мережі, який враховує фрактальність трафіка та має можливість прогнозування його майбутньої поведінки; [9] – метод параметричного управління передачею даних на основі протоколу TCP Freeze.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на 1-й, 2-й Міжнародних науково-технічних конференціях «Інформаційні технології в навігації і управлінні: стан та перспективи розвитку» (ДП «ЦНДІ НІУ», м. Київ, 5–6 липня 2010 р., 7–8 липня 2011 р.), 1-й, 2-й Міжнародних науково-технічних конференціях «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління» (ХНУРЕ, м. Харків, 13–14 грудня 2010 р., 15–16 грудня 2011 р.), Всеукраїнській науково-технічній конференції «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2011» (НАУ «ХАІ», м. Харків, 22–26 листопада 2011 р.). Модулі, у яких втілено розроблені в дисертаційній роботі моделі та методи, були представлені на виставках різного рівня та впроваджено у виробництво.

**Публікації.** За тематикою роботи опубліковано 14 друкованих праць, у тому числі 9 статей у наукових фахових виданнях України та 5 тез доповідей на конференціях і форумах міжнародного рівня.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертаційна робота містить 146 сторінок основного тексту, 60 рисунків. Її структура складається із вступу, 5 розділів, 26 підрозділів, висновків, списку використаних джерел із 126 найменувань (на 14 с.), 9 додатків (на 53 с.).

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі проведено аналіз основних сучасних наукових досягнень та розглянуто загальний стан галузі розвитку безпроводних мереж і засобів передачі даних. Відокремлено основні властивості та характеристики безпроводних мереж передачі даних (БМПД). Проведено аналіз факторів, що впливають на пропускну здатність БМПД, та їх зіставлення відповідно до ієрархії стеку протоколів TCP/IP. У результаті аналізу виявлено ряд причин, що призводять до виникнення перевантажень та втрат пакетів у БМПД. Проаналізовано процес перерозподілу завантаження базової станції у БМПД. Детально розглянуто особливості процесу хендOVERу у БМПД, виділено його основні типи та їх розподіл за відповідними рівнями стека протоколів. Крім того, проаналізовано процес виникнення перевантажень у БМПД та проведено кількісну оцінку його параметрів. У контексті проведеної оцінки розглянуто основні сучасні протоколи маршрутизації, що використовуються у БМПД. Сформульовано вимоги щодо критеріїв процесу управління передачею даних у БМПД та розглянуто існуючі типи методів управління передачею даних. Визначено, що методи управління передачею даних, які використовуються в сучасних протоколах БМПД, мають особливості, які призводять до розвитку фрактального характеру трафіка. Обґрунтовано необхідність подальшого розвитку методів і засобів передачі даних для урахування характеру трафіка та зменшення часу передачі даних. Сформульовано та обґрунтовано мету та задачі наукових досліджень.

У другому розділі запропоновано метод зменшення часу передачі даних у БМПД за рахунок використання інтервалів неповного завантаження процесорів маршрутизаторів, а також розвинуто метод зменшення завантаження буферної пам'яті маршрутизатора. Для цього визначено основні шляхи зменшення часу передачі даних.

Як показник ефективності задачі зменшення часу передачі даних у безпроводній мережі обрано таку цільову функцію:

$$F = \max_{(u)} (t_{\text{нф}}(u)), \quad (1)$$

де  $u$  – обраний метод управління у БМПД;  $t_{\text{нф}}(u)$  – сумарна тривалість часу передачі даних у БМПД (без врахування часу на передачу службової інформації) при використанні метода управління  $u$ .

З метою проведення аналізу процесу виникнення перевантажень мережних маршрутизаторів, які суттєво збільшують час передачі даних, визначено залежність зміни часу передачі даних у БМПД від середньої затримки пакета

тримки пакета даних  $i$ -ї категорії пріоритетності у вхідній черзі  
ра визначається як

$$t_{\text{оо}_g}^i = \frac{l_{\text{оо}_g}^i}{\Pi_{M_g} \cdot K_{M_g}^i} \cdot K_{\text{сб}_g},$$

овжина вхідної черги пакетів даних  $i$ -ї категорії пріоритетності до  
г-го маршрутизатора;  $K_{M_g}^i$  – коефіцієнт розподілу швидкодії  
-го маршрутизатора між пакетами даних  $i$ -ї категорії пріоритетності;  
швидкодія процесора г-го маршрутизатора;  $K_{\text{сб}_g}$  – коефіцієнт стану  
пам'яті г-го маршрутизатора, який дорівнює 1, якщо виконана умова  
 $\sum_{i=1}^n l_{\text{оо}_g}^i$ , та нескінченності в іншому випадку;  $l_p = l_p(l_{\text{сообщ}}, l_{\text{кадр}})$  –  
пакета даних, що передається за маршрутом, який залежить від  
повідомлення, максимальної і мінімальної довжини кадру,  
визначеної в даній БМПД;  $V_{\text{б}_g}$  – об'єм буферної пам'яті г-го  
затора.

повідно до особливостей функціонування маршрутизатора розраховано  
атримку пакета даних у БМПД, як:

$$= \frac{1}{\lambda_u} \cdot \sum_{j=1}^{h_r} \sum_{a=1}^{h_m} \sum_{i=1}^n \left( \lambda_{m_a}^i \cdot \left( h_{w_a}^j \cdot \left( k_z \cdot \frac{l_p(l_{\text{сообщ}}, l_{\text{кадр}})}{\Pi_z} + \frac{l_{\text{оп}}}{\Pi_z} \cdot l_p(l_{\text{сообщ}}, l_{\text{кадр}}) \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + \sum_{g=1}^{M_{m_a}^j} \frac{1}{K_{M_g}^i \cdot \Pi_{M_g}} \cdot \left( l_{\text{оо}_g}^i \cdot K_{\text{сб}_g} + l_p(l_{\text{сообщ}}, l_{\text{кадр}}) \right) \right) \right),$$

умарна інтенсивність потоків даних у БМПД;  $h_r$  – кількість інформаційних  
між маршрутизаторами у БМПД;  $h_m$  – кількість маршрутів для передачі  $j$ -го  
в розподілі  $\gamma$ ;  $\lambda_{m_a}^i$  – інтенсивність  $j$ -го потоку  $i$ -ї категорії пріоритетності за

утом  $m_a^j$ ;  $h_{w_a}^j$  – довжина маршруту  $m_a^j$ , обумовлена кількістю каналів  
передачі даних, що входять до маршруту;  $M_{m_a}^j$  – кількість маршрутизаторів, через  
які проходить  $m_a^j$  маршрут;  $k_z$  – середній коефіцієнт завантаження каналів передачі  
даних;  $l_{\text{оп}}$  – середня довжина черги до каналу передачі даних;  $\Pi_z$  – середня  
пропускна здатність каналу передачі даних з урахуванням його завантаження.

