

УДК 621.391

А.В. Лемешко, Али С. Али, М.В. Семеняка

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТОКОВЫХ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ БАЛАНСИРОВКИ ОЧЕРЕДЕЙ НА МАРШРУТИЗАТОРАХ МУЛЬТИСЕРВИСНОЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ

Предложены потоковые модели динамической балансировки очередей на маршрутизаторах телекоммуникационной сети. В рамках предложенных моделей задача балансировки очередей была сведена к решению оптимизационных задач линейного и нелинейного программирования. С помощью потоковых моделей проведено исследование процесса балансировки очередей с различной степенью учета параметров передаваемых потоков.

Ключевые слова: телекоммуникационная сеть, балансировка очередей, трафик, приоритет пакета, интенсивность потока, качество обслуживания.

Введение

Развитие современных мультисервисных телекоммуникационных сетей (ТКС) и технологий подчинено одной важной цели – повышение качества обслуживания (Quality of Service, QoS) пользователей [1, 2]. Это касается повышения доступности и непрерывности услуги, а с точки зрения сетевых показателей – улучшения численных значений средней задержки пакетов, джиттера, уровня потерь пакетов и др. Среди комплекса мер по повышению QoS наиболее результативными традиционно считаются средства сетевого уровня OSI – классификация и маркировка пакетов, маршрутизация, управление очередями, резервирования ресурсов и т.д.

В последнее время все больше внимание ученых в области телекоммуникаций занимают проблемы оптимизации процессов управления очередями, так как именно благодаря минимизации длины очереди, можно существенно улучшить перечисленные показатели QoS без наращивания величины доступных сетевых ресурсов, прежде всего, пропускной способ-

ности каналов связи (КС). При этом совершенствование средств управления очередями происходит как на технологическом уровне за счет разработки новых механизмов, так и на теоретическом уровне, основываясь на синтезе новых математических моделей, методов и алгоритмов сетевого управления. В этой связи, *актуальной представляется задача*, связанная с анализом известных решений, разработкой и исследованием новых математических моделей в области управления очередями в ТКС.

Анализ известных технологических решений

В настоящее время усилия разработчиков телекоммуникационных устройств и, прежде всего, маршрутизаторов транспортных ТКС в области управления очередями (QoS Congestion Management (queueing)) основаны на преимущественном использовании и постоянной модификации следующих основных механизмов [1, 2]: FIFO Queueing (First In, First Out), приоритетные очереди (Priority Queueing, PQ), заказные очереди (Custom Queueing, CQ), взве-

шенное справедливое обслуживание (Weighted Fair Queuing, WFQ), взвешенные справедливые очереди основанные на классах (Class-based weighted fair queueing, CBWFQ), очереди с малой задержкой (Low Latency Queuing, LLQ) и др.

Отличительной чертой и общим недостатком существующих технологических средств в области управления очередями, как показал проведенный анализ, является статический и не согласованный характер решений следующих важных задач:

1) распределение поступающих на маршрутизатор информационных потоков в соответствии с их интенсивностью и приоритетностью по множеству очередей;

2) определение порядка обслуживания пакетов из различных очередей, что, так или иначе, связано с распределением пропускной способности КС между пакетами разных потоков.

Первая задача в основном решается при конфигурировании и настройке т.н. списков доступа (access-list) (рис. 1 а, б) или в ходе классификации потоков (рис. 1, в). Вторая задача, связанная с распределением пропускной способности КС между пакетами разных потоков, решается, для примера, в механизме CQ с помощью установки для каждой очереди счетчика байт (byte-count), определяющего объем данных, передаваемых за один просмотр из этой очереди в КС (рис. 2, а). Для механизмов LLQ и CBWFQ часть пропускной способности КС закрепляется за той или иной очереди в явном виде и указывается или в процентах, или в бит/с (рис. 2, б).

```
access-list 10 permit 239.1.1.0 0.0.0.255
priority-list 1 protocol ip high list 10
```

а – пример направления IP-потока, поступившего по десятому списку доступа, в очередь с приоритетом «high» для механизма PQ

```
queue-list 1 protocol ip 1 list 10
```

б – пример направления IP-потока, поступившего по десятому списку доступа, в очередь №1 для механизма CQ

```
Router(config)# class-map class1
Router(config-cmap)# match access-group 101
Router(config-cmap)# exit
Router(config-cmap)# class-map class2
Router(config-cmap)# match access-group 102
Router(config-cmap)# exit
```

