УДК 621.391 **doi: 10.26906/SUNZ.2019.4.057**

Т. М. Лебеденко[1], М. В. Головешко[2], А. В. Холодкова[1]

[1] Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна
[2] Харківський національний університет повітряних сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ АКТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ЧЕРГАМИ НА ІНТЕРФЕЙСАХ МАРШРУТИЗАТОРІВ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

У роботі представлено результати дослідження методу активного управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів телекомунікаційних мереж. Основу запропонованого методу складають оптимізаційні моделі погодженого розв'язання задач агрегації та розподілу потоків пакетів за сформованими на інтерфейсі маршрутизатора чергами (управління перевантаженням); розподілу пропускної здатності інтерфейсу маршрутизатора між сформованими чергами (розподіл канального ресурсу); та забезпечення завчасного обмеження інтенсивності потоків пакетів, що надходять на вхід інтерфейсу маршрутизатора (активне управління чергами). Проаналізовано вплив класів потоків та черг, виду критеріїв оптимальності та множника балансування на характер отриманих рішень та ефективність роботи інтерфейсу.

Ключові слова: активне управління чергами, управління перевантаженням, розподіл ресурсу, запобігання перевантаження, якість обслуговування.

Вступ

Як показав проведений аналіз [1–8], підвищити числові значення таких показників якості обслуговування (Quality of Service, QoS), як середня затримка, джиттер та ймовірність втрат пакетів можливо за рахунок використання механізмів управління чергами пакетів (Queue Management), які організуються на інтерфейсах маршрутизаторів телекомунікаційних мереж (ТКМ). До подібних механізмів відносяться:

- механізми управління перевантаженнями (Congestion Management), які відповідають за створення черг, розподіл пакетів між чергами на основі їх класів, а також планування порядку обслуговування пакетів в цих чергах;
- механізми розподілу ресурсу (Resource Allocation), які відповідають за розподіл пропускної здатності інтерфейсу між сформованими на ньому чергами;
- механізми активного управління чергами (Active Queue Management, AQM), які також іноді іменують механізмами запобігання перевантажень (Congestion Avoidance**)**. Ці механізми відповідають за відстеження завантаженості черг і запобігання їх можливого переповнення на підставі превентивного обмеження інтенсивності потоків пакетів.

Аналіз відомих математичних моделей та методів управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів ТКМ [9-18] виявив ряд системних принципів, які необхідні для їх ефективного впровадження та реалізації:

- забезпечення диференціації в обслуговуванні потоків пакетів різних класів відповідно до рівня QoS-вимог;
- адаптивність та масштабованість, тобто можливість моделей та методів автоматично змінювати свої характеристики в залежності від зміни характеристик трафіка та інтерфейсу;
- надійність, тобто здатність моделей та методів продовжувати функціонувати у разі можливого перевантаження або навіть часткової відмови обладнання;
- підтримка динамічної стратегії управління чергами, тобто здатність моделей та методів знаходити ефективне рішення в масштабі реального часу;
- простота та невисока обчислювальна складність алгоритмічно-програмної та апаратної реалізації на практиці.

Реалізація вищеперерахованих принципів в рамках одного з механізмів Queue Management досі не впроваджено на практиці. Ось чому актуальною представляється науково-прикладна задача розробки математичних моделей та методів, які пов'язані з оптимізацією механізмів управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів ТКМ за рахунок забезпечення комплексного вирішення задач активного управління чергами, розподілу ресурсів та управління перевантаженням [9-16].