З урахуванням принципу функціонування методу маршрутизації,  
реалізованого у протоколі EIGRP, час передачі даних за умови використання в  
маршрутизаторах БМПД цього методу, дорівнюватиме

$$t_{\text{нф EIGRP}} = \frac{l_p(l_{\text{сообщ}}, l_{\text{кадр}})}{K_{\text{PM}} \cdot \frac{1}{\lambda_u} \cdot \sum_{j=1}^{h_r} \sum_{f=1}^{h_m} \sum_{i=1}^n \lambda_{m_a}^i \cdot \sum_{g=1}^{M_g} \frac{1}{K_{M_g}^i \cdot \Pi_{M_g}} \cdot (l_{\text{оц}_g} \cdot K_{\text{оц}_g} + l_p(l_{\text{сообщ}}, l_{\text{кадр}}))} \times$$

$$\times \left( \sum_{j=1}^{h_r} \sum_{f=1}^{h_m} \sum_{i=1}^n \lambda_{m_a}^i + \frac{l_{\text{HELLO}}(l_{\text{сообщ}}, l_{\text{кадр}})}{T_{\text{HELLO}}} + \frac{l_{\text{ос}}(l_{\text{сообщ}}, l_{\text{кадр}})}{T_{\text{ос}}} + P_{\text{отк}_{\text{эс}}} \cdot l_{\text{со}}(l_{\text{сообщ}}, l_{\text{кадр}}) \right),$$

де  $l_{\text{HELLO}}(l_{\text{сообщ}}, l_{\text{кадр}})$  – довжина пакета HELLO протоколу EIGRP;  $l_{\text{ос}}(l_{\text{сообщ}}, l_{\text{кадр}})$  – довжина пакета оновлюючого повідомлення протоколу EIGRP;  $l_{\text{со}}(l_{\text{сообщ}}, l_{\text{кадр}})$  – довжина пакета повідомлення про відмову елементів БМПД протоколу EIGRP.

Проаналізувавши отримані вирази, можна відзначити, що виникненню перевантажень маршрутизаторів з наступною втратою частини пакетів даних передують переповнення буфера і різке збільшення затримок пакетів; заповнення буфера, насамперед, залежить від інтенсивності службових потоків, пропускної здатності процесора маршрутизатора і коефіцієнта розподілу пропускної здатності процесора маршрутизатора між пакетами даних різних категорій пріоритетності. Тому було також розроблено математичну модель багатопроцесорного маршрутизатора на основі використання основних моделей теорії масового обслуговування та отримано аналітичні вирази для опису основних характеристик маршрутизатора.

Так, ймовірність відмови маршрутизатора визначена як

$$P_{\text{отк}} = \alpha_q^{n+m} / (n!n^m) / \left( \sum_{k=0}^n \frac{\alpha_q^k}{k!} + \frac{\alpha_q^n}{n!} \cdot \frac{\alpha_q/n - (\alpha_q/n)^{n+1}}{1 - \alpha_q/n} \right), \quad (2)$$

де  $\alpha_q = \lambda_q / \mu$ ;  $\mu$  – час обслуговування пакетів, розподілений за показниковим законом з параметром;  $\lambda_q$  – інтегральний потік пакетів даних, що поступають на вхід маршрутизатора з нормально розподіленою інтенсивністю  $q = 1, n + m$ ,  $n$  – кількість процесорів маршрутизатора;  $m$  – об'єм буфера маршрутизатора.

Об'єм інформації, який завантажується в буфер на інтервалі максимального завантаження маршрутизатора, дорівнює

$$V_{\text{изб}}^{\text{сум}} = \sum_{i=1}^I V_{\text{изб}}^{(i)} = \sum_{i=1}^I \int_{t_i}^{t_i'} (f(t) - D_{\text{пор}}) dt = \sum_{i=1}^I (f(t_i^{(\text{cp})}) - D_{\text{пор}}) (t_i' - t_i),$$

де  $V_{\text{изб}}^{(i)}$  – об'єм надлишкової інформації від користувача на  $i$ -му інтервалі  $(t_i, t_i')$ ;  $D_{\text{пор}}$  – абсолютна (порогова) пропускна здатність процесорів маршрутизатора;  $t_i^{(\text{cp})} \in (t_i, t_i')$  – точка  $i$ -го інтервалу, що дозволяє перейти від інтегрального запису до адитивного (внаслідок безперервності  $f(t)$ , така точка знаходиться за теоремою Лагранжа).

Для зменшення завантаження буферної пам'яті маршрутизатора враховувались наявність та довжина періодів неповного завантаження процесорів маршрутизатора при динамічному управлінні інформаційними потоками. Це дозволило реалізувати механізм розвантаження службової мережної інформації з буферної пам'яті маршрутизатора в інтервали часу, наступні за інтервалами максимального завантаження, коли частково вивільнюються ресурси маршрутизатора в результаті зменшення інтенсивності вхідного трафіка. В результаті мінімально необхідний об'єм буферної пам'яті маршрутизатора було зменшено до величини

$$V_{\text{реб.буф.}}^{(0,T)} = \sum_{i=0}^I \delta \left( \left( f(t_i^{(cp)}) - D_{\text{пор}} \right) (t'_i - t_i) - \left( D_{\text{пор}} - f(t_i^{(cp)*}) \right) (t_{i+1} - t'_i) \right), \quad (3)$$

де  $\delta(\bullet)$  – допоміжна функція виявлення періодів неповного завантаження, а значення  $t_i^{(cp)*}$  розраховується за теоремою Лагранжа для знайдених інтервалів. Удосконалений метод дозволяє прискорити процес передачі даних у безпроводній мережі і використовується як складова частина запропонованого методу зменшення часу передачі даних.

Проведені дослідження виявили, що найбільш раціонально регулювати потік службової інформації, який генерує сам маршрутизатор, шляхом розробки методу на базі методу маршрутизації, що реалізований в протоколі EIGRP. Суть відмінності методу, що розробляється, від методу, реалізованого в протоколі EIGRP, зводиться до регулювання частоти посилок пакетів повідомлення HELLO, оновлюючих повідомлень про стан каналів зв'язку на основі накопичуваних статистичних даних про виникнення відмов елементів БМПД.

Таким чином, опис суті запропонованого методу зменшення часу передачі даних у БМПД за рахунок раціональної маршрутизації службової інформації зведений до наступного. Кожен маршрутизатор БМПД створює статистичну таблицю даних, в яку заносяться моменти виникнення відмов протягом доби. На підставі накопичених статистичних даних про виникнення відмов, обчислюється середній інтервал часу між виникненням відмов

$$t_{\text{отк ср}} = \sum_{i=1}^{k_{\text{пр}}} (t_{\text{отк}_{i-1}} - t_{\text{отк}_i}) / k_{\text{пр}}, \quad (4)$$

де  $k_{\text{пр}}$  – кількість відмов, що відбулися на даний момент часу,  $k_{\text{пр}} \in (1; n_{\text{отк}})$ .

Для розрахунку раціонального інтервалу розповсюдження повідомлень HELLO визначено кількість інтервалів пасивного стану маршрутизатора, тобто інтервали, коли маршрутизатор не може визначити працездатність суміжних (не поширює повідомлення HELLO), на інтервалі  $(t_{\text{отк}_{i-1}}; t_{\text{отк}_i})$  як

$$k_{\text{инт.пас}} = (t_{\text{отк}_i} - t_{\text{отк}_{i-1}}) \cdot v_{\text{HELLO}},$$

де  $v_{\text{HELLO}}$  – частота розповсюдження повідомлення HELLO.