в – пример формирования классов обслуживания на основе списков доступа для механизма CBWFQ

Рис. 1. Пример использования списков доступа при решении задачи распределения поступающих на маршрутизатор информационных потоков по множеству очередей

```
queue-list 9 queue 10 byte-count 1400
```

а – пример установления в механизме CQ для десятой очереди счетчика байт, равного 1400

```
Router(config-pmap)# class class1
Router(config-pmap-c)# bandwidth 3000
Router(config-pmap-c)# queue-limit 30
Router(config-pmap-c)# exit
```

б – пример закрепления в механизмах LLQ и CBWFQ части пропускной способности КС, равной 3000 бит/с, за очередь, через которую передаются пакеты потоков с классом обслуживания «class1»

Рис. 2. Примеры определения порядка обслуживания пакетов из различных очередей

Статический характер решений основан на том, что администратор осуществляет настройку необходимых параметров вручную, т.е. управление очередями в реальном времени при таком подходе реализовать невозможно. К примеру, в задачах маршрутизации давно используются соответствующие протоколы, т.н. протоколы динамической маршрутизации, в которых маршрутные переменные пересчитываются периодически (через 30 – 90 с) или по требованию. В задачах же Congestion Management загруженность очередей необходимо контролировать совсем с другой периодичностью, речь идет о миллисекундах, т.е. придание решению задач управления очередями *динамического* характера является первоочередной проблемой. Немаловажно также обеспечить *согласованность* в решении задач, связанных с распределением поступающих на маршрутизатор информационных потоков по очередям и определением порядка обслуживания пакетов из различных очередей, т.к. эти задачи в существующих механизмах решаются в лучшем случае последовательно.

Краткий обзор известных теоретических решений

В области управления очередями также накоплен немалый теоретический опыт [3 – 10], включающий в себя математические модели, методы и алгоритмы, которые по разным причинам пока еще не были положены в основу перспективных средств Congestion Management. Одной из важных тенденций в развитии средств управления очередями является использование потоковых моделей (flow-based model), в рамках которых наряду с длиной и приоритетом пакета должна учитываться интенсивность потока и ряд других параметров трафика.

Кроме того, среди множества работ, содержание которых все больше адаптируется под беспроводные технологии [4 – 7], заслуживает внимания подход, основанный на реализации идей балансировки очередей [3, 9, 10]. Чем более сбалансирован-

ной будет загрузка очередей, тем меньше будет их средняя длина и вероятность переполнения (вероятность потерь пакетов). В технологии MPLS парадигма обеспечения сбалансированной загруженности сетевых ресурсов получила название инжиниринга трафика (Traffic Engineering, TE).

Идеи Traffic Engineering Queues поручили свое развитие в работах [9, 10]. В работе [9] балансировка (использование) очередей основано на введении соответствующих метрик, а прикладная сетевая задача сведена к оптимизационной задаче линейного программирования. В работах [10] постановка задачи балансировки очередей несколько усложнена, т.к. обеспечен учет текущей загруженности каждой очереди, что придало самой задаче нелинейный характер и заметно усложнило получение искомого решения. В этой связи целью дальнейших исследований является поиск разумного компромисса между полнотой описания процесса и сложностью получаемых решений по управлению очередями.

Исследование сравниваемых моделей балансировки очередей в ТКС

Для достижения поставленной цели сравнивались четыре основных модели управления очередями и их балансировки, описание которых представлено ниже.

Потоковые модели управления очередями, основанные на метриках

Пусть a_i ($i = \overline{1, M}$) – интенсивность трафика i -го класса, поступающего на обслуживание маршрутизатором ТКС. Кроме того, пусть b_j ($j = \overline{1, N}$) – часть пропускной способности исходящего КС, которая выделена для обслуживания пакетов из j -й очереди. При этом необходимо выполнить условие

$$\sum_{j=1}^N b_j = b, \quad (1)$$

где b – пропускная способность исходящего КС.

С целью предотвращения перегрузки маршрутизатора в целом необходимо обеспечить выполнение следующего условия:

$$\sum_{i=1}^M a_i \leq b, \quad (2)$$

которое выполняется, прежде всего, за счет эффективной маршрутизации трафика в сети.