Основна частина

Математичні моделі та метод активного управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів телекомунікаційних мереж. Аналіз відомих рішень щодо механізмів Queue Management, представлених в роботах [9-11, 13, 15], продемонстрував, що результати вирішення задач активного управління чергами ніяк не пов'язані з результатами вирішення задач розподілу ресурсу та/або управління перевантаженнями. Отже, сумісне чи розподілене вирішення перерахованих задач буде призводити до одного й того самого результату. В роботах [13, 15], для зниження розміру оптимізаційних задач запропоновано двоетапний метод розрахунків, де перший етап відповідає за вирішення задачі Congestion Management, тоді як другий – за сумісне вирішення задач AQM та Resource Allocation. Тоді, спираючись на отримані в роботах [9-15] результати, нехай на першому етапі розрахунків, на вхід інтерфейсу маршрутизатора надходять N потоків пакетів з такими відомими характеристиками $(i = \overline{1, N})$: a_i – величина середньої інтенсивності i-го потоку пакетів, яка вимірюється в пакетах за секунду (1/с); k_i^f – значення класу i-го потоку пакетів, яке чим вище, тим з вищим рівнем

© Лебеденко Т. М., Головешко М. В., Холодкова А. В., 2019

QoS він повинен обслуговуватися на інтерфейсі маршрутизатора ТКМ; c – сумарна інтенсивність потоків у черзі (1/с). Нехай значення класу k_i^f кількісно виражається дійсним числом, що змінюється від 1 до K і має місце умова $1 \le k_i^f \le K$, де K – максимальне значення класу потоків пакетів. Диференціація потоків пакетів з різними значеннями k_i^f можлива, наприклад, відповідно до таких ознак:

- зміст полів IP-пакета: IP-Precedence або DSCP;
- значення QoS-Group;
- адреса джерела IP-пакета;
- адреса одержувача IP-пакета;
- MAC-адреси джерела та (або) одержувача пакетів;
- стандартний або розширений список доступу до джерел та (або) одержувачів;
- TCP/UDP-порти джерела та (або) одержувача пакетів;
- код довжини пакета.

В рамках задачі Congestion Management пакети всіх N потоків, які надійшли на обслуговування на вхід інтерфейса маршрутизатора ТКМ, повинні розподілятися між створеними на ньому M чергами шляхом розрахунку множини змінних першого типу $x_{i,j}$ $(i = \overline{1,N},\ j = \overline{1,M})$, кожна з яких характеризує частку i-го потоку пакетів, спрямованого на обслуговування в j-ту чергу [9,13,15]. Під величиною M будемо мати на увазі максимально можливу кількість черг, яку можна організувати на інтерфейсі маршрутизатора згідно до існуючих механізмів управління перевантаження [1-8].

Вважатимемо, що за аналогією з класифікацією потоків пакетів k_i^f також встановлено класифікацію самих черг – k_j^q $(j = \overline{1,M})$, де значення класу кожної j-ї черги відповідає умові $1 \le k_j^q \le K$. Критерієм направлення диференційованого потоку пакетів в ту чи іншу чергу буде максимальне співпадіння значень класів k_i^f та k_j^q [13]. Агрегація потоків пакетів за відповідними чергами буде актуальною лише у разі виконання умови $N > M$, тобто, коли кількість підтримуваних на інтерфейсі маршрутизатора черг є меншою за кількість потоків пакетів, що надійшли на його вхід.

Задля забезпечення виконання умов щодо диференціації обслуговування потоків пакетів з різними QoS-вимогами, запропоновано здійснювати обробку потоків пакетів з близькими значеннями класів k_i^f в рамках однієї з сформованих на інтерфейсі маршрутизатора черг, а керуючі змінні першого типу $x_{i,j}$ визначити як булеві:

$$x_{i,j} = \{0,1\}. \tag{1}$$

Тоді, в рамках першого етапу розрахунків, множину керуючих змінних $x_{i,j}$ визначимо у ході розв'язання оптимізаційної задачі управління перевантаженнями:

$$\min_x F, \tag{2}$$

де цільова функція F представлена формою вигляду:

$$F = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} h_{i,j}^x x_{i,j}, \tag{3}$$

$h_{i,j}^x$ – метрика обслуговування пакетів i-го потоку j-ю чергою:

$$h_{i,j}^x = (k_i^f - k_j^q)^2 + 1, \quad (i = \overline{1,N},\ j = \overline{1,M}). \tag{4}$$

Метрика $h_{i,j}^x$ є додатною величиною, значення якої (4) безпосередньо залежать від квадрата розбіжності між класами потоків k_i^f і черг k_j^q [9, 13, 15]. У випадку, коли значення класів однакові $(k_i^f = k_j^q)$, метрика обслуговування буде мінімальною та дорівнюватиме одиниці $(h_{i,j}^x = 1)$. Таким чином, максимальна близькість значень k_i^f та k_j^q гарантуватиме направлення пакетів i-го потоку на обслуговування саме до j-ї черги.

