

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. З проведеного аналізу видно, що сучасні й перспективні мультисервісні телекомунікаційні мережі (ТКМ) розвиваються в напрямку впровадження концепції мереж наступного покоління NGN (Next Generation Network). При цьому відповідно до рекомендацій Міжнародного союзу електрозв'язку серії Y.2000 в основу NGN закладається стек протоколів TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol).

Практика показує, що забезпечення гарантій якості обслуговування (Quality of Service, QoS) в ТКМ безпосередньо залежить від ефективності управління трафіком, в ході якого важливу роль відіграють функції, що виконуються транспортним рівнем еталонної моделі взаємодії відкритих систем (EMBVC). На цьому рівні найбільш поширеним є протокол TCP, який відноситься до результативних засобів вирішення ключових мережних завдань, таких як забезпечення надійної доставки повідомлень, покращення збалансованості завантаження мережі та міжкінцевих показників якості обслуговування QoS.

Однак недосконалість покладених в основу TCP математичних моделей та евристичних схем нерідко супроводжується необґрунтованим вибором режимів та числових значень основних параметрів протоколу. Це, в свою чергу, призводить до втрати стійкості TCP-сеансів, що проявляється на практиці в їх коливальному режимі, повільній збіжності, і, як результат, в зростанні втрат пакетів і зниженні якості обслуговування в ТКМ у цілому.

Отже, актуальною є наукова задача, яка полягає в удосконаленні засобів управління передачею даних на транспортному рівні еталонної моделі взаємодії відкритих систем шляхом розробки математичної моделі TCP-сеансів та методів аналізу їх стійкості та оптимізації, що дасть можливість підвищити продуктивність мультисервісних телекомунікаційних мереж.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота пов'язана з реалізацією основних положень «Концепції національної інформаційної політики», «Концепції Національної програми інформатизації», «Основних засад розвитку інформаційного суспільства в Україні на 2007–2015 роки» та «Концепції конвергенції телефонних мереж та мереж з пакетною комутацією в Україні». Результати роботи використано в науково-дослідницькій роботі № 235-1 «Методи проектування телекомунікаційних мереж NGN та управління їх ресурсами», в якій дисертант був виконавцем. Отримано патент на корисну модель «Спосіб керування чергами для забезпечення стійкості TCP-сеансу в умовах лінійної моделі блокування пакетів» (№ 49641, номер заявки u 2009 09992; заявл. 01.10.2009; опубл. 11.05.2010, Бюл. № 9).

Мета роботи полягає у підвищенні продуктивності TCP-сеансів передачі даних.

Завданнями дослідження є:

- аналіз мережних технологій, що використовуються в мультисервісних ТКМ;
- формулювання вимог до моделей і методів контролю та запобігання перевантаженням у ТКМ;
- розробка математичної моделі TCP-сеансів відповідно до сформульованих вимог;

- розробка методу аналізу стійкості TCP-сеансів і формулювання умов її забезпечення на основі теорії біфуркацій;

- розробка методу оптимізації TCP-сеансів та обґрунтування експоненціальної моделі блокування пакетів у межах алгоритмів AQM (Active Queue Management);

- перевірка адекватності запропонованих моделі та методів, оцінка ефективності отриманих на їх основі рішень;

- розробка рекомендацій щодо практичного застосування запропонованих моделі і методів у сучасних і перспективних ТКМ.

Об’єкт дослідження – процес передачі даних у межах TCP-сеансів.

Предмет дослідження – модель TCP-сеансів, методи аналізу стійкості та оптимізації TCP-сеансів у мультисервісних ТКМ.

Методи дослідження. Протягом розробки моделі TCP-сеансів був використаний апарат диференційних рівнянь, теорія масового обслуговування. Під час розробки методу аналізу стійкості TCP-сеансів і отримання умов її забезпечення використано математичний апарат теорії біфуркацій. Протягом розробки методу оптимізації TCP-сеансів використовувалися методи оптимального управління. У ході проведення оцінки ефективності використано методи математичного моделювання та лабораторного експерименту.

Наукова новизна отриманих результатів. Під час розв’язання поставленої наукової задачі автором було отримано такі нові наукові результати:

- удосконалено динамічну модель TCP-сеансів передачі даних, новизна якої полягає в тому, що в ній на відміну від відомих рішень, по-перше, описується з урахуванням класів обслуговування передача трафіка одночасно в декількох TCP-сеансах, взаємопов’язаних між собою; по-друге, враховуються зміни режимів передачі даних slow start і congestion avoidance в протоколі TCP; по-третє, використовується формула Літтла під час розрахунку середньої довжини черги при визначенні ймовірності відкидання пакетів; в четвертих, при визначенні ймовірності відкидання (блокування) пакетів в AQM-алгоритмах можна використовувати як лінійну модель (RED/WRED), так і більш ефективні нелінійні моделі відкидання пакетів. У результаті це дозволило більш повно та взаємопов’язано описати особливості процесу передачі даних у межах протоколу TCP та AQM-алгоритмів у мультисервісних ТКМ;

- вперше запропоновано метод аналізу стійкості TCP-сеансів і отримані в аналітичному вигляді умови її забезпечення на основі використання теорії біфуркацій, що дало можливість обґрунтувати числові значення TCP та алгоритмів RED/WRED з урахуванням стаціонарного стану TCP-сеансів;

- вперше запропоновано метод оптимізації TCP-сеансів, у межах якого забезпечується розрахунок основних параметрів протоколу TCP та алгоритмів RED/WRED. Реалізація методу дозволяє з урахуванням динамічних обмежень, а також умов-обмежень за стійкістю TCP-сеансів максимізувати сумарну зважену щодо пріоритетів інтенсивність TCP-сеансів (мінімізувати сумарну зважену щодо пріоритетів інтенсивність відмов в обслуговуванні).

Практичне значення результатів роботи. Запропоновані в роботі математичні модель і методи можуть бути використані під час розв’язання задач аналізу

(порівняння різних версій протоколу TCP, дослідження впливу параметрів TCP й AQM-алгоритмів на функціонування TCP-сеансів) і синтезу (обґрунтування та вибір параметрів і режимів TCP/AQM, розробка нових версій TCP та інших протоколів транспортного рівня як засобів боротьби з перевантаженнями). Крім того, результати дисертаційної роботи використано під час виконання науково-дослідної роботи № 235-1 «Методи проектування телекомунікаційних мереж NGN та управління їх ресурсами», в яких автор виступав виконавцем. Запропоновані математична модель TCP-сеансів і методи аналізу їх стійкості та оптимізації використані в навчальному процесі кафедри телекомунікаційних систем Харківського національного університету радіоелектроніки, зокрема в дисципліні «Алгоритми управління та адаптації в ТКС». Використання результатів дисертаційної роботи підтверджено відповідними актами впровадження. Отримано патент на корисну модель «Спосіб керування чергами для забезпечення стійкості TCP-сеансу в умовах лінійної моделі блокування пакетів» (№ 49641, номер заявки у 2009 09992; заявл. 01.10.2009; опубл. 11.05.2010, Бюл. № 9).