Если в известных механизмах управления очередями порядок распределения пакетов того или иного потока трафика по очередям маршрутизатора, как правило, строго фиксирован, то придать динамический характер этому процессу удалось в модели за счет введения переменной x_{ij} , под которой подразумевалась часть i -го трафика, который будет

направлен для обслуживания в j -ю очередь. Согласно физическому смыслу переменной x_{ij} имеют место следующие дополнительные условия:

$$x_{ij} \geq 0 \quad (i = \overline{1, M}, j = \overline{1, N}), \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} = a_i \quad (i = \overline{1, M}), \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^M x_{ij} \leq b_j \quad (j = \overline{1, N}). \quad (5)$$

Выполнение условия (4) гарантирует обслуживание всех пакетов трафика, поступающих на отдельный маршрутизатор. Условия (5) вводятся для предотвращения перегрузки очередей маршрутизатора по пропускной способности.

В рамках данной модели (**model#1**) [9] в качестве искомого выступают лишь переменные x_{ij} , представленные вектором \vec{x} , а оптимальные решения по распределению потоков за очередями находятся в ходе минимизации следующей целевой функции:

$$T(x) = \vec{c}^t \vec{x}, \quad (6)$$

в которой \vec{c} – вектор весовых коэффициентов (метрик), характеризующих условную стоимость (c_{ij}) использования пакетами i -го потока ресурсов j -й очереди.

Результаты исследования модели **model#1** показали, что обслуживание пакетов того или иного потока существенно зависит от метрик c_{ij} . Например, пусть число потоков и очередей равно четырем. Интенсивности первого, третьего и четвертого потоков равны 50, 150, 70 1/с соответственно, а интенсивность второго потока изменялась от 0 до 100 1/с. Пропускная способность исходящего канала связи, равная 390 1/с, распределена за очередями маршрутизатора следующим образом: первой очереди выделено 100 1/с; второй – 120 1/с; третьей – 80 1/с; четвертой – 90 1/с.

Таблица 1

Метрики очередей

c_{ij}	$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$
$i=1$	120	135	112	130
$i=2$	108	95	106	90
$i=3$	125	128	130	127
$i=4$	130	100	150	165

Так как метрики обслуживания второго трафика первой и третьей очередями превосходят метрики обслуживания второй и четвертой очередью, то в условиях роста интенсивности второго трафика больше загружаться будут именно вторая и четвертая очереди (рис. 3). Причем, если метрика обслуживания четвертой очередью меньше соответствующей

метрики для второй очереди, то сначала будет заполняться именно четвертая очередь (вплоть до перегрузки очереди по пропускной способности), а далее начнется загружаться вторая очередь. После ее перегрузки пакеты второго трафика пойдут в третью очередь, если метрика ее использования меньше метрики использования первой очередью.



Рис. 3. Анализ загрузки очередей в рамках модели model#1

Таким образом, с ростом интенсивности поступающего потока загруженность очередей пакетами этого трафика будет осуществляться обратно пропорционально метрике обслуживания – чем меньше метрика, тем больше данная очередь будет загружаться.

В рамках второй модели (model#2) [9] при сохранении справедливости условий (1) – (5) в качестве искомого выступал расширенный по содержанию и размерности вектор

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} x_{ij} \\ \dots \\ b_j \end{bmatrix} \quad (i = \overline{1, M}; j = \overline{1, N}), \quad (7)$$

т.е. задачи, связанные с распределением поступающих на маршрутизатор информационных потоков по очередям (x_{ij}) и определением порядка обслуживания пакетов из различных очередей (b_j), решались согласованно. Оптимальным считалось решение, которое обеспечивало минимум целевой функции (6), в которой вектор весовых коэффициентов (метрика)

$$c = \begin{bmatrix} c_{ij} \\ \dots \\ c_j \end{bmatrix}$$

дополнительно характеризовал еще и стоимость (c_j) выделения j -й очереди того или иного объема пропускной способности исходящего канала связи.

В ходе исследования модели model#2 выяснилось, что с ростом интенсивности одного из потоков увеличивалась загруженность самой «дешевой» (по метрике) для него очереди. При этом изменение номера обслуживаемой очереди не происходило, т.к. выполнение условия отсутствия перегрузки очереди

по пропускной способности гарантировалось увеличением объема пропускной способности КС, ей выделяемого, пропорционально росту интенсивности поступающего в нее трафика (рис. 4).