Другий етап розрахунків представляє собою комплексне вирішення задач активного управління чергами та розподілу ресурсів [13, 15]. Перехід до другого етапу відбувається після вирішення оптимізаційної задачі булевого програмування з критерієм (2)-(3), метрикою (4) та обмеженням (1), коли результат розрахунку множини керуючих змінних $x_{i,j}$ є вже відомим. Тоді, для вирішення задачі Resource Allocation введемо множину керуючих змінних другого типу b_j $(j = \overline{1,M})$, кожна з яких визначає об'єм пропускної здатності інтерфейсу, виділений для обслуговування j-ї черги. Для забезпечення коректності розподілу загальної пропускної здатності інтерфейсу b між конкретними чергами, на змінні b_j мають накладатися умови вигляду:

$$0 \le b_j, \quad \sum_{j=1}^{M} b_j \le b, \quad (j = \overline{1,M}). \tag{5}$$

Для можливості реалізації превентивного (завчасного) обмеження інтенсивності потоків, що надходять на вхід інтерфейсу маршрутизатора телекомунікаційної мережі також необхідно ввести множину керуючих змінних третього типу y_i $(i = \overline{1,N})$, які за своїм фізичним змістом характеризують частку i-го потоку пакетів, що отримала відмову в обслуговуванні на інтерфейсі маршрутизатора в ході вирішення задачі AQM [1, 9-23]. Чисельно змінні y_i будуть визначати ймовірність відкидання пакетів i-го потоку з сформованої на інтерфейсі маршрутизатора черги та підпорядковуватимуться умові вигляду:

$$0 \le y_i \le 1, \quad (i = \overline{1,N}). \tag{6}$$

Задля забезпечення керованості процесом активного управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів ТКМ необхідно задовольнити нелінійне обмеження, яке гарантуватиме, що сумарна інтенсивність потоків, спрямованих на обслуговування в *j*-ту чергу, ні в якому разі не перевищить пропускну здатність інтерфейсу, що виділена даній черзі:

$$\sum_{i=1}^{N} a_i x_{i,j}(1-y_i) \le b_j, \quad (j=\overline{1,M}). \tag{7}$$

Умова (7) відображає функціональну взаємодію між собою керуючих змінних усіх трьох типів, пов'язуючи оптимізаційні задачі першого та другого етапів розрахунків. Задоволення (7) гарантує, що сумарна інтенсивність вже відомих, агрегованих згідно метрики (4), потоків пакетів не спричинить перевантаження сформованих на інтерфейсі маршрутизатора ТКМ черг завдяки реалізації функцій Active Queue Management та Resource Allocation.

Спираючись на сформульовані умови та обмеження (5) - (7), розрахунок шуканих змінних b_j та y_i, що умовно відносяться до другого етапу розрахунків, доцільно здійснити в ході вирішення наступної оптимізаційної задачі:

$$\min_{b,y} P, \tag{8}$$

$$P = \sum_{j=1}^{M} h_j^b b_j + \sum_{i=1}^{N} h_i^y a_i y_i, \tag{9}$$

де h_j^b – метрика, яка характеризує умовну вартість виділення одиниці пропускної здатності інтерфейсу маршрутизатора j-й черзі; h_i^y – метрика, яка визначає умовну вартість відмов в обслуговуванні пакетам i-го потоку.

Використання критерію оптимальності (8), (9) пов'язано як з мінімізацією використання пропускної здатності інтерфейсу маршрутизатора за рахунок її оптимального розподілу, так і з мінімізацією можливих відмов в обслуговуванні, викликаних превентивним обмеженням інтенсивності потоків пакетів.