Розраховано значення середньої частоти виникнення відмови на інтервалі знаходження маршрутизатора в пасивному стані, всередині інтервалу  $(t_{\text{отк}_{i-1}}; t_{\text{отк}_i})$  як

$$t_{\text{нф EIGRP}} = \frac{l_p(l_{\text{сообщ}} \cdot l_{\text{кадр}})}{K_{\text{PM}} \cdot \frac{1}{\lambda_u} \cdot \sum_{j=1}^{h_r} \sum_{f=1}^{h_m} \sum_{i=1}^n \left( \lambda_{m_a}^i \cdot \sum_{g=1}^{M_g} \frac{1}{K_{M_g}^i \cdot \Pi_{M_g}} (l_{oc_g} \cdot K_{oc_g} + l_p(l_{\text{сообщ}} \cdot l_{\text{кадр}})) \right)} \times$$

$$\times \left( \sum_{j=1}^{h_r} \sum_{f=1}^{h_m} \sum_{i=1}^n \lambda_{m_a}^i + \frac{l_{\text{HELLO}}(l_{\text{сообщ}} \cdot l_{\text{кадр}})}{T_{\text{HELLO}}} + \frac{l_{oc}(l_{\text{сообщ}} \cdot l_{\text{кадр}})}{T_{oc}} + P_{\text{отк_эс}} \cdot l_{co}(l_{\text{сообщ}} \cdot l_{\text{кадр}}) \right),$$

де  $l_{\text{HELLO}}(l_{\text{сообщ}}, l_{\text{кадр}})$  – довжина пакета HELLO протоколу EIGRP;  
 $l_{oc}(l_{\text{сообщ}}, l_{\text{кадр}})$  – довжина пакета оновлюючого повідомлення протоколу EIGRP;  
 $l_{co}(l_{\text{сообщ}}, l_{\text{кадр}})$  – довжина пакета повідомлення про відмову елементів БМПД протоколу EIGRP.

Проаналізувавши отримані вирази, можна відзначити, що виникненню перевантажень маршрутизаторів з наступною втратою частини пакетів даних передусє переповнення буфера і різке збільшення затримок пакетів; заповнення буфера, насамперед, залежить від інтенсивності службових потоків, пропускної здатності процесора маршрутизатора і коефіцієнта розподілу пропускної здатності процесора маршрутизатора між пакетами даних різних категорій пріоритетності. Тому було також розроблено математичну модель багатопроцесорного маршрутизатора на основі використання основних моделей теорії масового обслуговування та отримано аналітичні вирази для опису основних характеристик маршрутизатора.

Так, ймовірність відмови маршрутизатора визначена як

$$P_{\text{отк}} = \alpha_q^{n+m} / (n! n^m) / \left( \sum_{k=0}^n \frac{\alpha_q^k}{k!} + \frac{\alpha_q^n}{n!} \cdot \frac{\alpha_q / n - (\alpha_q / n)^{m+1}}{1 - \alpha_q / n} \right), \quad (2)$$

де  $\alpha_q = \lambda_q / \mu$ ;  $\mu$  – час обслуговування пакетів, розподілений за показниковим законом з параметром;  $\lambda_q$  – інтегральний потік пакетів даних, що поступають на вхід маршрутизатора з нормально розподіленою інтенсивністю  $q = 1, n + m$ ,  $n$  – кількість процесорів маршрутизатора;  $m$  – об'єм буфера маршрутизатора.

Об'єм інформації, який завантажується в буфер на інтервалі максимального завантаження маршрутизатора, дорівнює

$$V_{\text{изб}}^{\text{сум}} = \sum_{i=1}^I V_{\text{изб}}^{(i)} = \sum_{i=1}^I \int_{t_i}^{t_i'} (f(t) - D_{\text{пор}}) dt = \sum_{i=1}^I (f(t_i^{(\text{cp})}) - D_{\text{пор}}) (t_i' - t_i),$$

де  $V_{\text{изб}}^{(i)}$  – об'єм надлишкової інформації від користувача на  $i$ -му інтервалі  $(t_i, t_i')$ ;  
 $D_{\text{пор}}$  – абсолютна (порогова) пропускна здатність процесорів маршрутизатора;  
 $t_i^{(\text{cp})} \in (t_i, t_i')$  – точка  $i$ -го інтервалу, що дозволяє перейти від інтегрального запису до адитивного (внаслідок безперервності  $f(t)$ , така точка знаходиться за теоремою Лагранжа).

Для зменшення завантаження буферної пам'яті маршрутизатора враховувались наявність та довжина періодів неповного завантаження процесорів маршрутизатора при динамічному управлінні інформаційними потоками. Це дозволило реалізувати механізм розвантаження службової мережної інформації з буферної пам'яті маршрутизатора в інтервали часу, наступні за інтервалами максимального завантаження, коли частково вивільнюються ресурси маршрутизатора в результаті зменшення інтенсивності вхідного трафіка. В результаті мінімально необхідний об'єм буферної пам'яті маршрутизатора було зменшено до величини

$$V_{\text{реб.буф.}}^{(0,T)} = \sum_{i=0}^I \delta \left( \left( f(t_i^{(cp)}) - D_{\text{пор}} \right) (t'_i - t_i) - (D_{\text{пор}} - f(t_i^{(cp)*})) (t_{i+1} - t'_i) \right), \quad (3)$$

де  $\delta(\bullet)$  – допоміжна функція виявлення періодів неповного завантаження, а значення  $t_i^{(cp)*}$  розраховується за теоремою Лагранжа для знайдених інтервалів. Удосконалений метод дозволяє прискорити процес передачі даних у безпроводній мережі і використовується як складова частина запропонованого методу зменшення часу передачі даних.

Проведені дослідження виявили, що найбільш раціонально регулювати потік службової інформації, який генерує сам маршрутизатор, шляхом розробки методу на базі методу маршрутизації, що реалізований в протоколі EIGRP. Суть відмінності методу, що розробляється, від методу, реалізованого в протоколі EIGRP, зводиться до регулювання частоти посилок пакетів повідомлення HELLO, оновлюючих повідомлень про стан каналів зв'язку на основі накопичуваних статистичних даних про виникнення відмов елементів БМПД.

Таким чином, опис суті запропонованого методу зменшення часу передачі даних у БМПД за рахунок раціональної маршрутизації службової інформації зведений до наступного. Кожен маршрутизатор БМПД створює статистичну таблицю даних, в яку заносяться моменти виникнення відмов протягом доби. На підставі накопичених статистичних даних про виникнення відмов, обчислюється середній інтервал часу між виникненням відмов

$$t_{\text{отк ср}} = \sum_{i=1}^{k_{\text{пр}}} (t_{\text{отк}_{i-1}} - t_{\text{отк}_i}) / k_{\text{пр}}, \quad (4)$$

де  $k_{\text{пр}}$  – кількість відмов, що відбулися на даний момент часу,  $k_{\text{пр}} \in (1; n_{\text{отк}})$ .

Для розрахунку раціонального інтервалу розповсюдження повідомлень HELLO визначено кількість інтервалів пасивного стану маршрутизатора, тобто інтервали, коли маршрутизатор не може визначити працездатність суміжних (не поширює повідомлення HELLO), на інтервалі  $(t_{\text{отк}_{i-1}}; t_{\text{отк}_i})$  як

$$k_{\text{инт.пас}} = (t_{\text{отк}_i} - t_{\text{отк}_{i-1}}) \cdot v_{\text{HELLO}},$$

де  $v_{\text{HELLO}}$  – частота розповсюдження повідомлення HELLO.

Розраховано значення середньої частоти виникнення відмови на інтервалі знаходження маршрутизатора в пасивному стані, всередині інтервалу  $(t_{\text{отк}_{i-1}}; t_{\text{отк}_i})$  як

$$P_{\text{ср}}^* \left[ (0 < s \cdot \tau < 10) \in (t_{\text{отк}_{i-1}}; t_{\text{отк}_i}) \right] =$$

$$= \frac{\sum_{s=1}^{t_{\text{отк}_{\text{ср}}}} t_{\text{отк}_{\text{ср}}} \cdot s \cdot \tau \cdot \left( c / t_{\text{отк}_{\text{ср}}} - k_{\text{пр}} \right) / c}{t_{\text{отк}_{\text{ср}}}} \times \frac{\sum_{k=1}^{0,1 \cdot \Delta t} \sum_{j=1}^9 k_{\text{пр}} \cdot \frac{s_j \cdot \tau}{10}}{0,1 \cdot \Delta t} \quad (5)$$

де  $\tau$  – елементарний інтервал часу, що визначається в залежності від стану мережі;  $s$  – кількість таких елементарних інтервалів часу;  $c$  – константа, яка надає розмір часового інтервалу та визначається в залежності від типу маршрутизатора;  $\Delta t = t_{\text{отк}_i} - t_{\text{отк}_{i-1}}$ .