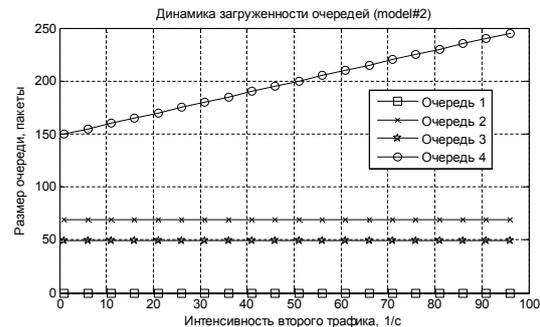


Рис. 4. Анализ загрузки очередей в рамках модели model#2

Потоковые модели балансировки очередей

Третья модель (model#3), основу которой составляли условия (1) – (4), была дополнена видоизмененным (по сравнению (5)) условием предотвращения перегрузки очереди по пропускной способности

$$\sum_{i=1}^M x_{ij} \leq \alpha \cdot b_j \quad (j = \overline{1, N}), \quad (8)$$

где параметр α характеризовал верхний динамически управляемый порог загрузки очередей маршрутизатора по трафику.

Ввиду пересмотра условия предотвращения перегрузки очереди по пропускной способности (8) изменен и критерий оптимальности получаемых решений, в качестве которого выступало выражение

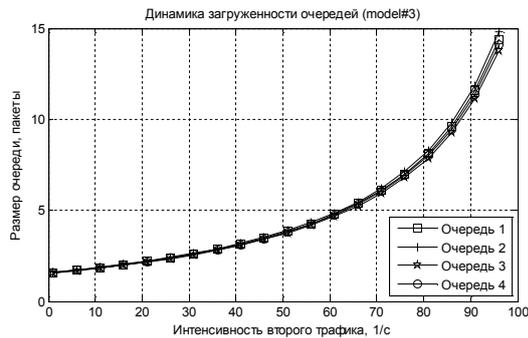
$$\min_{\bar{x}, \alpha} \dots \quad (9)$$

Отметим, что в рамках модели model#3 обеспечивается оптимальная балансировка загрузки очередей при фиксированной доле пропускной способности, выделенной для обслуживания пакетов из той или иной очереди. Таким образом, в этой модели искомым выступал вектор \bar{x} (в трактовке модели model#1) и параметр α .

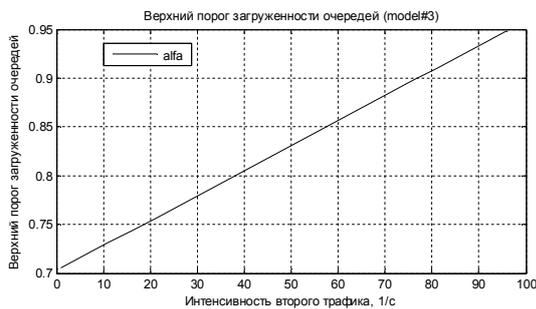
В ходе исследования модели model#3 установлено, что она в большей мере соответствует требованиям концепции Traffic Engineering Queues, т.к. все очереди с ростом интенсивности поступающего потока (трафика) загружались сбалансированно (рис. 5, а), а динамически управляемый верхний порог загрузки очередей по трафику возрастал линейно (рис. 5, б).

К достоинствам первых трех моделей стоит отнести их наглядность и относительную простоту в использовании, т.к. расчет искомого переменных сводился к решению задач линейного программирования. Также важно отметить, что отсутствие перегрузки очереди по пропускной способности (усло-

вия (5) или (8)) еще не гарантирует отсутствия переполнения очереди, т.к. буфер пакетов на маршрутизаторе обычно конечен и составляет десятки пакетов.



а



б

Рис. 5. Результаты исследования модели model#3

В четвертой модели (model#4), подробно описанной в работе [10], развивается подход, описанный в рамках модели model#2 (1) – (5), (7), но предполагается, что формализуется кроме всего прочего и условие отсутствия перегрузки очереди по ее длине

$$\bar{n}_j \leq n_j^{\max} \quad (j = \overline{1, N}), \quad (10)$$

где \bar{n}_j и n_j^{\max} – средняя и максимально возможная длина j -й очереди.