Особистий внесок здобувача. У роботах, виконаних у співавторстві, особисто Старковій О.В. належать такі наукові результати: в роботі [1] автору належить вибір цільового функціоналу, згідно з яким відбувається розрахунок управляючих змінних під час розв'язання оптимізаційної задачі; у статті [2] проаналізовано існуючі методи управління мережними ресурсами і підходи до розв'язання виникаючих при цьому оптимізаційних задач; у [5] було проведено аналіз існуючих підходів до аналізу стійкості телекомунікаційних систем; в роботі [6] застосовано метод аналізу стійкості, що заснований на теорії біфуркацій, для виявлення областей стійкості прогнозування розвитку транспортної глобальної інформаційної інфраструктури; у статті [8] автору належить розробка методу оптимізації TCP-сеансів передачі даних; у праці [9] отримано умови забезпечення стійкості TCP-сеансу в умовах лінійної моделі блокування пакетів.

Апробація результатів дисертації проводилась протягом двадцяти однієї наукової конференції (форумів), у тому числі на Міжнародній студентській науково-технічній конференції «Інформатика і комп'ютерні технології» (Донецьк, ДонНТУ 2006); 11-му, 12-му, 13-му, 14-му Міжнародних молодіжних форумах «Радіоелектроніка та молодь у XXI сторіччі» (м. Харків, ХНУРЕ 2007–2010); 12-й Всеросійській науково-технічній конференції студентів, молодих вчених і спеціалістів «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании НИТ-2007» (Рязань, РГРТУ, 2007); 3-й та 4-й Міжнародній молодіжній науково-технічній конференції студентів, аспірантів та вчених «Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ-2007» і «РТ-2008» (Севастополь, СевНТУ, 2007–2008); 1-й та 2-й Науково-технічних конференціях «Проблеми телекомунікацій» (Київ, НТУУ «КПІ», 2007–2008); Міжнародній науково-практичній конференції „Обробка сигналів і негауссівських процесів” пам'яті професора Кунченка Ю.П. (Черкаси: ЧДТУ, 2007); 2-й Міжнародній науковій конференції «Сучасні інформаційні системи. Проблеми та тенденції розвитку» (Харків, ХНУРЕ, 2007); 7-й та 8-й Міжнародній науково-технічній конференції «Перспективные технологии в средствах передачи информации» (Володимир, Володим. держ. університет, 2007, 2009); 2-му науково-практичному семінарі молодих науковців та студентства «Сучасні телекомунікаційні та інформаційні тех-

нології» (Київ, УНДІЗ, 2007); International Conference TCSET'2008, TCSET'2010 «Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science» (Lviv-Slavsko: Lviv Polytechnic, 2008, 2010); 14-й Міжнародній науково-технічній конференції студентів та аспірантів «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, Московський енергетичний інститут, 2008); Науково-практичному семінарі молодих науковців та студентів «Питання розвитку телекомунікаційних мереж» (Київ, УНДІЗ, 2008); 3-му Міжнародному радіоелектронному форумі «Прикладна радіоелектроніка. Стан та перспективи розвитку» МРФ-2008 (Харків, АНПРЕ, ХНУРЕ, 2008); Науково-технічному симпозіумі «Нові технології в телекомунікаціях» (Київ, ДУІКТ, 2010).

Публікації. Основні положення дисертації висвітлено у 30 працях, з яких 10 виконані без співавторства. Серед праць 8 статей в наукових фахових виданнях, затверджених ВАК України [1–8]. Отримано патент на корисну модель [9]. Крім того, матеріали дисертації опубліковані в двадцяти одній тезі доповідей на науково-технічних конференціях і форумах [10–30].

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів та висновків. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 148 сторінок, із них 5 сторінок із рисунками та 1 з таблицею. Список використаних джерел містить 103 найменування на 11 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** розкрито стан дослідженої проблеми, обґрунтовано актуальність теми роботи, сформульовано наукову задачу та визначено мету досліджень. Зазначено наукову новизну та практичне значення отриманих у роботі результатів. Наведено дані про публікації автора за темою дисертації.

У **першому розділі** на основі проведеного аналізу відомих технологічних рішень щодо управління трафіком, виявлених особливостей та недоліків, встановлено ключову роль при контролі та запобіганню перевантаженням у ТКМ протоколу TCP та AQM-алгоритмів. З'ясовано, що втрата стійкості в роботі протоколу TCP та AQM-алгоритмів обумовлюється недоліками математичних моделей та евристичних схем, які покладено в їх основу. В зв'язку з цим сформульовано вимоги до технологічних засобів контролю та запобігання перевантаженням у ТКМ, які стосуються, перш за все, врахування динаміки процесів інформаційного обміну; підвищення рівня погодження в роботі протоколу TCP та AQM-алгоритмів; забезпечення адаптивної зміни числових значень TCP/AQM-параметрів відповідно до зміни характеристик каналів зв'язку та трафіка, вимог щодо якості обслуговування та ін. Обґрунтовано наукову задачу та здійснено її декомпозицію на окремі задачі дослідження.

У **другому розділі** сформульовано вимоги до математичних моделей, які можуть складати основу транспортних протоколів і AQM-алгоритмів. Розроблено математичну модель TCP-сеансів з урахуванням класів обслуговування, яка представлена системою нелінійних диференціальних рівнянь, що відображують динаміку багатопотокового інформаційного обміну в межах протоколу TCP та AQM-алгоритмів:

$$\frac{d\lambda_i^k(t)}{dt} = \begin{cases} \text{режим slow start :} \\ \left(1 - P^k(t)\right) \cdot \frac{MSS}{RTT^k} \cdot \lambda_i^k(t) - P^k(t) \cdot \left(\lambda_i^k(t)\right)^2 + P^k(t) \cdot MSS \cdot \lambda_i^k(t); \\ \text{режим congestion avoidance :} \\ \left(1 - P^k(t)\right) \cdot \left(\frac{MSS}{8 \cdot RTT^k} \cdot \lambda_i^k(t) + \frac{MSS \cdot MSS}{\left(RTT^k\right)^2} \right) - \\ - P^k(t) \cdot \left(\lambda_i^k(t)\right)^2 + P^k(t) \cdot MSS \cdot \lambda_i^k(t), \end{cases} \quad (1)$$

де λ_i^k – інтенсивність трафіка i -го TCP-сеансу в потоці з k -м класом обслуговування ($i = \overline{1, M^k}$), M^k – кількість TCP-сеансів у k -му потоці, $k = \overline{1, K}$, K – кількість класів обслуговування; MSS – максимальний розмір сегмента даних (*Maximum Segment Size*); RTT^k – час обертання пакетів (*Round Trip Time*); P^k – ймовірність відкидання пакетів з k -м класом обслуговування.