Розраховане за виразом (5) значення середньої частоти виникнення відмов на інтервалі знаходження маршрутизатора в пасивному стані для запропонованого методу можна прийняти як максимально допустиме значення середньої частоти виникнення відмов на інтервалі знаходження маршрутизатора у пасивному стані всередині інтервалу  $(t_{\text{отк}_{i-1}}; t_{\text{отк}_i})$ . Тобто має місце така умова:

$$\frac{\sum_{s=1}^{t_{\text{отк}_{\text{ср}}}} \frac{t_{\text{отк}_{\text{ср}}} \cdot s \cdot \tau \cdot \left( \frac{T_{\text{набл}}}{t_{\text{отк}_{\text{ср}}} - k_{\text{пр}}} \right)}{T_{\text{набл}}}}{t_{\text{отк}_{\text{ср}}}} \times \frac{\sum_{k=1}^{k_{\text{инт.пас}}} \frac{T_{\text{HELLO}}^{-1}}{\sum_{j=1}^k k} \cdot \frac{s_j \cdot \tau}{T_{\text{HELLO}}}}{k_{\text{инт.пас}}} \leq P_{\text{доп}}^* \quad (6)$$

Враховуючи вирази (3) – (5) можна збільшувати величину  $T_{\text{HELLO}}$ , доки виконується умова (6), що дозволяє значно зменшити об'єм службової інформації (об'єм інформації пакетів HELLO у протоколах, що розглядаються, складає приблизно 70% всієї поширюваної службової інформації), поширюваної маршрутизатором, та зменшити час передачі даних. У результаті застосування запропонованого методу, цільова функція (1) збільшиться в умовах стрибкоподібної зміни інтенсивності інтегральних потоків і багаторазових відмов і збоїв мережних пристроїв приблизно в 1,2 – 1,5 рази.

У третьому розділі досліджено характерні особливості трафіка, маршрут обслуговування якого містить ділянку БМПД, яка має найменшу пропускну здатність на встановленому маршруті з'єднання (або критичну ділянку). На основі порівняльної оцінки сучасних методів моделювання проведено класифікацію моделей фрактальних процесів та визначено множину основних параметрів трафікових процесів. Розроблено метод перерозподілу пропускну здатності у БМПД, який характеризується використанням результатів прогнозування поведінки фрактального трафіка.

З метою прогнозування поведінки фрактального трафіка, удосконалено ON/OFF-модель трафіка для критичної ділянки БМПД за рахунок урахування ієрархічної структури періодів активності (ON) об'єднаного трафіка  $N$  джерел та невід'ємних особливостей безпроводних мереж (таких, як, наприклад, хендовер).

Для урахування активності  $j$ -го джерела задається розбиття інтервалу часу  $[0, T]$  на  $n_j^{(\text{on})}$  періодів активності джерела  $i = 1, n_j^{(\text{on})}$  (рис. 1, а):

$$R_j^{(on)} = \left\{ t_{j,i}^{(on)} = \left\langle t_{j,i}^{(0)}, \Delta t_{j,i} \right\rangle \mid i = \overline{1, n_j^{(on)}}; t_{j,i+1}^{(0)} > t_{j,i}^{(0)} + \Delta t_{j,i}; t_{j,i}^{(0)} \in [0, T]; t_{j, n_j^{(on)}}^{(0)} \leq T \right\}, \quad (7)$$

де  $j$  – індекс джерела;  $i$  – номер інтервалу активності  $j$ -го джерела (ON-період);

$t_{j,i}^{(0)}$  – початок  $i$ -го ON-інтервалу тривалістю  $\Delta t_{j,i}$ .

Це розбиття дозволяє врахувати порядок проходження груп пакетів на кожному ON-інтервалі цього джерела за рахунок введення такого уточнювального розбиття (рис. 1, б):

$$R_{j,i}^{(A)} = \left\{ t_{j,i,k}^{(A)} = \left\langle t_{j,i,k}^{(0)}, \delta t_{j,i,k} \right\rangle \mid k = \overline{1, n_{j,i}^{(A)}}; t_{j,i,k}^{(0)} \in R_{j,i}^{(on)} \right\}, \quad (8)$$

де  $k$  – номер інтервалу передачі групи пакетів в інтервал активності  $t_i^{(on)}$ ;  $n_{j,i}^{(A)}$  –

кількість груп пакетів з початковим часом  $t_{j,i,k}^{(0)}$  і тривалістю передачі  $\delta t_{j,i,k}$ , які

передані в інтервал активності  $t_i^{(on)}$   $j$ -м джерелом.

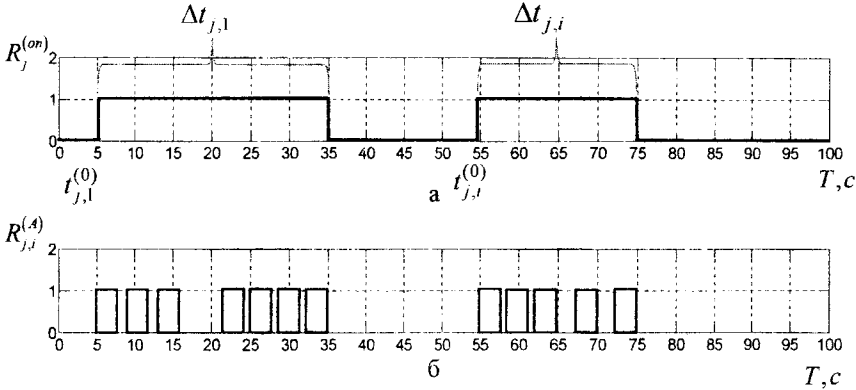
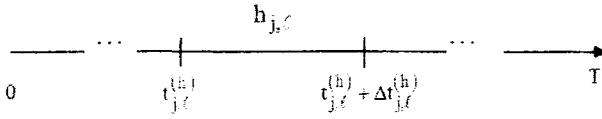


Рис. 1. Ієрархічна структура ON/OFF-моделі трафіка критичної ділянки БМПД:

а – інтервали активності  $j$ -го джерела; б – інтервали передачі груп пакетів в  $i$ -х інтервалах активності

Таке базове розбиття часової осі для ON/OFF-моделі враховує структуру періодів активності джерела. Отже, в моделі враховуються дві з перелічених вище причин, що обумовлюють прояв властивостей фрактальності трафіка: поведінка користувача і процес генерації трафіка. Для можливості врахування хендверу ON/OFF-моделлю, припустимо, що на часовому інтервалі  $[0, T]$   $j$ -й вузол  $L$  разів виходив із зони обслуговування БМПД, при цьому  $\ell$ -й інтервал хендверу ( $\ell = \overline{1, L}$ ) задамо як  $h_{j,\ell} = \left( t_{j,\ell}^{(h)}, t_{j,\ell}^{(h)} + \Delta t_{j,\ell}^{(h)} \right)$  (рис. 2). Це дозволяє визначити функцію часового зсуву в ON/OFF-моделі для врахування впливу хендверу:

$$h_j(t) = t + \sum_{t_{j,\ell}^{(h)} < t} \Delta t_{j,\ell}^{(h)}, \quad t \in [0, T], \quad \ell \in [1, L] \quad (9)$$

Рис. 2.  $\ell$ -й інтервал хендоверу

Використовуючи властивість функції Хевісайда для випадку  $\delta t < \Delta t$ ,

$$[Hv(t) - Hv(t + \Delta t)] \cdot [Hv(t) - Hv(t + \delta t)] = Hv(t) - Hv(t + \delta t),$$