Метрики h_j^b та h_i^y, аналогічно метриці (4), залежать від значень класів потоків k_i^f та черг k_j^q. Причому, чим більше клас черги k_j^q, тим нище значення h_j^b і тим більше пропускної здатності інтерфейсу буде виділено для обслуговування j-й черзі. Збільшення класу потоку k_i^f призводить до зростання значення метрики h_i^y. Тобто, чим вище значення класу потоку, тим «дорожчими» будуть відмови в обслуговуванні відповідних пакетів.

Виконання умов (5) - (7) в ході вирішення оптимізаційної задачі (8), (9) дозволяє здійснити оптимальний розподіл пропускної здатності інтерфейсу маршрутизатора ТКМ між сформованими чергами та забезпечити диференційоване обмеження інтенсивності потоків пакетів за аналогією з механізмом запобігання перевантаження WRED.

Проте, використання лінійної цільової функції (9), як показано в [13], орієнтує на те, що відмови в обслуговуванні починаються з низькокласових потоків. При цьому у випадку перевантаження інтерфейсу пакети потоку з вищим класом обслуговування почнуть відкидатись лише після повного блокуваня потоків з меншим значенням класу. Так, до тих пір, доки можна відмовити потоку з низьким значенням класу, потік з високим класом обмежуватися в обслуговуванні не буде. Тобто реалізується обслуговування на основі так званих абсолютних пріоритетів.

У статті пропонується до використання лінійно-квадратичний вид цільової функції в критерії (8). Тобто замість лінійної скалярної форми (9) рекомендується обрати векторно-матричний вираз виду:

$$P = \vec{b}^t H_b \vec{b} + \vec{y}^t H_y \vec{y} + \vec{h}_b^t \vec{b} + \vec{h}_y^t \vec{y}, \tag{10}$$

де $\vec{b}$ та $\vec{y}$ – вектори, координатами яких є шукані керуючі змінні b_j та y_i відповідно; $\vec{h}_b$ та $\vec{h}_y$ – вектори, координатами яких є коефіцієнти h_j^b та $a_i h_i^y$ відповідно; H_b та H_y – діагональні матриці, які мають такий вигляд:

$$H_b = \begin{Vmatrix} wh_1^b & 0 & \dots & 0 \\ 0 & wh_2^b & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & wh_M^b \end{Vmatrix}, \tag{11}$$

$$H_y = \begin{Vmatrix} wa_1 h_1^y & 0 & \dots & 0 \\ 0 & wa_2 h_2^y & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & wa_N h_N^y \end{Vmatrix}, \tag{12}$$

в яких w – множник балансування, що встановлює співвідношення вагових коефіцієнтів діагональних матриць H_b, H_y та векторів $\vec{h}_b$ та $\vec{h}_y$. За допомогою цього множника можна регулювати вплив на критерій оптимальності (10), його квадратичного або лінійного членів. Як буде показано нижче, саме задаючи значення множника балансування *w*, можливо регулювати процес активного управління чергами, в тому числі з точки зору визначення політики диференційованих відмов в обслуговуванні пакетів.

Отже, основою двоетапного методу активного управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів ТКМ є послідовне та узгоджене вирішення наступних інтерфейсних задач:

- оптимізаційної задачі управління перевантаженнями (2) з критерієм оптимальності (3) та обмеженням (1), метою якої є оптимальний розподіл та агрегація потоків пакетів між сформованими на інтерфейсі маршрутизатора чергами на основі сумірності значень класів потоків та черг, представлених метрикою (4);

- оптимізаційної задачі розподілу ресурсів та активного управління чергами, представленої критерієм (8), (10) та обмеженнями (5), (6).

Представлення методу активного управління чергами у вигляді рішення двох задач лінійної оптимізації характеризується припустимою обчислювальною складністю отримання кінцевих рішень.

Дослідження методу активного управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів телекомунікаційних мереж. Дослідження методу активного управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів ТКМ ґрунтувалося на результатах аналітичних розрахунків, які були отримані в ході використання пакету Optimization Toolbox середовища Matlab при вирішенні оптимізаційних задач Congestion Management, Resource Allocation та Active Queue Management [23-25].