Важно отметить, что средняя длина очереди зависит нелинейно от соотношения интенсивности потока к величине пропускной способности КС, выделенной для обслуживания пакетов из данной очереди, т.е. от параметра

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^M a_i x_{ij}}{b_j}.$$

Например, моделируя процесс обслуживания каналом связи пакетов системой массового обслуживания $M/M/1/n^{\max}$, имеем [11]:

$$\bar{n} = \frac{\rho^2 \left[1 - (n^{\max} + 1)\rho^{n^{\max}} + n^{\max} \rho^{n^{\max} + 1} \right]}{(1 - \rho^{n^{\max} + 2})(1 - \rho)} - \rho. \quad (11)$$

С целью более полного соответствия получаемых решений принципам концепции Traffic Engi-

neering Queues, касающихся обеспечения сбалансированной загрузки буферных ресурсов, условие (10) приведено к форме.

$$\frac{p_j}{v \cdot d_j} \cdot \bar{n}_j \leq \beta \cdot n_j^{\max} \quad (j = \overline{1, N}), \quad (10)$$

где p_j и d_j – соответственно величина приоритета и длина пакетов из j -й очереди; v – некоторый нормировочный коэффициент, который должен сглаживать различие в порядке значений приоритета (0=7) и длины пакета в байтах; β – верхний динамически управляемый порог длин очередей.

Кроме того, в рамках модели model#4 изменился и критерий оптимальности получаемых решений, в качестве которого выступает условие

$$\min_{x, b, \alpha} \beta, \quad (12)$$

что соответствует минимизации верхнего порога длин очередей на маршрутизаторе ТКС, взвешенного относительно таких характеристик потока, как длина пакета и его приоритет.

В ходе исследования модели model#4 были приняты следующие исходные данные: число потоков равно пяти, а очередей равно трем. Интенсивности первого, четвертого, пятого потоков равны 40, 60, 50 1/с соответственно, а интенсивность второго и третьего потока изменялась от 0 до 50 1/с. Пропускная способность исходящего канала связи равна 260 1/с. Приоритеты трафиком изменялись от 0 до 7. Максимальная длина каждой из очередей составляла соответственно 70, 25 и 10 пакетов. В результате через первую очередь передавался трафик с первым приоритетом, через вторую – трафик с третьим приоритетом, и через третью – с седьмым приоритетом.

Установлено, что модель model#4 соответствует требованиям концепции Traffic Engineering Queues, обеспечивая оптимальную балансировку очередей, взвешенную на основе приоритета (рис. 6), т.к. удалось обеспечить более эффективное обслуживание более приоритетного трафика. Динамически управляемый верхний порог загрузки очередей по длине также как и для модели model#3 возрастал линейно.

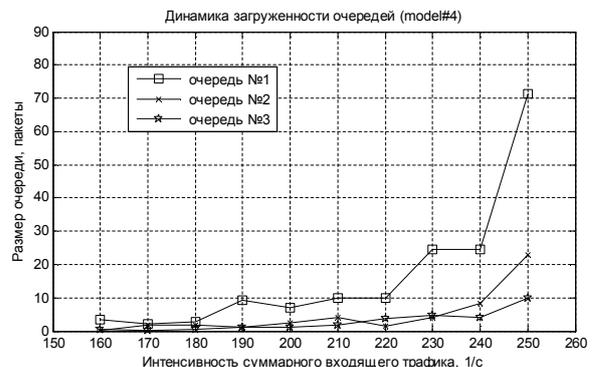


Рис. 6. Результаты исследования модели model#4

Выводы

В статье рассмотрены потоковые модели динамической балансировки очередей на маршрутизаторах телекоммуникационной сети. В рамках данных моделей задача балансировки очередей была сведена к решению оптимизационных задач линейного и нелинейного программирования. С помощью потоковых моделей проведено исследование процесса балансировки очередей с различной степенью учета параметров передаваемых потоков.

Установлено, что наиболее соответствуют требованиям относительно балансировки очередей модели model#3 и model#4. Модель model#3 обеспечивала оптимальную балансировку очередей по трафику с линейным ростом коэффициента загрузки очереди (рис. 5). В рамках модели model#4 обеспечивалась более эффективная балансировка очередей уже по длине очереди, взвешенной на основе приоритета и длины обслуживаемых пакетов. Подобного улучшения, правда, удалось добиться, пожертвовав линейной постановкой задачи, т.к. приходилось уже решать задачу нелинейного программирования.

Модель model#4 также более подходит под случай, когда необходимо обеспечить согласованное решение задач, связанных с распределением поступающих на маршрутизатор информационных потоков по очередям и определением порядка обслуживания пакетов из различных очередей.