В моделі (1) забезпечується опис динаміки зміни режимів передачі даних у межах процесу функціонування протоколу TCP, наприклад *slow start* і *congestion avoidance*, також враховується можливість зміни цих режимів відповідно до різних версій і реалізацій протоколу TCP. Також у моделі (1) формалізовано залежність зміни вікна перевантаження від результату роботи AQM-алгоритму, наприклад, алгоритму RED/WRED, в якому ймовірність відкидання (блокування) пакетів k -го класу розраховується відповідно до виразу

$$P^k(t) = \frac{1}{m^k} \cdot \frac{N^k(t) - N_{\min}^k}{N_{\max}^k - N_{\min}^k}, \quad (2)$$

де m^k – знаменник граничної ймовірності; $N_{\min}^k$, $N_{\max}^k$ – мінімальний та максимальний середній розмір черги відповідно; $N^k(t)$ – середній розмір черги на мережному вузлі, який розраховувався виходячи з формули Літтла

$$N^k(t) = \frac{\sum_{i=1}^{M^k} \lambda_i^k(t)}{B^k - \sum_{i=1}^{M^k} \lambda_i^k(t)}, \quad (3)$$

де B^k – пропускна здатність, виділена k -му TCP-потoku.

Проведено дослідження запропонованої моделі (1)–(3), яке підтвердило відповідність моделі процесу передачі даних у реальних умовах TCP-сеансу (рис. 1, а).

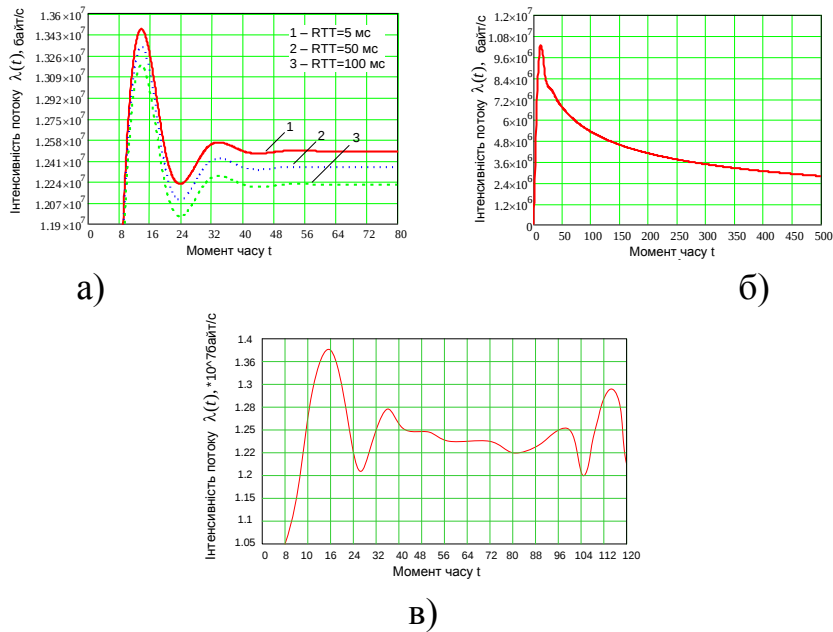


Рис. 1. Зміна інтенсивності передачі даних

Під час досліджень було встановлено, що TCP-сеанс досить чутливий до зміни параметрів як протоколу TCP (розміру вікна перевантаження, величини RTT , порогу, таймаута повторної передачі, режимів передачі), так і AQM-алгоритмів (наприклад, для алгоритму WRED це $N_{\min}^k$, $N_{\max}^k$, m^k , експонентного вагового коефіцієнта), а також коливань інтенсивності трафіка, що передається. Причому в ряді випадків ці чинники призводили до нестійкості TCP-сеансів (рис. 1, б, в), де під стійкістю розумівся характер реакції динамічної системи, якою є TCP-сеанс, на мале збурення її стану. Якщо незначні варіації параметрів мережі не викликали істотної зміни стану TCP-сеансу, то він називався стійким, а в іншому випадку – нестійким.

Третій розділ присвячено розробці методу аналізу стійкості TCP-сеансів та формулюванню умов її забезпечення на основі використання положень математичного апарату теорії біфуркацій, яка дозволяє виявити якісні, стрибкоподібні зміни у поведінці системи, викликані переходом (біфуркацією) з одного стаціонарного стану в інший в умовах незначних коливань параметрів. Запропонований метод передбачає таку послідовність дій:

1. Пошук стаціонарних станів (рішень) системи диференціальних рівнянь:

$$\frac{d\lambda_i^k(t)}{dt} = 0, \quad (4)$$

які з урахуванням змісту системи (1) мають вигляд

$$0 = \begin{cases} \text{режим slow start :} \\ \left(1 - P^k(t)\right) \cdot \frac{MSS}{RTT^k} \cdot \lambda_i^k(t) - P^k(t) \cdot \left(\lambda_i^k(t)\right)^2 + P^k(t) \cdot MSS \cdot \lambda_i^k(t); \\ \text{режим congestion avoidance :} \\ \left(1 - P^k(t)\right) \cdot \left(\frac{MSS}{8 \cdot RTT^k} \cdot \lambda_i^k(t) + \frac{MSS \cdot MSS}{\left(RTT^k\right)^2} \right) - \\ - P^k(t) \cdot \left(\lambda_i^k(t)\right)^2 + P^k(t) \cdot MSS \cdot \lambda_i^k(t). \end{cases} \quad (5)$$

2. Формування матриці Якобі і розкладання вихідних рівнянь в ряд Тейлора в околі отриманих стаціонарних рішень, що є процесом лінеаризації. Коефіцієнтами матриці Якобі є величини

$$a_{i,j} = \left. \frac{\partial F_i}{\partial \lambda_j^k} \right|_{\lambda_i^k = \lambda_i^{k0}}, \quad \text{де } F_i(\lambda_i^k) = \frac{d\lambda_i^k(t)}{dt}. \quad (6)$$

Відхилення від стаціонарних станів $\lambda_i^{k0}(t)$ задавалися так:

$$\Delta \lambda_i^k(t) = \lambda_i^k(t) - \lambda_i^{k0}(t). \quad (7)$$

3. Отримання системи однорідних лінійних диференціальних рівнянь:

$$F_i(\lambda_i^k) = \sum_{j=1}^M \left[a_{i,j} \cdot \Delta \lambda_j^k + O(\Delta \lambda_j^k) \right]. \quad (8)$$

4. Виведення характеристичного рівняння та розрахунок його коренів (власних значень) і власних векторів:

$$\Delta \lambda_i^k(t) = C_i \cdot e^{p \cdot t}, \quad (9)$$

де p – корені характеристичного рівняння.

5. Побудова траєкторії станів системи (фазового простору) та аналіз поведінки системи в околах стаціонарних станів. При цьому вигляд траєкторій станів системи в околі стаціонарної точки (стійкий/нестійкий вузол та фокус, сідло та центр) визначався значенням коренів характеристичного рівняння.