а також зважаючи на те, що виконується умова  $T_T \ll \delta t < \Delta t$  (де  $T_T$  – час передачі пакета даних на встановленому маршруті), зміну швидкості передачі, обумовлену управлінням, ґрунтованим на зворотному зв'язку між адресатом і джерелом трафіка в межах заданого розбиття (7) та (8) з урахуванням (9), можна описати таким виразом:

$$C_{j,i,k}(t) = \sum_{\ell=0}^{\ell_{j,i,k}} \left( \left( A_j \cdot (1 - \alpha_{j,i}) + (t - \ell \cdot \tau_{j,i,k}) \cdot \frac{\omega_{j,i,k} \cdot \gamma_{j,i,k}}{T_T} \right) \times \right. \\ \left. \times \left( Hv \cdot (\tau_{j,i,k} \cdot \ell + \omega_{j,i,k}) - Hv \cdot (\tau \cdot \ell + \omega_{j,i,k} + T_T) \right) + \right. \\ \left. + \left( \gamma_{j,i} \left( t - h_j \left( t_{j,i,k}^{(0)} \right) \right) + A_j \cdot (1 - \alpha_{j,i}) - \ell \cdot \tau_{j,i,k} \right) \times \left( Hv \cdot (\ell \cdot \tau_{j,i,k}) - Hv \cdot (\ell \cdot \tau_{j,i,k} + \omega_{j,i,k}) \right) \right),$$

де  $h_j \left( t_{j,i,k}^{(0)} \right)$  – момент початку процесу;  $\gamma_{j,i,k}$  – коефіцієнт зміни швидкості джерела;  $\ell_{j,i,k}$  – кількість інтервалів зростання швидкості передачі  $j$ -го джерела на  $i$ -му інтервалі активності в межах  $\left[ h_j \left( t_{j,i,k}^{(0)} \right), h_j \left( t_{j,i,k}^{(0)} \right) + \delta t_{j,i,k} \right]$ ;  $A_j$  – доступна швидкість передачі для  $j$ -го джерела;  $\alpha_{j,i}$  – коефіцієнт, що враховує варіації зміни швидкості передачі;  $\omega_{j,i,k} = \frac{2\alpha_{j,i} \cdot A_j}{\gamma_{j,i,k}}$ ;  $\tau_{j,i,k} = h_j \left( t_{j,i,k}^{(0)} \right) + \omega_{j,i,k} + T_T$ .

Для інтегрованого вхідного потоку, інтенсивність агрегованого трафіка на виході даної ділянки БМІД розраховується як

$$I(t) = \sum_{j=0}^N \sum_{i=0}^{n_j^{(on)}} I_{j,i}(t) \quad \left( I_{j,i}(t) = \sum_{k=0}^{n_{j,i}^{(A)}} C_{j,i,k}(t) \right). \quad (10)$$

з такими обмеженнями:

$$I(t) \leq I_{\max}; \quad (11) \quad h_j(t) = t + \sum_{t_{j,\ell}^{(h)} < t} \Delta t_{j,\ell}^{(h)}, \quad \ell \in [0, L], \quad t_{j,0}^{(h)} = T; \quad \Delta t_{j,0}^{(h)} = 0; \quad (12)$$

$$\sum_{i=0}^{n_j^{(on)}} \Delta t_{j,i} \leq T_j; (13) \quad \sum_{k=0}^{n_{j,i}^{(A)}} \delta t_{j,i,k} \leq \Delta t_{j,i}; (14) \quad \alpha_{j,i} \ll 1; (15) \quad T_j \cdot I_{j,i,k} < \delta t_{j,i,k}; (16)$$

де  $j \in \overline{1, N}$ ;  $i \in \overline{1, n_j^{(on)}}$ ;  $k \in \overline{1, n_{j,i}^{(A)}}$ ;  $T_j$  – час, необхідний для передачі даних від  $j$ -го джерела через критичну ділянку;  $I_{\max}$  – максимально допустима швидкість передачі на критичній ділянці БМПД.

Отримано математичну модель (10) – (16), що описує як потоки даних від одного джерела, так і агрегований трафік, на відміну від аналогів, враховує реальні процеси в об'єднаних мережах передачі даних, до складу яких також входять БМПД. ON/OFF-модель трафіка БМПД дозволяє запропонувати метод, що дозволяє пропорційно розподіляти пропускну здатність на ділянках БМПД з відносно низькою пропускну здатністю на основі короткочасного прогнозу.

Перший етап методу припускає розподіл пропускну здатності між службовим й інформаційним трафіком. Нехай  $R$  – пропускну здатність критичної ділянки БМПД;  $R_{CT}$  – пропускну здатність критичної ділянки, надана службовому трафіку (СТ);  $R_{IT}$  – пропускну здатність критичної ділянки, надана інформаційному трафіку (ІТ);  $(R_{IT}^{(0)}, R_{CT}^{(0)})$  – початковий (у момент часу  $t_0$ ) розподіл пропускну здатності критичної ділянки за умови  $R_{IT}^{(0)} + R_{CT}^{(0)} < R$ .

Запропонований метод припускає визначення точки розподілу на основі прогнозування значень інтенсивності не окремих потоків, що проходять через критичну ділянку, а на основі прогнозування сумарного інформаційного трафіка за допомогою вдосконаленої ON/OFF-моделі, що дозволяє визначити максимальні значення інтенсивності ІТ на інтервалі прогнозування. Для цього проводиться аналіз статистичних характеристик вхідних потоків і їх перевірка на наявність властивостей фрактальності. Якщо значення показника Херста вказує на фрактальність трафіка ( $0,75 \leq H < 1$ ), то проводиться прогнозування за допомогою вдосконаленої ON/OFF-моделі трафіка на вході критичної ділянки БМПД. Інакше точка розподілу визначається за середніми значеннями СТ і ІТ, або використовуються існуючі методи пошуку точки розподілу.

Після проведення прогнозування визначається прогнозоване співвідношення ІТ і СТ –  $(R_{IT}^{(np_i)}, R_{CT}^{(np_i)})$ . Враховуючи значення пропускну здатності критичної ділянки  $R_{ky}$ , визначається точка розподілу  $(R_{IT}^{(x_i)}, R_{CT}^{(x_i)})$  (пропорційно значенням, що спрогнозовані):

$$R_{IT}^{(x_i)} = \frac{R_{ky}}{R_{IT}^{(np_i)} + R_{CT}^{(np_i)}} \cdot R_{IT}^{(np_i)}; \quad R_{CT}^{(x_i)} = \frac{R_{ky}}{R_{IT}^{(np_i)} + R_{CT}^{(np_i)}} \cdot R_{CT}^{(np_i)}. \quad (17)$$

Аналогічно (19) визначаються і подальші точки для подальших інтервалів ( $i+1$  і т.д.).

Другий етап методу полягає в модифікації першого етапу для перерозподілу складових ІТ. Нехай, критична ділянка на даному інтервалі часу обслуговує  $K$  потоків трафіка. Використовуючи запропоновану модель,

спрогнозуємо для кожного з  $K$  потоків необхідну пропускну здатність на  $i$ -му інтервалі часу –  $R_{ит,k}^{пр_i}$ . Далі визначимо для кожного з потоків ваговий коефіцієнт  $\alpha_k$ , що визначає пріоритетність його проходження на цій ділянці ( $\sum_{k=1}^K \alpha_k = 1$ ). Зазначимо, що для критичної ділянки більш переважне безпріоритетне пропускання потоків, тобто  $\alpha_k = 1/K \forall k$ . Визначимо розмір смуги пропускання для кожного з потоків, що обслуговуються, як

$$R_{ит,k}(x_i) = \frac{\alpha_k \cdot R_{ит,k}^{(пр_i)}}{\sum_{k=1}^K (\alpha_k \cdot R_{ит,k}^{(пр_i)})} \cdot R_{ит,k}(x_i).$$

Для проведення прогнозування, в кожному потоці ІТ оцінюються значення показника Херста. Якщо це значення не задовольняє умову  $0,75 \leq H < 1$ , застосовуються відомі методи розподілу пропускну здатності, інакше – здійснюється прогнозування значень інтенсивності  $\lambda_{прог}$  для цих потоків за допомогою вдосконаленої ON/OFF-моделі.