Нехай, в табл. 1 представлені вихідні дані та результати для розрахункового прикладу при використанні лінійної (9) та лінійно-квадратичної (10) цільової функції в критерії оптимальності (8). В рамках даного прикладу, трафік, що надходив на інтерфейс маршрутизатора складався з дванадцяти потоків (N=12). Значення класів та інтенсивностей потоків k_i^f задавались випадковим чином. Диференціація потоків здійснювалася на основі змісту полів IP-пакета: IP-Precedence, з максимальним значенням класів потоків (K=8). Обслуговування потоків здійснювалося в рамках чотирьох черг (M=4). Припустимо також, що інтерфейс маршрутизатора зазнавав перевантаження. Причому, сумарна інтенсивність потоків в чергах дорівнювала 113,9935 1/с, тоді як пропускна здатність інтерфейсу складала b=100 1/с.

За результатами аналітичних розрахунків, представлених в табл. 1, вдалося підтвердити коректність вирішення поставленої оптимізаційної задачі першого етапу розрахунків (2) - (3) щодо агрегації потоків пакетів та їх подальшого розподілу по відповідним чергам на основі близькості значень класів k_i^f та k_j^q. Також вдалося проаналізувати коректність вирішення задач 2-го етапу розрахунків (8) в умовах перевантаження інтерфейсу маршрутизатора. Так, в табл. 1 можна побачити, що при використанні (9) потоки пакетів з найнижчими значеннями класів $k_8^f = 2,3227$ та $k_{10}^f = 2,2846$, які були направлені до низькокласової черги ($k_1^q = 1,875$), отримували обмеження в обслуговуванні аж до повного блокування. Ймовірність відкидання пакетів з восьмого та десятого потоків дорівнювала одиниці. В той же час, потоки з високими значеннями класів не обмежувалися в обслуговуванні до тих пір доки можна було відмовити потокам з низькими значеннями класів.

При використанні лінійно-квадратичної цільової функції (10) (табл. 1), спостерігався більш справедливий характер використання пропускної здатності інтерфейсу та можливих відмов в обслуговуванні потоків пакетів. Так, відмови в обслуговуванні стосувалися не лише потоків з низькими значеннями класів, а й взагалі усіх потоків, однак більшою мірою – з низькими значеннями класів і меншою – з високими.

Таблиця 1 – **Вихідні дані та результати розрахунків при використанні заданих цільових функцій**

Характеристика потоків				**Характеристика черг**			
Лінійна цільова функція (9)							
Номер потоку	k_i^f	a_i, **(1/с)**	y_i	**Номер черги**	k_j^q	c **(1/с)**	b_j, **(1/с)**
8	2,3227	5,0803	1	1	1,875	13,5506	0
10	2,2846	8,4703	1				
4	4,1565	12,8639	0	2	3,625	33,6509	33,208
6	3,0742	7,228	0,613				
11	3,5794	13,559	0				
1	5,5438	12,9388	0	3	5,375	66,792	66,792
2	6,1221	1,3453	0				
3	5,5342	15,4123	0				
5	4,8291	8,0726	0				
7	6,2128	7,4092	0				
9	5,8074	8,4328	0				
12	5,3793	13,181	0				
-	-	-	-	4	7,125	-	-
Лінійно-квадратична цільова функція (10)							
8	2,3227	5,0803	0,221	1	1,875	13,5506	10,5235
10	2,2846	8,4703	0,225				
4	4,1565	12,8639	0,124	2	3,625	33,6509	28,907
6	3,0742	7,228	0,167				
11	3,5794	13,559	0,143				
1	5,5438	12,9388	0,093	3	5,375	66,792	60,5695
2	6,1221	1,3453	0,084				
3	5,5342	15,4123	0,093				
5	4,8291	8,0726	0,11				
7	6,2128	7,4092	0,083				
9	5,8074	8,4328	0,088				
12	5,3793	13,181	0,096				