Виходячи зі значень коренів характеристичного рівняння, було сформульовано такі вимоги щодо забезпечення стійкості TCP-сеансів:

1) Для стаціонарного стану типу стійкого вузла:

$$p_1(\lambda, B, N_{\max}) \neq p_2(\lambda, B, N_{\max}), p_1(\lambda, B, N_{\max}) < 0, p_2(\lambda, B, N_{\max}) < 0; \quad (10)$$

2) Для стаціонарного стану типу стійкого фокуса:

$$p_{1,2}(\lambda, B, N_{\max}) = \varepsilon \pm i\beta, \quad \varepsilon > 0. \quad (11)$$

Показано, що отримані умови стійкості можуть бути використані як під час аналізу стану TCP-сеансів, так і під час обґрунтування вибору параметрів протоколу TCP та RED/WRED-алгоритмів. Для розв'язання другої задачі в роботі запропоновано метод оптимізації TCP-сеансів в межах всіх K класів, в основу

якого покладено розв'язання оптимізаційної задачі щодо мінімізації цільового функціоналу, поданого у скалярному або векторно-матричному вигляді:

$$J = \int_0^{\tau} \left[\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^M \alpha_i^k \cdot \lambda_i^{k \text{ відм}}(t) \right] dt, \quad (12)$$

$$J = \int_0^{\tau} \sum_{k=1}^K A_k^T \Lambda_{k \text{ відм}}(t) dt, \quad (13)$$

де α_i^k – пріоритет i -го ТСП-сеансу; τ – інтервал оптимізації, сумірний з середньою тривалістю ТСП-сеансу; $\lambda_i^{k \text{ відм}}(t) = \lambda_i^{k \text{ вим}}(t) - \frac{1}{\tau} \cdot \int_0^{\tau} \lambda_i^k(t) dt$ – інтенсивність відмов в обслуговуванні i -му ТСП-сеансу, $\lambda_i^{k \text{ вим}}(t)$ – QoS-вимоги щодо інтенсивності i -го ТСП-сеансу; $A_k = [\alpha_1^k, \alpha_2^k, \dots, \alpha_i^k, \dots, \alpha_N^k]^T$ – вектор пріоритетів для ТСП-сеансів; $\Lambda_{k \text{ відм}} = [\lambda_1^{k \text{ відм}}, \lambda_2^{k \text{ відм}}, \dots, \lambda_i^{k \text{ відм}}, \dots, \lambda_N^{k \text{ відм}}]^T$ – вектор відмов.

Використання критерію (12) або (13) з урахуванням умов-обмежень (1)–(3) та (10), (11) гарантує мінімізацію сумарної зваженої щодо пріоритетів інтенсивності відмов в обслуговуванні на транспортному рівні ЕМВВС. Після перетворень вираз (12) був приведений до вигляду:

$$\max_{\lambda_i^k(t)} J = \max_{\lambda_i^k(t)} \int_0^{\tau} \left[\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^M \frac{\alpha_i^k}{\tau} \cdot \int_0^{\tau} \lambda_i^k(t) dt \right] dt. \quad (14)$$

Фізичний зміст функціонала (14) полягає в максимізації сумарної зваженої щодо пріоритетів інтенсивності ТСП-потоків на інтервалі τ .

Як показали результати досліджень, використання лінійних критеріїв (12)–(14) під час розв'язання оптимізаційної задачі щодо розрахунку $\lambda_i^{k \text{ відм}}(t)$ або $\lambda_i^k(t)$ в умовах дефіциту каналного ресурсу, призводило до першочергового обмеження низькопріоритетних сеансів (до повної відмови в обслуговуванні). Протягом досліджень встановлено, що для забезпечення більш справедливого обслуговування ТСП-сеансів, при якому в умовах перевантажень низькопріоритетному трафіку гарантується деяка частка пропускну здатності, пропонувалось використовувати квадратичний функціонал

$$J = \int_0^{\tau} \sum_{k=1}^K \Lambda_{k \text{ відм}}^T(t) H_k \Lambda_{k \text{ відм}}(t) dt, \quad (15)$$

де H_k – діагональна матриця, яка мала таку структуру

$$H = \begin{bmatrix} \alpha_1^k & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \alpha_2^k & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \alpha_N^k \end{bmatrix}, \quad (16)$$

координати якої визначали пріоритети, відповідно до яких здійснюється обслуговування та обмеження трафіків TCP-сеансів.

Отже, реалізація методу оптимізації TCP-сеансів передбачає таку послідовність дій:

1. Моніторинг та збір вихідних даних про стан TCP-сеансів, режими передачі в протоколі TCP, параметри AQM-алгоритмів (RED/WRED) на вузлах ТКМ.
 2. На основі аналізу зібраних вихідних даних про стан мережі встановлюється їх аналітичний взаємозв'язок шляхом аналізу математичної моделі (1)–(3).
 3. Формалізація умов забезпечення стійкості TCP-сеансів (10) та (11).
 4. Постановка оптимізаційної задачі (14)–(16), під час розв'язання якої забезпечується мінімізація відмов в обслуговуванні трафіків користувачів та злагоджено розраховуються основні параметри протоколу TCP і AQM-алгоритмів (RED/WRED).
 5. Параметри протоколу TCP і AQM-алгоритмів (RED/WRED) в автоматичному режимі підлягають коригуванню (настройці), забезпечуючи тим самим оптимізацію TCP-сеансів у цілому.
 6. Після закінчення інтервалу RTT здійснюється повторна постановка і розв'язання оптимізаційної задачі (14)–(16), тобто проводиться перехід до п.1.
- У деяких випадках періодичний характер розрахунків може бути переглянутий, наприклад, при «позаштатній» зміні стану ТКМ та її TCP-сеансів, викликаний зміною структури мережі, стрибкоподібною зміною інтенсивності трафіка, що надходить в мережу, або кількості TCP-сеансів.

У **четвертому розділі** сформалізовано показники ефективності функціонування мережі, проведено експериментальне дослідження розроблених моделі та методів з метою перевірки їх адекватності, оцінки ефективності отриманих на їх основі рішень та розробки рекомендацій щодо їх практичного використання. З метою перевірки адекватності та підтвердження ефективності пропонувані рішень було проведено їх порівняння з раніше відомими рішеннями, які отримали протокольну реалізацію. При цьому кількісний аналіз адекватності моделі і методів проводився шляхом порівняння результатів математичного моделювання (MathCad v.14, Matlab v.7.5.0) та лабораторного експерименту. Експеримент проводився на мережному обладнанні компанії Cisco Systems, основні характеристики TCP-сеансів та показники продуктивності відслідковувалися за допомогою пакета IxChariot.

Ефективність функціонування TCP-сеансів оцінювалась за кількістю відкинутих пакетів та за продуктивністю TCP-потoku, яка розраховувалась як сума інтенсивностей всіх TCP-сеансів за час моделювання. Розходження результатів математичного моделювання та лабораторного експерименту оцінювалась як:

$$X(t) = \frac{1}{T_m} \int_0^{T_m} \frac{|\lambda_m(t) - \lambda_e(t)|}{\lambda_e(t)} dt \cdot 100\%, \quad (17)$$

де $\lambda_m(t)$, $\lambda_e(t)$ – інтенсивності ТСП-потоків, отримані в результаті математичного моделювання та лабораторного експерименту відповідно.