Список литературы

1. Вегенша Ш. Качество обслуживания в сетях IP: Пер. с англ. / Ш. Вегенша. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 386 с.
2. Справочник по телекоммуникационным технологиям: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 640 с.
3. Panwar Li Y. On the Performance of MPLS TE

Queues for QoS Routing / Li Y. Panwar, S. Liu C.J. // Simulation series. – 2004. – Vol. 36; part 3. – P. 170-174.

4. Teixeira and Guardieiro. A new and efficient adaptive scheduling packets for the uplink traffic in WiMAX networks // *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. – 2011. – Vol. 2011, No. 1. – P. 113-123.

5. Annadurai C. Review of Packet Scheduling Algorithms in Mobile Ad Hoc Networks / C. Annadurai // *International Journal of Computer Applications*. – 2011. – Vol. 15, No. 1. – P. 7-10.

6. Jandaeng C. Review PSA. The Packet Scheduling Algorithm for Wireless Sensor Networks / C. Jandaeng, W. Suntiamentut, N. Elz // *GRAPH-HOC International journal on applications of graph theory in wireless ad hoc networks and sensor networks*. – 2011. – Vol. 3, No. 3. – P. 1-12.

7. Ala'a Z. Al-Howaide. Performance evaluation of different scheduling algorithms in WiMax / Ala'a Z. Al-Howaide, Ahmad S. Doulat, Yaser M. Khamayseh // *IJCSEA International Journal of Computer Science, Engineering and Applications*. – 2011. – Vol. 1, No. 5. – P. 81-94.

8. Лемешко А.В. Потоковая модель управления очередями с динамическим распределением пропускной способности исходящего канала связи / А.В. Лемешко, А.В. Симоненко, Ватти Махмуд // *Наукові записки УНДІЗ*. – 2008. – №3(5). – С. 34-39.

9. Симоненко А.В. Модель динамического управления очередями и пропускной способностью канала связи на маршрутизаторах мультисервисной сети / А.В. Симоненко, Ахмад Хайлан, Али Али // *Радиотехника: Всеукр. міжвед. науч.-техн. сб.* – 2008. – Вып. 155. – С. 164-168.

10. Али С. Али. Потоковая модель динамической балансировки очередей в MPLS-сети с поддержкой Traffic Engineering Queues [Электронный ресурс] / Али С. Али, А.В. Симоненко // *Проблеми телекомунікацій*. – 2010. – №1 (1). – С. 59-67. – Режим доступа до журн.: http://pt.journal.kh.ua/2010/1/1/101_ali_balancing.pdf.

11. Петров М.Н. Вероятностно-временные характеристики в сетях и системах передачи интегральной информации: Научное издание КГТУ / М.Н. Петров. – Красноярск, 1997. – 220 с.

Поступила в редколлегию 15.11.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.В. Поповский, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПОТОКОВИХ МОДЕЛЕЙ ДИНАМІЧНОГО БАЛАНСУВАННЯ ЧЕРГ НА МАРШРУТИЗАТОРАХ МУЛЬТИСЕРВІСНОЇ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ

О.В. Лемешко, Алі С. Алі, М.В. Семеняка

Запропоновані потокові моделі динамічного балансування черг на маршрутизаторах телекомунікаційної мережі. У рамках запропонованих моделей завдання балансування черг було зведено до вирішення оптимізаційних задач лінійного і нелінійного програмування. За допомогою потокових моделей проведено дослідження процесу балансування черг з різним ступенем врахування параметрів переданих потоків.

Ключові слова: телекомунікаційна мережа, балансування черг, трафік, пріоритет пакету, інтенсивність потоку, якість обслуговування.

DEVELOPMENT AND RESEARCH FLOW MODELS OF DYNAMIC QUEUES BALANCING ON THE ROUTERS IN MULTISERVICE TELECOMMUNICATIONS NETWORK

O.V. Lemeshko, Ali S. Ali, M.V. Semenyaka

The given work propose a dynamic queues balancing flow models on the routers in telecommunication network. As part of the proposed models the task of queues balancing has been reduced to solving optimization problems in linear and nonlinear programming. This paper provides studying the process of queues balancing with different flow parameters by using flow models.

Keywords: telecommunication network, balancing of turns, traffic, priority of package, intensity of stream, quality of service.