На рис. 1 представлено результати аналізу впливу множника балансування w на характер зміни усередненої за потоками ймовірності відкидання пакетів для кожної з черг Y_M відповідно до приклада, наведеного в табл. 1. На рис. 1 можна побачити, що за наявності перевантаження інтерфейсу маршрутизатора та у випадку, коли множник балансування w дорівнює нулю, характер відмов в обслуговуванні є аналогічним до моделі з цільовою функцією (9). Можна стверджувати, що у такому разі обслуговування потоків пакетів здійснюється на основі так званих абсолютних пріоритетів, схожим, наприклад, на модель Priority Queuing (PQ), коли обмеження в обслуговуванні отримують лише потоки низькокласових черг, тоді як черги з високими значеннями класів обслуговуються у повному обсязі (табл. 1) [1-3,17-23].

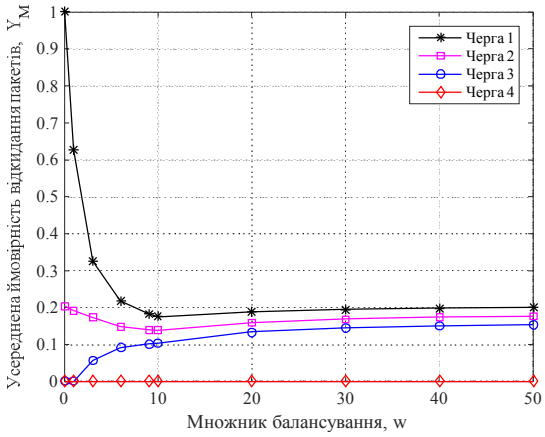

Рис. 1. Аналіз впливу множника балансування w на характер зміни усередненої ймовірності відкидання пакетів з організованих на інтерфейсі маршрутизатора черг

Збільшення значення множника w (рис. 1) дозволяє організувати більш справедливе обслуговування потоків пакетів, що базується на т.зв. відносних пріоритетах. Тобто, у разі можливого перевантаження інтерфейсу маршрутизатора, відмови в обслуговуванні будуть стосуватися усіх потоків, однак більшою мірою – з низькокласових черг і меншою – з висококласових (табл. 1). Подібний підхід є схожим, наприклад, до моделі зваженого справедливого обслуговування – Weighted Fair Queuing, WFQ [1, 16-23]. Таким чином, використання моделі управління чергами з лінійно-квадратичною цільовою функцією (10) та врахуванням значення множника балансування w дає можливість завчасно обмежувати інтенсивність саме того потоку, який спричинює перевантаження інтерфейсу маршрутизатора телекомунікаційної мережі. Підбір значення w від 10 до 30, в такому випадку, дозволяє забезпечити плавний характер відмов в обслуговуванні замість стрибкоподібного.

Висновки

В роботі проведено модифікація та дослідження методу активного управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів ТКМ з узгодженим вирішенням задач: управління перевантаженням (Congestion Management), метою якої були оптимальна агрегація та розподіл потоків пакетів за сформованими на інтерфейсі маршрутизатора чергами згідно близькості значень їх класів; розподілу ресурсів (Resource Allocation), метою якої був оптимальний розподіл пропускної здатності інтерфейсу між сформованими на ньому чергами; активного управління чергами (Active Queue Management) та запобігання перевантаженням (Congestion Avoidance), метою якої було забезпечення превентивного (завчасного) обмеження інтенсивності потоків пакетів, що надходять на інтерфейс маршрутизатора телекомунікаційної мережі.

Задача управління перевантаженням буда зведена до оптимізаційної задачі з критерієм оптимальності (3), метрикою (4) та обмеженнями (1). Задачі розподілу ресурсів і запобігання перевантаження (8) з критерієм оптимальності (9) та обмеженнями (5)-(6) були сформульовані у вигляді задачі лінійно-квадратичної оптимізації (10).