Проведені дослідження в цілому підтвердили адекватність запропонованої моделі (1)–(3), оскільки числове значення обраного критерію адекватності (17) не перебільшувало 2–3% при передачі одного потоку (рис.2, а) та обмежувалось 10–12% при зростанні їх кількості (рис.2, б).

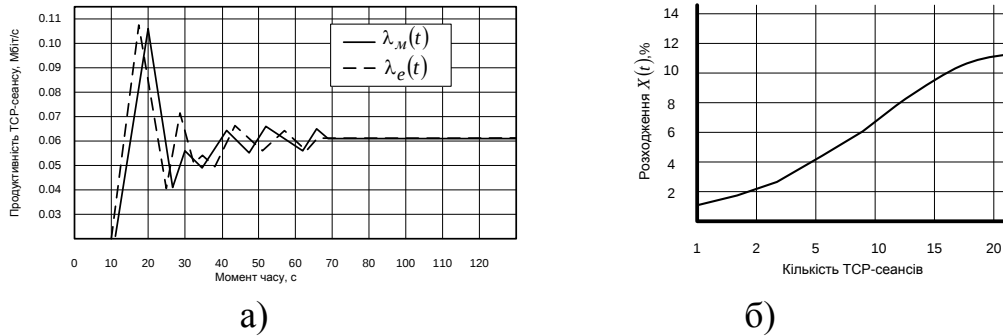


Рис. 2. Результати аналізу адекватності моделі

В роботі під час дослідження запропонованої моделі встановлено, що як тимчасова, так і постійна присутність UDP-потоків (рис. 3, а) призводить до зниження продуктивності ТСП-сеансів у середньому на 30–50% (рис. 3, б), що свідчить про необхідність використання для UDP та ТСП-потоків різних класів обслуговування.

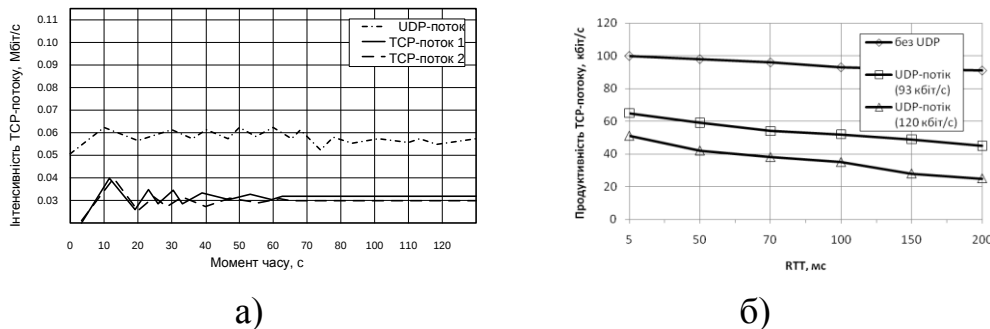


Рис. 3. Результати аналізу впливу UDP-потоків на продуктивність ТСП-сеансів

Під час порівняльного аналізу різних версій протоколу ТСП (рис. 4, а) в межах запропонованої моделі (1)–(3) підтверджено ефективність версії ТСП Reno, використання якої у порівнянні з версією ТСП Tahoe дозволяє підвищити продуктивність сеансів у середньому на 3–5% (рис. 4, б).

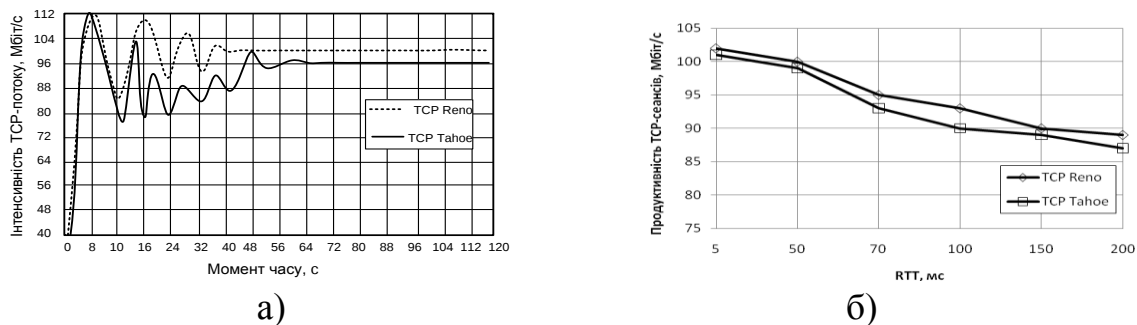


Рис. 4. Результати порівняльного аналізу різних версій TCP Tahoe і TCP Reno

Серед досліджених у межах запропонованої моделі (1)–(3) AQM-алгоритмів найбільшу ефективність показав алгоритм HRED (Hazard rate Estimated packet dropping function in RED), використання якого у порівнянні з алгоритмом RED дає вииграш за продуктивністю TCP-сеансів у середньому на 4–8 % залежно від інтервалу часу RTT (рис. 5, а), а також зменшує кількість відкинутих пакетів у середньому на 13–15 % в залежності від завантаженості черги на маршрутизаторі (рис. 5, б).

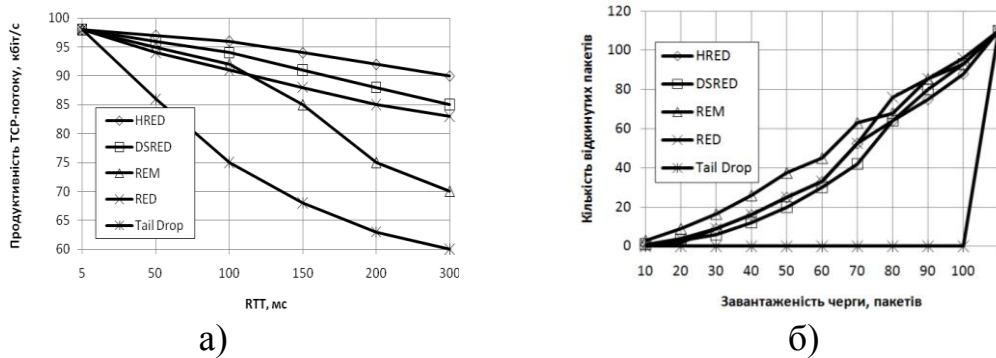


Рис. 5. Результати порівняльного аналізу AQM-алгоритмів

Під час порівняльного аналізу різних моделей блокування пакетів у межах AQM-алгоритмів (рис.6, а) підтверджено ефективність експоненціальної моделі

$$P^k(t) = \frac{1}{1 + \exp(-d \cdot N^k(t) + k)}, \quad (18)$$

де d , k – деякі параметри, які настраюються адміністративно.