Таким чином, запропонований метод перерозподілу пропускну здатності у безпроводній мережі дозволяє зменшити час передачі пакета даних на критичній ділянці мережі передачі даних за рахунок більш раціонального використання смуги пропускання у разі виявлення властивостей фрактальності потоків трафіка.

**У четвертому розділі** запропоновано удосконалення методу параметричного управління передачею даних, що застосовується у протоколі TCP Freeze, досліджено його сумісність з методами, які застосовані у розповсюдженій модифікації протоколу TCP Reno, та взаємодію з фоновим трафіком у БМПД.

На відміну від існуючого методу параметричного управління, удосконалений метод дозволяє досягти збільшення пропускну здатності шляхом урахування динаміки зміни часу передачі пакетів у встановленому з'єднанні. Для цього запропонований механізм безпосереднього управління нижньою ( $\alpha$ ) та верхньою ( $\beta$ ) межами одного з основних параметрів протоколу – розміру плаваючого вікна.

Удосконалений метод базується на основних принципах параметричного управління передачею даних, застосованих у протоколі TCP Freeze, зокрема у безпроводному середовищі, у вигляді такого виразу:

$$W_f(t+1) = \begin{cases} W_f(t) + 1, & \alpha \cdot \left( \frac{q(t) + \mu T_p + 1}{q(t)} \right) > W_f(t); \\ W_f(t), & \alpha \leq \delta \leq \beta; \\ W_f(t) - 1, & \beta \cdot \left( \frac{q(t) + \mu T_p + 1}{q(t)} \right) < W_f(t), \end{cases}$$

де  $W_f$  – розмір плаваючого вікна протоколу TCP Freeze;  $q(t)$  – розмір черги;  $\delta$  – кількість відправлених, але ще не підтверджених пакетів даних;  $\mu$  – інтенсивність обробки пакетів маршрутизатором;  $T_p$  – час передачі пакета даних на встановленому маршруті. Параметричне управління здійснюється за рахунок динамічної зміни характеристик  $\alpha$  та  $\beta$  плаваючого вікна.

У розділі також отримано вирази для розмірів плаваючих вікон протоколів TCP Reno та TCP Freeze, відповідно:

$$W_r(t) = \frac{K_r}{\sqrt{p(t)}}, \quad W_f(t) = q(t) + T_R \cdot C + 1 - \frac{K_r}{\sqrt{p(t)}},$$

де  $W_r$  – розмір плаваючого вікна протоколу TCP Reno;  $K_r$  – константа;  $C$  – пропускна здатність каналу (або розмір смуги пропускання), який є критичною ділянкою на маршруті з'єднання;  $p$  – ймовірність втрати пакета;  $T_R$  – час передачі пакета даних у встановленому протоколом TCP Reno з'єднанні.

У п'ятому розділі проведено імітаційне моделювання процесу управління передачею даних у БМПД на підставі розробленої блок-схеми моделі процесу. Зроблено оцінку результатів застосування методу зменшення часу передачі даних у БМПД за рахунок раціональної маршрутизації, на підставі моделювання характерних навантажень, які можуть виникати у БМПД. Показано, що виграш, отриманий в результаті застосування запропонованого методу, в порівнянні з методом маршрутизації, застосованому в протоколі EIGRP, складає до 15 % в модельованих умовах. Необхідно підкреслити, що перевантаження маршрутизатора (яке призводить до втрат пакетів, що поступають на вхід маршрутизатора), яке виникає під час застосування методу маршрутизації службової інформації протоколом EIGRP, є періодичним і спостерігатиметься доти, доки інтенсивність призначеної для користувача інформації не почне зменшуватися, тобто в моменти генерації і поширення повідомлень HELLO, оновлюючих повідомлень і повідомлень про виникнення відмов. Крім того, необхідно зазначити, що для БМПД, у разі передачі трафіка реального часу, факт втрати такої кількості пакетів є одним з найкритичніших, оскільки існує велика ймовірність втрати пакетів з важливими оперативними даними.

Також у даному розділі зроблено оцінку результатів застосування розробленого методу перерозподілу пропускної здатності на підставі запропонованої програми досліджень. У результаті застосування запропонованого методу перерозподілу пропускної здатності, показник Херста даного трафікового процесу знижується.

Наступним етапом було проведення порівняльного аналізу статистичних характеристик реального трафіка та процесу передачі даних, отриманого за допомогою вдосконаленої ON/OFF-моделі. Розрахунок показника Херста для реального телекомунікаційного трафіка БМПД з наявністю хендовера, показав, що його значення знаходиться в межах  $H = 0,7 \div 0,9$ , а трафік має фрактальні властивості. Встановлено, що при цьому з ймовірністю 0,7 – 0,85 можна передбачити характер поведінки трафіка, використовуючи для короткострокового прогнозу вдосконалену ON/OFF-модель. Водночас трафік, за відсутності хендовера та неперевантаженості каналів передачі даних,

характеризувався показником Херста  $H = 0,5...0,55$ , а його прогноз співпадав із результатами, отриманими за допомогою традиційної пуасонівської моделі. Таким чином, експериментально доведено, що прогнозування можливе саме для фрактального трафіка і не має сенсу при традиційній пуасонівській моделі телекомунікаційного трафіка.

Результати порівняння застосування запропонованого та існуючого методу перерозподілу пропускної здатності наведено в табл. 1.

Таблиця 1

## Результати теоретичних розрахунків та імітаційного моделювання

| Умови розрахунків      | Час спостереження, с | Розмір пакета, біт | Середнє значення $\lambda_j$ , біт/с | Втрати, пакети | Час передачі, мс |
|------------------------|----------------------|--------------------|--------------------------------------|----------------|------------------|
| Теоретичні розрахунки  |                      |                    |                                      |                |                  |
| Рено                   | 5000                 | 4096               | 5621,3                               | 2863           | 684              |
| Розроблений метод      | 5000                 | 4096               | 5621,3                               | 2434           | 534              |
| Виграш, %              |                      |                    |                                      | 15             | 22               |
| Імітаційне моделювання |                      |                    |                                      |                |                  |
| Рено                   | 5000                 | 4096               | 5621,3                               | 2612-3014      | ≈ 656...692      |
| Розроблений метод      | 5000                 | 4096               | ≈ 5900                               | ≈ 2272...2532  | ≈ 531...552      |
| Виграш, %              |                      |                    |                                      | 13-16          | 19-23            |

Як видно з результатів дослідження, застосування розробленого методу перерозподілу пропускної здатності критичної ділянки БМПД приблизно в 1,2 рази зменшує час передачі пакета даних на критичній ділянці з обмеженою пропускною здатністю та до 16 % знижує кількість втрачених пакетів даних.