Дослідження процесів активного управління чергами, розподілу ресурсу та управління перевантаженням підтвердили ефективність запропонованого методу управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів ТКМ. У разі перевантаження інтерфейсу маршрутизатора, коректність та адекватність отримуваних за допомогою запропонованого методу рішень, вбачається при застосуванні саме лінійно-квадратичної цільової функції (10). Тобто, у разі перевантаження інтерфейсу маршрутизатора, відмови в обслуговуванні будуть носити збалансований характер: відмови стосуватимуться усіх потоків, однак більшою мірою – з низькокласових черг і меншою – з висококласових. В ході дослідження встановлено, що числове значення множника балансування w варто обирати в межах від 10 до 30.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Rao, D. S.: Queue Management and Quality of Service (QoS) in the Internet: A Novel Approach for Flow Protection for providing Better than Best-Effort Service in the Internet. LAP LAMBERT Academic Publishing (2012).
2. Tan, L.: Resource Allocation and Performance Optimization in Comm. Networks and the Internet. CRC Press (2017).
3. Kamoun, F., Outay, F.: IP/MPLS networks with hardened pipes: service concepts, traffic engineering and design considerations. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing. 2018. pp. 1-8.
4. Monge, A., Szarkowicz, K.: MPLS in the SDN Era: Interoperable Scenarios to Make Networks Scale to New Services. 1st edition. O'Reilly Media (2016).
5. Li, Y., Panwar, S., Liu, C. J.: On the Performance of MPLS TE Queues for QoS Routing. Vol. 36. Part 3. 2004. pp. 170-174.
6. Berreiros, M., Lundqvist, P.: QOS-Enabled Networks: Tools and Foundations. 2nd Edition. Wiley Series on Communications Networking & Distributed Systems, Wiley (2016).
7. Stallings, W.: Foundations of modern networking: SDN, NFV, QoE, IoT, and Cloud. Addison-Wesley Professional (2015).
8. White, R. Computer Networking Problems and Solutions: An innovative approach to building resilient, modern networks. 1st Edition. Addison-Wesley Professional (2018).

9. Lemeshko, O., Lebedenko, T., Yeremenko, O., Simonenko, O.: Math. Model of Queue Management with Flows Aggregation and Bandwidth Allocation. In: Int. Conf. on Theory & Appl. of Fuzzy Syst. and Soft Comp.. Springer, Cham. 2018. pp. 165-176.
10. Лемешко, А. В., Лебеденко, Т. Н.: Линейная модель оптимального управления очередями на интерфейсе маршрутизатора телекоммуникационной сети. Information Content and Processing. 2017. Vol. 4, №2. С. 171-181.
11. Lebedenko, T., Kholodkova, A., Al-Dulaimi, A.: Linear-Quadratic Model of Optimal Queue Management on Interface of Telecommunication Network Router. In: 2018 Third International Conference Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo'2018) Proceedings, pp 1-4. IEEE (2018).
12. Lemeshko, O., Hailan, A., Starkova, O.: Multi-level traffic management in the MPLS-TE DiffServ network. In: 2011 11 Int. Confe. The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics. Proc., pp. 118-120 (2011).
13. Lebedenko, T.: Method of Scheduling and Active Queues Management on Routers Interfaces of Telecommunication Networks. In: Innovative Techn. and Sc. Sol. for Industries. 2 (8). 2019. pp. 54-61. DOI: 10.30837/2522-9818.2019.8.054
14. Lemeshko, O., Ali, S. Ali, Simonenko, O.: A Queue Management Model on Router of Active Network. In: 2015 Thirteenth Int. Conf. The Experience of Designing and Appl. of CAD Systems in Microelectronics. Proc., pp. 419-421. IEEE (2015).
15. Лебеденко, Т. М., Мокряк, А. А., Симоненко, О . В., Черкасов, А. В., Власенко, А. О.: Вдосконалення та дослідження методу збалансованого управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів телекомунікаційної мережі. Проблеми телекомунікацій. 2018. №2(23). С. 62-74. Avaivable at: http://pt.journal.kh.ua/2018/2/1/182_lebedenko_queue.pdf
16. Semenyaka, M.: Research of Goal Coordination Method for Congestion Management on Telecommunication Network Nodes. In: 2014 The International Conference Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer science (TCSET'2014) Proceedings, pp. 501-503. IEEE (2014).
17. Лемешко, О. В., Добрышкин, Ю. Н., Дробот, О. А.: Результаты исследования модели управления трафиком с учётом задаваемых приоритетов для многопродуктового и многополюсного случаев. Проблеми телекомунікацій. 2010. №2(2). С. 33-41. Avaivable at: http://pt.journal.kh.ua/2010/2/2/102_lemeshko_rezults.pdf
18. Lu, L., Du, H., Liu, R. P.: CHOKeR: A novel AQM algorithm with proportional bandwidth allocation and TCP protection. In: IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2014. pp. 637-644. DOI: 10.1109/TII.2013.2278618
19. Wang, P.: Dynamics of Delay Differential Equations in Communications Networks: In the Framework of Active Queue Management. LAP Lambert Academic Publishing (2009).
20. John, J., Balan, R.: Priority Queuing Technique Promoting Deadline Sensitive Data Transfers in Router based Heterogeneous Networks. International Journal of Applied Engineering Research. 12(15). 2017. pp. 4899-4903.
21. Lenas, S., Dimitriou, S., Tsapeli, F., Tsaoussidis, V.: Queue-management architecture for delay tolerant networking. Wired/Wireless Internet Communications. 2011. pp. 470-482. DOI: 10.1007/978-3-642-21560-5 39
22. Kushwaha, V.: Interaction of High Speed TCPs with Recent AQMs through Experimental Evaluation. International Journal of Computer Network & Information Security. 8(9). 2016. pp. 41-47. DOI: 10.5815/ijcnis.2016.09.06
23. White, R., Tantsura, J. E.: Navigating Network Complexity: Next-generation routing with SDN, service virtualization, and service chaining. Addison-Wesley Professional (2015).
24. Hahn, B., Valentine, D. T.: Essential MATLAB for Engineers and Scientists. Sixth Edition. Academic Press (2016).
25. Klee, H., Allen, R.: Simulation of Dynamic Systems with MATLAB® and Simulink®. Third Edition. CRC Press (2017).