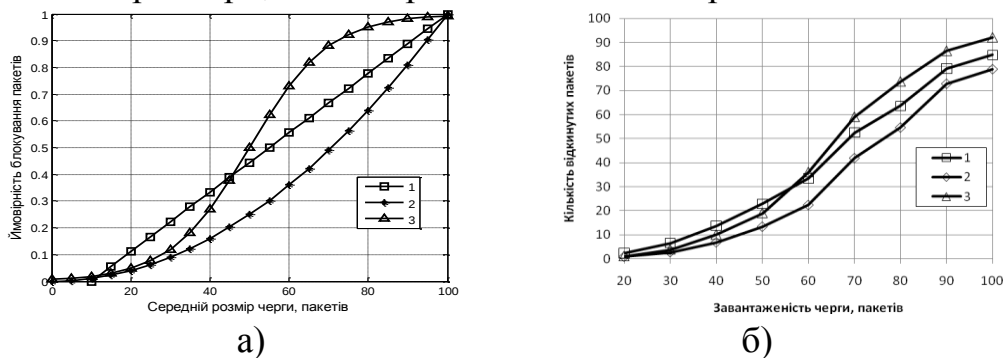


Рис. 6. Результати порівняльного аналізу різних моделей блокування пакетів у межах AQM-алгоритмів: 1 – лінійна; 2 – квадратична; 3 – експоненціальна

Результати аналізу (рис. 6, б) показали, що використання експоненціальної моделі (18) у порівнянні з лінійною дозволяє зменшити кількість відкинутих пакетів в області низької завантаженості буферів маршрутизаторів залежно від величини флуктуацій трафіка в середньому від 17–20% до 35–40%, а в області високої завантаженості – забезпечує більш оперативне реагування на перевантаження в порівнянні як з лінійною, так і з квадратичною моделями.

В результаті дослідження запропонованого методу оптимізації TCP-сеансів здійснено порівняння його ефективності з версією TCP Reno за показником продуктивності (рис. 7).

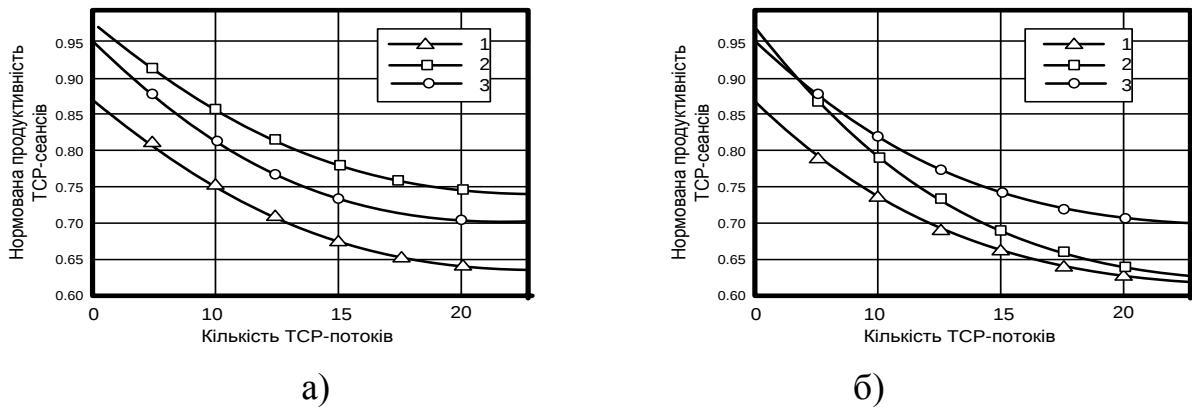


Рис. 7. Результати порівняльного аналізу продуктивності ТСП-сеансів у залежності від кількості ТСП-потоків: 1 – ТСП Reno; 2 – запропонований метод без урахування умов забезпечення стійкості; 3 – запропонований метод

Реалізація запропонованого методу в умовах відсутності флуктуацій трафіка призвела до підвищення продуктивності ТСП-сеансів у порівнянні з версією ТСП Reno в середньому на 7–9 % (рис. 7, а). З іншого боку, при ігноруванні в методі умов забезпечення стійкості (10), (11) приріст продуктивності складав до 12–17%. Однак у випадку флуктуацій трафіка, що більше відповідає реальним умовам, нехтування обмеженнями (10), (11) зводило отриманий виграв у продуктивності до мінімуму (3–5%), а їх урахування дозволило мінімізувати негативний вплив флуктуацій трафіка та, в результаті, підвищити продуктивність ТСП-сеансів у порівнянні з версією ТСП Reno на 13–15% (рис. 7, б).

На основі результатів дослідження запропонованих моделі ТСП-сеансів, методів аналізу їх стійкості та оптимізації у роботі наведено рекомендації щодо особливостей практичної реалізації результатів дисертації в сучасних та перспективних мультисервісних ТКС. Це, перш за все, стосувалось обґрунтування вибору як коефіцієнтів експоненціальної моделі блокування пакетів (18) в межах AQM-алгоритмів, так і режимів та параметрів протоколу ТСП у цілому.

ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальну наукову задачу, яка полягає в удосконаленні засобів управління передачею даних на транспортному рівні еталонної моделі взаємодії відкритих систем шляхом розробки математичної моделі ТСП-сеансів та методів аналізу їх стійкості та оптимізації, що дало можливість підвищити продуктивність мультисервісних телекомунікаційних мереж. За результатами розв'язання поставленої наукової задачі зроблено такі висновки:

1. Аналіз стану та перспектив розвитку сучасних ТКМ показав, що ключовими моментами при побудові мереж NGN є їх здатність обслуговувати різномірний за типом і вимогами трафік, гарантуючи відповідність наданого рівня якості обслуговування запитуваному користувачами. У зв'язку з цим важливими є задачі, які розв'язуються у межах протоколу ТСП. Однак більшість засобів управління трафіком, серед яких ТСП/AQM-алгоритми, не відповідають вимогам щодо забезпечення QoS і самі нерідко стають факторами втрати стійкості ТКМ. Встановлено, що це обумовлюється недоліками математичних моделей та евристичних схем, які покладено в основу ТСП/AQM-алгоритмів.

2. З метою задоволення перерахованих вимог удосконалено математичну модель ТСП-сеансів, яка заснована на апараті диференціальних рівнянь і теорії масового обслуговування та подана у просторі станів. До характерних властивостей запропонованої моделі, по-перше, відноситься врахування динамічності процесів інформаційного обміну, а також зміни режимів передачі даних протоколу ТСП. Також важливим є можливість опису цих режимів відповідно до існуючих та перспективних версій протоколу ТСП. По-друге, відмінною рисою моделі є врахування особливостей передачі одночасно декількох ТСП-потоків різних класів обслуговування, що властиво для реальних мультисервісних ТКМ. По-третє, у межах єдиної моделі (1)–(3) формалізовані як процеси передачі даних відповідно до протоколу ТСП, так і процеси боротьби з перевантаженнями (AQM), що дозволяє кінцевим пристроям оперативно реагувати на ймовірні перевантаження в мережі і, відповідно, уникнути необґрунтованих втрат пакетів. По-четверте, перевагою запропонованої моделі ТСП-сеансів є можливість вибору типу AQM-алгоритму за рахунок використання різних моделей блокування (відкидання) пакетів. По-п'яте, запропонована модель (1)–(3) в подальшому може бути використана для аналізу стійкості ТСП-сеансів й оптимізації вибору параметрів ТСП/AQM-алгоритмів. Причому важливість вирішення завдання забезпечення стійкості продиктована необхідністю врахування коливань параметрів мережі (параметрів ТСП/AQM-алгоритмів, структури мережі, флуктуацій трафіка), особливо в умовах, близьких до перевантажень.