Крім того, проведено експериментальні дослідження методу параметричного управління передачею даних та імітаційної моделі прогнозування трафіка. Згідно з результатами моделювання, запропонований метод параметричного управління передачею даних дозволив досягти більш пропорційного розподілу ресурсів мережі між з'єднаннями різними модифікаціями протоколів TCP і фоновим трафіком. Це призвело до збільшення пропускної здатності транспортного протоколу у безпроводній мережі до 18 %, яке досить добре узгоджується з теоретичними дослідженнями.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі наведено результати, які, відповідно до мети дослідження, у сукупності є розв'язанням актуальної науково-практичної задачі, пов'язаної із збільшенням пропускної здатності безпроводних мереж шляхом розробки методів та засобів управління передачею даних на основі більш раціонального перерозподілу смуги пропускання безпроводного каналу передачі даних, зменшення завантаження буферної пам'яті маршрутизатора та кількості втрат пакетів.

У результаті виконання роботи отримано такі наукові результати:

1. Новий метод зменшення часу передачі даних у безпроводній мережі, який характеризується урахуванням інтервалів надмірного завантаження

процесорів маршрутизаторів, що призводить до збільшення інтенсивності обслуговування трафіка безпроводною мережею (до 15%).

2. Новий метод перерозподілу пропускної здатності у безпроводній мережі, який використовує результати короткочасного прогнозу інтенсивності трафіка та дозволяє провести оперативний перерозподіл пропускної здатності у випадку надбання трафіком фрактального характеру, що дає можливість істотно зменшити час передачі даних (до 23%) та кількість втрачених пакетів (до 16%).

3. Удосконалений метод зменшення завантаження буферної пам'яті маршрутизатора, який відрізняється від існуючих урахуванням динамічного процесу обслуговування пакетів процесорами маршрутизатора, що дозволяє зменшити довжину періодів неповного завантаження процесорів та призводить до прискорення процесу передачі даних у безпроводній мережі (до 12%).

4. Удосконалений метод параметричного управління передачею даних, який відрізняється можливістю врахування динаміки змін характеристик параметрів транспортного протоколу, що дозволило досягти істотного збільшення пропускної здатності у безпроводній мережі (до 18%) та, відповідно, зменшення часу передачі даних, ніж в існуючих методах.

5. Запропоновані методи зменшення часу передачі даних, перерозподілу пропускної здатності, зменшення завантаження буферної пам'яті маршрутизатора та параметричного управління передачею даних були використані у ТОВ «Софтсервіс» (м. Харків) під час розробки нових засобів управління передачею даних у безпроводних мережах, що підтверджено актом впровадження.

6. Теоретичні результати роботи використовуються у навчальному процесі на кафедрі ЕОМ ХНУРЕ у курсах «Корпоративні комп'ютерні мережі», «Комп'ютерні системи та мережі» та «Комп'ютерні мережі», а також у курсовому та дипломному проектуванні.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Мохаммад, А.С. Метод уменьшения загрузки буферной памяти маршрутизатора [Текст] / А.С. Мохаммад // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – 2011. – № 3 (51). – С. 91 – 94.
2. Завизиступ, Ю.Ю. Модификация протокола TCP SACK [Текст] / Ю.Ю. Завизиступ, А.А. Коваленко, А.С. Мохаммад // Системы обработки информации: сб. научн. тр. – Х.: ХУВС, 2006. – Вып. 9 (58). – С. 97 – 102.
3. Завизиступ, Ю.Ю. Метод компенсации потерь производительности протокола TCP при переходе мобильного узла в соседнюю зону обслуживания в беспроводных сетях [Текст] / Ю.Ю. Завизиступ, А.С. Мохаммад, А.А. Коваленко // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУПС, 2007. – Вып. 1 (13). – С. 56 – 60.
4. Завизиступ, Ю.Ю. Особенности функционирования протоколов в беспроводных сетях [Текст] / Ю.Ю. Завизиступ, А.А. Коваленко, А.С. Мохаммад, М.А. Можаяв // Системы обработки информации: сб. научн. тр. – Х.: ХУВС, 2010. – Вып. 5 (86). – С. 39 – 42.
5. Завизиступ, Ю.Ю. Анализ факторов, влияющих на пропускную способность беспроводных сетей [Текст] / Ю.Ю. Завизиступ, А.С. Мохаммад, А.А. Коваленко

- // Системи управління, навігації та зв'язку: зб. наук. праць. – К.: ЦНДІ НіУ, 2011. – Вип. 2 (18). – С. 260 – 264.
6. Завизиступ, Ю.Ю. Метод перераспределения нагрузки базовой станции в технологии WIMAX [Текст] / Ю.Ю. Завизиступ, А.А. Коваленко, А.С. Мохаммад, М.А. Можаяев // Системы обработки информации: сб. научн. тр. – Х.: ХУВС, 2011. – Вып. 5 (95). – С. 212 – 217.
7. Кучук, Г.А. Метод уменьшения времени передачи данных в беспроводной сети [Текст] / Г.А. Кучук, А.С. Мохаммад, А.А. Коваленко // Системи управління, навігації та зв'язку: зб. наук. праць. – К.: ЦНДІ НіУ, 2011. – Вип. 3 (19). – С. 209 – 213.
8. Кучук, Г.А. Метод персраспределения пропускной способности для уменьшения времени передачи данных в беспроводной сети [Текст] / Г.А. Кучук, А.С. Мохаммад, А.А. Коваленко // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУПС, 2011. – Вип. 3 (29). – С. 140 – 145.
9. Кучук, Г.А. Метод параметрического управления передачей данных для модификации транспортных протоколов беспроводных сетей [Текст] / Г.А. Кучук, А.С. Мохаммад, А.А. Коваленко // Системы обработки информации: сб. научн. тр. – Х.: ХУВС, 2011. – Вып. 8 (98). – С. 211 – 218.
10. Мохаммад, А.С. Использование триггеров канального уровня для прогнозирования перемещения узла в беспроводных сетях [Текст] / А.С. Мохаммад, Ю.Ю. Завизиступ // 1-я межд. НТК «Информационные технологии в навигации и управлении: состояние и перспективы развития»: тезисы докл.: – К.: ДП «ЦНДІ НіУ», 5 – 6 липня 2010 р. – С. 59.
11. Мохаммад, А.С. Анализ и изучение факторов, влияющих на пропускную способность беспроводных сетей [Текст] / А.С. Мохаммад, Ю.Ю. Завизиступ // 1-я НТК «Современные направления развития информационно-коммуникационных технологий и средств управления»: тезисы докл.: – Х.: ДП «ХНДІ ТМ»; К.: ДП «ЦНДІ НіУ», 13 – 14 грудня 2010. – С. 81.
12. Мохаммад, А.С. Подходы к разработке метода уменьшения времени передачи данных в беспроводных сетях [Текст] / А.С. Мохаммад, Ю.Ю. Завизиступ, В.А. Калоша, А.А. Коваленко // 2-я межд. НТК «Информационные технологии в навигации и управлении: состояние и перспективы развития»: тезисы докл.: – К.: ДП «ЦНДІ НіУ», 16 – 17 липня 2011. – С. 46.
13. Мохаммад, А.С. Подходы к уменьшению загрузки буферной памяти маршрутизатора для выравнивания баланса интенсивностей входных потоков [Текст] / А.С. Мохаммад // Всеукр. НТК «Интегрированные компьютерные технологии в машиностроении ИКТМ-2011»: тезисы докл.: – Х.: НАУ «ХАИ», 22 – 26 листопада 2011. – Т. 2. – С. 199.
14. Мохаммад, А.С. Подходы к разработке метода перераспределения пропускной способности для уменьшения времени передачи данных в беспроводных сетях [Текст] / А.С. Мохаммад, Ю.Ю. Завизиступ, А.А. Коваленко // 2-я межд. НТК «Современные направления развития информационно-коммуникационных технологий и средств управления»: тезисы докл.: – Х.: ДП «ХНДІ ТМ»; К.: ДП «ЦНДІ НіУ», 15 – 16 грудня 2011. – С. 38 – 39.