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О. В. Лемешко,
Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків
Received (Надійшла) 11.06.2019
Accepted for publication (Прийнята до друку) 31.07.2019

Исследование метода активного управления очередями на интерфейсах маршрутизаторов телекоммуникационных сетей

Т. Н. Лебеденко, Н. В. Головешко, А. В. Холодкова

Представлены результаты исследования метода активного управления очередями на интерфейсах маршрутизаторов телекоммуникационных сетей. Основу метода составляют математические модели линейного и квадратичного программирования. Новизной данных моделей является согласованное и последовательное решение оптимизационных задач: агрегации и распределения потоков пакетов по сформированным на интерфейсе маршрутизатора очередям (управление перегрузкой); распределения пропускной способности интерфейса маршрутизатора между сформированными очередями (распределение ресурса); и обеспечения заблаговременного ограничения интенсивности потоков пакетов, поступающих на вход интерфейса маршрутизатора (активное управление очередями). Проанализировано влияние классов потоков и очередей, вида целевых функций и множителя балансировки на характер распределения потоков по очередям, закрепления частей пропускной способности интерфейса за отдельным очередями и возможных отказов в обслуживании.

Ключевые слова: активное управление очередями, управление перегрузкой, распределения ресурсов, предотвращение перегрузки, качество обслуживания.

Investigation of the method of active queue management on the interfaces of telecommunication networks routers

T. Lebedenko, M. Goloveshko, A. Holodkova

The paper presents the results of an investigation of the method of active queue management at the interfaces of telecommunication networks routers. The method is based on mathematical models of linear and quadratic programming. The novelty of these models is a consistent and consistent solution of optimization problems: aggregation and allocation of packet flows over queues formed at the interface (congestion management); distribution of the bandwidth of the router interface between the formed queues (resource allocation), and ensure that the rate of packet flow arriving at the input of the router interface is proactively limited (active queue management). The influence of classes of flows and queues, the type of objective functions and the balancing factor on the character of the distribution of flows among queues, fixing parts of the interface bandwidth to individual queues and possible denials of service are analyzed.

Keywords: active queue management, congestion management, resource allocation, congestion avoidance, quality of service.