3. Запропоновано метод аналізу стійкості ТСП-сеансів у межах динамічної моделі (1)–(3), заснований на теорії біфуркацій. На відміну від класичних методів математичного аналізу, які дозволяють досліджувати плавні безперервні процеси, теорія біфуркацій є універсальним інструментарієм дослідження стрибкоподібних переходів, розривів, раптових якісних змін. Використання даної теорії при математичному описі ТКМ відкриває широкі можливості щодо забезпечення її структурної та функціональної стійкості по відношенню до різких непередбачених змін її структури (наприклад, при виході з ладу мережного елемента або цілої ділянки мережі), а також умов функціонування (наприклад, при стрибкоподібному збільшенні інтенсивності трафіка, що надходить у мережу або зміні пропускної здатності каналів зв'язку). Метод ґрунтується на визначенні стаціонарних станів системи (1) та подальшому аналізі поведінки ТСП-сеансів в околі цих станів (рішень), серед яких найбільш важливими є стійкий вузол та стійкий фокус. Застосування запропонованого методу дозволило отримати в аналітичному вигляді умови стійкості ТСП-сеансів по відношенню до незначних коливань TCP/RED-параметрів.

4. Запропоновано метод оптимізації ТСП-сеансів, у межах якого забезпечується розрахунок основних параметрів протоколу TCP і AQM-алгоритмів (RED/WRED), що дозволило з урахуванням умов стійкості (10) та (11) мінімізувати сумарну зважену відносно пріоритетів інтенсивність відмов в обслуговуванні різних типів трафіка (максимізувати сумарну зважену відносно пріоритетів інтенсивність ТСП-потоків). Використання методу передбачає моніторинг та збір вихідних даних про стан ТСП-сеансів; встановлення аналітичних залежностей між параметрами TCP та RED з використанням математичної моделі (1)–(3); формалізацію умов забезпечення стійкості ТСП-сеансів (10) та (11); постановку та

розв'язання оптимізаційної задачі (14)–(16); розрахунок параметрів протоколу TCP і AQM-алгоритмів (RED/WRED) та їх наступне автоматичне коригування.

5. Під час проведення дослідження адекватності запропонованої моделі (1)–(3) величина розходження результатів математичного моделювання та лабораторного експерименту не перебільшувала 2–3% при передачі одного потоку та обмежувалась 10–12% при зростанні їх кількості, що в цілому підтвердило відповідність моделі реальному процесу передачі даних у TCP-сеансі. Крім того, про адекватність запропонованої моделі свідчило те, що результати проведеного за її допомогою порівняльного аналізу різних версій TCP та типів AQM-алгоритмів у цілому підтверджували раніше відомі результати порівняння.

6. Результати досліджень запропонованих методів, які проводилися з використанням методів математичного моделювання, підтвердили їх ефективність за показником продуктивності TCP-сеансів. Дослідження проводилися для випадків відсутності та наявності флуктуацій трафіка, що виступало основним фактором втрати стійкості TCP-сеансів. Результати використання методу оптимізації при відсутності флуктуацій трафіка показали підвищення продуктивності у порівнянні з версією TCP Reno в середньому на 7–9 %. Без урахування умов забезпечення стійкості (10), (11) приріст продуктивності склав до 12–17%. У випадку наявності флуктуацій трафіка при нехтуванні умовами забезпечення стійкості (10), (11) виграш складав всього 3–5%, в той час як їх урахування дало можливість підвищити продуктивність TCP-сеансів у порівнянні з версією TCP Reno на 13–15%.

7. На основі результатів експериментальної перевірки запропонованих моделі TCP-сеансів і методів аналізу їх стійкості і оптимізації розроблено рекомендації щодо практичної реалізації результатів дисертаційної роботи. Практичне значення дисертаційної роботи полягає в тому, що запропоновані в ній математичні модель і методи можуть бути використані при вирішенні завдань аналізу (порівняння різних версій протоколу TCP, дослідження впливу параметрів TCP й AQM-алгоритмів на функціонування TCP-сеансів) і синтезу (обґрунтування та вибір параметрів і режимів TCP/AQM, розробка нових версій TCP та інших протоколів транспортного рівня як засобів боротьби з перевантаженнями).

8. Результати дисертаційної роботи використано під час виконання науково-дослідної роботи № 235-1 «Методи проектування телекомунікаційних мереж NGN та управління їх ресурсами» та в навчальному процесі кафедри ТКС ХНУРЕ. Використання результатів дисертаційної роботи підтверджено актами впровадження.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Симоненко Д.В. Результаты количественного анализа динамической модели маршрутизации с различными целевыми функционалами / Д.В. Симоненко, М.А. Гоголева, Е.В. Старкова // Радиотехника. – 2007. – № 148. – С. 81–86.

2. Лемешко О.В. Управління телекомунікаційною системою, що самоорганізується, в умовах невизначеності її стаціонарного стану / О.В. Лемешко, О.Ю. Євсєєва, О.В. Старкова // Моделювання та інформаційні технології: Збірник наукових праць – 2007. – № 42. – С. 142-150.

3. Старкова Е.В. Анализ устойчивости функционирования механизмов борьбы с перегрузками телекоммуникационной сети / Е.В. Старкова // Радиотехника. – 2007. – № 151. – С. 78–84.
4. Старкова О.В. Методика аналізу стійкості механізму RED при лінійній моделі блокування пакетів / О.В. Старкова // Наукові записки УНДІЗ. – 2008. – №4(6) – С. 7–10.
5. Евсеева О.Ю. Метод координации управления сетевыми ресурсами, основанный на анализе устойчивости иерархических телекоммуникационных систем / О.Ю. Евсеева, Д.В. Симоненко, Е.В. Старкова // Вісник ДУІКТ. – 2008. – Том 6(2). – С. 170–177.
6. Лемешко А.В. Анализ устойчивости прогнозирования развития транспортной системы глобальной информационной инфраструктуры / А.В. Лемешко, Е.В. Старкова // Радиотехника. – 2008. – № 155. – С. 72–76.
7. Старкова Е.В. Динамическая модель TCP-сеанса при управлении длинной очереди с использованием механизма RED / Е.В. Старкова // Радиотехника. – 2009. – № 159. – С. 54–59.
8. Лемешко А.В. Метод оптимизации процесса передачи данных в рамках TCP-сеансов / А.В. Лемешко, Е.В. Старкова // Системи обробки інформації. – 2010. – Випуск 2(83). – С. 116–119.
9. Старкова Е.В. Анализ устойчивости телекоммуникационных систем методами теории катастроф / Е.В. Старкова, А.В. Лемешко // Международная студенческая научно-техническая конференция «Информатика и компьютерные технологии», 13 декабря 2006 г.: тезисы докл. – Донецк: ДонНТУ, 2006. – С. 268–269.
10. Евсеева О.Ю. Модель реструктуризации телекоммуникационной сети в условиях неопределенности ее состояния / О.Ю. Евсеева, Е.В. Старкова, А.Г. Беленков // 11-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке», 10-12 квітня 2007 р.: Сб. материалов форума. – Харьков: ХНУРЭ, 2007. – С.102.
11. Старкова Е.В. Математическая модель управления сетевыми ресурсами в условиях неопределенности стационарного состояния телекоммуникационных систем / Е.В. Старкова, А.Г. Беленков, Д.В. Симоненко // 12-я всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании НИТ-2007», 19-21 апреля 2007 г.: тезисы докл. – Рязань: РГРТУ, 2007. – С. 149–151.
12. Лемешко О.В. Динамічна модель управління мережними ресурсами при невизначеності стаціонарного стану телекомунікаційних систем / О.В. Лемешко, О.Ю. Євсєєва, О.В. Старкова // 3-я Международная молодежная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и ученых «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2007», 16-21 апреля 2007 г.: тезисы докл. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2007. – С. 35.
13. Симоненко Д.В. Решение задач маршрутизации с использованием аппарата теории игр. / Д.В. Симоненко, Е.В. Старкова // Науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій», 25-27 квітня 2007: Збірник тез. – Київ: НТУУ «КПІ». 2007 – С.207–208.