## АНОТАЦІЯ

*Мохаммад Амін Салех.* Методи та засоби управління передачею даних у безпроводних мережах. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – Комп'ютерні системи та компоненти. Харківський національний університет радіоелектроніки, Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України, Харків, 2012.

Дисертація присвячена питанням розв'язання задачі зменшення часу передачі даних у безпроводних мережах передачі даних на основі урахування характеристик типів трафіка, впливу зовнішніх факторів та особливостей мереж.

Основні результати: новий метод зменшення часу передачі даних у безпроводній мережі, який враховує наявність та довжину інтервалів надмірного завантаження процесорів маршрутизатора, що дозволяє збільшити інтенсивність обслуговування трафіка мережею; новий метод перерозподілу пропускної здатності у безпроводній мережі, що враховує властивості фрактальності інформаційних потоків і щільності розподілу ймовірності зміни їх інтенсивності, та полягає в управлінні швидкістю передачі потоків даних, що поступають на вхід критичної ділянки мережі за рахунок прогнозування їх інтенсивності, що дозволяє зменшити час передачі даних у безпроводній мережі; удосконалений метод зменшення завантаження буферної пам'яті маршрутизатора, який відрізняється використанням результатів динамічного управління інформаційними потоками на вході маршрутизатора, що дозволяє прискорити процес передачі даних у безпроводній мережі; удосконалений метод параметричного управління передачею даних, який відрізняється можливістю врахування динаміки змін характеристик параметрів транспортного протоколу, що дозволяє збільшити пропускну здатність протоколу.

Ключові слова: управління, передача даних, безпроводна мережа, трафік, потік, черга, пропускну здатність, масштабна інваріантність, перерозподіл.

## АННОТАЦИЯ

*Мохаммад Амин Салех.* Методы и средства управления передачей данных в беспроводных сетях. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 – Компьютерные системы и компоненты. Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Министерство образования и науки, молодежи и спорта Украины, Харьков, 2012.

Диссертация посвящена вопросам решения актуальной современной задачи – разработки методов управления передачей данных в беспроводных сетях, которые позволяют увеличить пропускную способность сетей и уменьшить время передачи данных на основе учета характеристик типов трафика и особенностей беспроводных сетей наряду с влиянием внешних факторов и гетерогенностью структуры сети.

Проведено исследование характеристик ~~различных типов трафика~~ на входе критического участка беспроводной ~~сети~~ <sup>передачи данных</sup>, а также

существующих методов и средств управления передачей данных. Сделан вывод, что существующие методы и средства управления передачей данных, в общем, не в полной мере удовлетворяют современным требованиям относительно времени передачи данных и пропускной способности в беспроводных сетях, и в частности, не учитывают свойств фрактального трафика и характерных особенностей беспроводных сетей. Следовательно, для уменьшения времени передачи данных требуется разработка новых методов, в том числе учитывающих свойства фрактального телекоммуникационного трафика.

Разработан метод уменьшения времени передачи данных в беспроводной сети, который основывается на учете количества и длительности интервалов чрезмерной загрузки процессоров маршрутизаторов сетей на основе коммутации пакетов. Применение предложенного метода позволяет увеличить интенсивность обслуживания трафика в беспроводной сети за счет снижения интенсивности генерации необязательного служебного трафика маршрутизаторами, в том числе не обслуживающими маршрут установленного соединения.

Разработан метод перераспределения пропускной способности в беспроводной сети, учитывающий свойства фрактальности потоков трафика, а также плотности распределения вероятности изменения их интенсивностей, обусловленные долговременной корреляционной зависимостью и позволяющий производить оперативное перераспределение пропускной способности критического участка беспроводной сети передачи данных на основе краткосрочного прогнозирования интенсивности поступающих потоков данных. Для краткосрочного прогнозирования на критическом участке беспроводной сети используется усовершенствованная ON/OFF-модель трафика. Модель позволяет учитывать как иерархическую структуру периодов активности объединенного трафика многих источников, так и особенности функционирования беспроводных сетей. Модель позволяет оценить характер входящего трафика на критическом участке с помощью показателя Херста. Разработанный метод используется в случае, если значение показателя превышает заданное пороговое значение, т.е. трафик приобретает фрактальный характер, при котором необходимо проводить оперативное перераспределение пропускной способности. Кроме того, характерной особенностью разработанного метода является учет такой неотъемлемой особенности беспроводных сетей передачи данных, как хэндовер. Для учета данного события предложена специальная функция задержки по времени, позволяющая выделить интервалы хэндовера. Применение предложенного метода перераспределения пропускной способности на критическом участке беспроводной сети при фрактальном характере входящего телекоммуникационного трафика позволяет уменьшить время передачи данных и количество потерянных пакетов в беспроводной сети.

Получил дальнейшее развитие метод уменьшения загрузки буферной памяти маршрутизатора, который отличается от существующих учетом динамического процесса обслуживания пакетов процессорами маршрутизатора беспроводной сети передачи данных. Применение такого метода позволяет

уменьшить длительность периодов неполной загрузки процессоров и приводит к ускорению процесса передачи данных в беспроводной сети за счет реализации возможности разгрузки буферной памяти маршрутизатора на соответствующих временных интервалах.

Получил дальнейшее развитие метод параметрического управления передачей данных, который отличается от существующих возможностью учета динамики изменений характеристик параметров транспортного протокола. Применение такого метода позволяет увеличить пропускную способность беспроводной сети передачи данных и уменьшить время передачи данных. Наиболее значительный прирост пропускной способности достигается в случае наличия гетерогенной беспроводной сетевой среды и присутствия трафика, не обладающего свойствами фрактальности.

Ключевые слова: управление, передача данных, беспроводная сеть, трафик, поток, очередь, пропускная способность, масштабная инвариантность, перераспределение.

## ABSTRACT

*Mohammad Amin Saleh.* Methods and means for data transmission control in wireless networks. -- Manuscript.

The thesis on competition of a scientific degree of Cand.Tech.Sci. (Ph.D.) in speciality 05.13.05 – Computer Systems and Components. Kharkiv National University of Radio Electronics, Ministry of education and science, youth and sport of Ukraine, Kharkiv, 2012.

The thesis is devoted to the problems related with decreasing of data transmission time in the wireless network. The problems are solved on the basis of consideration of traffic nature, influence of external factors and features of networks.

The main results: new method for data transmission time decreasing in wireless network, which takes into account the availability and duration of router's processors overloading intervals, and allows increasing service rate for traffic in network; new method for bandwidth reallocation in wireless network, which takes into account fractal properties of information flows and probability density functions for their rate, which are conditioned by long-range correlative dependence, and the method is in controlling of data flows rate, which input to the bottleneck link of a network, basing on prediction results, that allows decreasing data transfer time in wireless network; modified method for decreasing of router's buffer memory utilization which is based on results of information flows dynamical control at router's input, and allows speeding up data transfer process in wireless network; modified method for parametric control of data transfer, which is based on dynamics of transport protocol parameters' characteristics change, that allows increasing of transport protocol's throughput.

Key words: control, data transmission, wireless network, traffic, flow, queue, throughput, scale invariance, reallocation.

Відповідальний випусковий **Кривуля Г.Ф.**

Підп. до друку 25.05.11.

Умов. друк. арк. 1,2.

Зам. № 2-459.

Формат 60х84/16.

Облік. вид. арк. 1,0.

Ціна договірна.

Спосіб друку – ризографія.

Тираж 100 прим.

---

ХНУРЕ, 61166, Харків, просп. Леніна, 14

---

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