14. Симоненко Д.В. Игровая постановка задачи иерархическо-координационной маршрутизации в ТКС / Д.В. Симоненко, М.А. Гоголева, Е.В. Старкова // Міжнародна науково-практична конференція «Обработка сигналов и негауссовских процессов» пам'яті професора Кунченка Ю.П., 21-26 травня 2007 р.: Тези доповідей. – Черкаси: ЧДТУ, 2007. – С.158–160.

15. Старкова Е.В. Модель адаптивного управления сетевыми ресурсами в телекоммуникационных системах / Е.В. Старкова // 2-а Міжнародна наукова конференція «Сучасні інформаційні системи. Проблеми та тенденції розвитку», 2-5 жовтня 2007 р.: Зб. матеріалів конференції. – Харків: ХНУРЕ, 2007. – 123–124.

16. Евсеева О.Ю. Обеспечение устойчивости телекоммуникационных систем в рамках теории катастроф / О.Ю. Евсеева, Д.В. Симоненко, Е.В. Старкова // Перспективные технологии в средствах передачи информации, 10-12 жовтня 2007 г.: Материалы 7-й Международной научно-технической конференции. – Владимир: Владим. гос. университет, 2007. – С. 64–67.

17. Старкова О.В. Аналіз біфуркаційних властивостей механізму RED / Старкова О.В. // Сучасні телекомунікаційні та інформаційні технології, 12-14 грудня 2007 р.: Матеріали 2-го науково-практичного семінару молодих науковців та студентства. – Київ, УНДІЗ, 2007. – С. 37–41.

18. Lemeshko O.V. Analysis of Bifurcational Properties of the Mechanism RED / Lemeshko O.V., Starkova O.V., Merkulov // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science, feb. 23, 2008: Proceedings of the international Conference TCSET'2008. – Lviv-Slavsko: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2008 – 513–514.

19. Старкова Е.В. Методика анализа бифуркационных свойств TCP-сеанса / Е.В. Старкова, М.В. Меркулов // 14-я Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», 28-29 февраля 2008 г.: Тез. докл. В 3-х т. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. Т. 1. – С. 142–143.

20. Старкова Е.В. Метод бифуркационного анализа механизма RED / Е.В. Старкова // 12-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке», 1-3 апреля 2008 г.: Сб. материалов форума. – Харьков: ХНУРЭ, 2008. – С.115.

21. Евсеева О.Ю. Координація управління мережними ресурсами на основі аналізу стійкості ієрархічних телекомунікаційних систем / О.Ю. Евсеева, О.В. Старкова, Д.В. Симоненко // Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ-2008», 21-25 квітня 2008 р.: Матеріали 4-ї Міжнар. молодіжної наук.-техн. конф. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2008. – С. 46.

22. Старкова Е.В. Анализ устойчивости TCP-сеанса при различных моделях блокировки пакетов / Е.В. Старкова, О.Н. Пастушенко // 2-га Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій», 20-23 травня 2008 р.: Збірник тез. – Київ: НТУУ «КПІ», 2008. – С. 353–354.

23. Старкова О.В. Дослідження стійкості функціонування механізму RED при лінійній моделі блокування пакетів / О.В. Старкова // Науково-практичний семінар молодих науковців та студентів «Питання розвитку телекомунікаційних мереж», листопад-грудень 2008 р.: тези доп. – Київ, УНДІЗ, 2008. – С. 8–10.

24. Старкова Е.В. Методика бифуркационного анализа механизма RED при квадратичной модели блокировки пакетов / Е.В. Старкова // 3-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ-2008, 22-24 октября 2008 г.: Сборник научных трудов. Том II. Международная конференция «Телекоммуникационные системы и технологии». – Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ, 2008. – С. 97–100.

25. Старкова Е.В. Анализ устойчивости процессов отбрасывания пакетов в рамках нелинейных моделей / Е.В. Старкова // 13-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке», 30 марта – 1 апреля 2009 г.: Сб. материалов форума. Ч.1. – Харьков: ХНУРЭ, 2009. – С.157.

26. Старкова Е.В. Анализ устойчивости TCP-сеанса в рамках нелинейных моделей / М.В. Меркулов // Перспективные технологии в средствах передачи информации, 21-22 мая 2009 г.: Материалы 8-й Международной научно-технической конференции / Владим. гос. ун-т; редкол.: А.Г. Самойлов (и др.). – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2009. – С. 145–149.

27. Старкова Е.В. Математическая модель информационного обмена с использованием протокола TCP и механизма RED / Е.В. Старкова, К.В. Коробко, А.С. Билык // Науково-технічний симпозиум «Нові технології в телекомунікаціях», 2-5 лютого 2010 р.: Збірник тез. – К.: ДУІКТ, 2010. – С. 30–32.

28. Starkova O.V. A dynamic model of a TCP-session at the management by a length of queue with the use of RED mechanism / O.V. Starkova // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science, feb. 23-27, 2010: Proceedings of the Xth International Conference TCSET'2010. – Lviv-Slavsko: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2010 – P. 224.

29. Старкова Е.В.. Математическая модель TCP-сеанса с использованием механизма RED / Е.В. Старкова, С.А. Щербинин // 14-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке», 18-20 марта 2010 г.: Сб. материалов форума. Ч.1. – Харьков: ХНУРЭ, 2010. – С.174.

30. Пат. 49641 Україна, МПК (2009) G06G 3/00. Спосіб керування чергами для забезпечення стійкості TCP-сеансу в умовах лінійної моделі блокування пакетів / Лемешко А.В., Старкова О.В., Євсєєва О.Ю.; власник Харківський національний університет радіоелектроніки. – № u 2009 09992; заявл. 01.10.2009; опубл. 11.05.2010, Бюл. № 9.