

УДК 621.391

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ОЧЕРЕДЯМИ НА МАРШРУТИЗАТОРАХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ НА ОСНОВЕ ОПТИМАЛЬНОГО АГРЕГИРОВАНИЯ ПОТОКОВ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПАКЕТОВ ПО ОЧЕРЕДЯМ



[А.В. СИМОНЕНКО](#), [Д.В. АНДРУШКО](#)

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

**Abstract** – It was further developed the flow-based queue management model on telecommunication networks routers based on optimal flow aggregation and packets distribution in queues. The novelty of the model is that with flows distribution in queues it is carried out its aggregation based on flows and queues classes comparison within the analysis of the set of classification indicators. In addition, the model saved an important feature with respect to the implementation of the requirements of the Traffic Engineering Queues concept, related to ensuring a balanced queues workload along their length. Using the proposed model allows to optimize the process of flow aggregation, distribution of packets in separate queues and allocation of interface throughput for queues, giving the solution a high level of consistency. Results of the research confirmed the efficiency of the proposed model and its effectiveness in terms of correct solution of queue management problems. Flows aggregation process optimization depending on the ratio of the number of flows and queues as well as their classes allows to reduce the number of supported queues from 15-18% to 25-33% without reducing the level of quality of service differentiation of users flows, which helps to reduce the time for packets processing on the interface and minimization of the end-to-end packet delay within the network in a whole.

**Анотація** – Отримала подальший розвиток потокова модель управління чергами на маршрутизаторах телекомунікаційних мереж на основі оптимального агрегування потоків і розподілу пакетів по чергах. Новизна моделі полягає в тому, що при розподілі потоків за чергами здійснюється їх агрегування на основі порівняння класів потоків і черг в ході аналізу множини класифікаційних ознак. Крім того, в моделі збережено важлива властивість щодо реалізації вимог концепції Traffic Engineering Queues, пов'язане із забезпеченням збалансованої завантаженості черг по їх довжині.

**Анотация** – Получила дальнейшее развитие потоковая модель управления очередями на маршрутизаторах телекоммуникационных сетей на основе оптимального агрегирования потоков и распределения пакетов по очередям. Новизна модели состоит в том, что при распределении потоков по очередям осуществляется их агрегирование на основе сравнения классов потоков и очередей в ходе анализа множества классификационных признаков. Кроме того, в модели сохранено важное свойство относительно реализации требований концепции Traffic Engineering Queues, связанное с обеспечением сбалансированной загруженностью очередей по их длине.

## Введение

Как показал проведенный анализ [1-3], наиболее существенный рост задержек и потерь пакетов в современных территориально-распределенных телекоммуникационных сетях (ТКС) в основном обусловлен перегрузкой сетевых интерфейсов коммутаторов 3-го уровня или маршрутизаторов. С точки зрения теории телетрафика [4], основной причиной перегрузки является превышение или даже соизмеримость интенсивности потока пакетов с пропускной способностью (ПС) интерфейса, через который он протекает. Кроме пропускной способности к важным характеристикам интерфейса относят число поддерживаемых очередей, в которые помещаются пакеты при перегрузке канала связи, и максимально возможное число пакетов в каждой

из очередей. Обеспечение дифференцированного качества обслуживания (Quality of Service, QoS) при управлении трафиком на интерфейсах современных маршрутизаторов реализуется на основе решения следующих взаимосвязанных задач [2, 3]:

- классификация и маркировка пакетов;
- создание и настройка системы очередей на интерфейсе;
- распределение пакетов по очередям интерфейса с учетом параметров передаваемых потоков, требований к качеству обслуживания, характеристик создаваемых очередей и интерфейса в целом;
- определение порядка обслуживания очередей, т.е. определение очередности передачи пакетов из очередей в канал связи;
- распределение пропускной способности интерфейса между отдельными очередями;
- превентивное (заблаговременное) ограничение длины очереди.

Данные задачи должны решаться максимально согласованно в рамках единых интерфейсных механизмов-программ, являющихся частью операционной системы маршрутизатора. К сожалению, сегодняшнее состояние дел в данном вопросе характеризуется тем, что формирование очередей осуществляется преимущественно в соответствии с настройками «по умолчанию» (табл. 1) [1] или вручную, исходя из квалификации сетевого администратора. Это же касается и решений задач по распределению ПС интерфейса между очередями. За исключением механизмов FQ/WFQ, большинство средств основаны на статических решениях, которые не зависят от динамики изменения состояния интерфейса.

Таблица 1. Число очередей, поддерживаемых по умолчанию в основных планировщиках пакетов

Название планировщика	Число поддерживаемых очередей
FIFO	1
PQ	4
CQ	16 + 1 (системная)
FQ/WFQ	256 (с возможностью административного увеличения до 4096)
CBWFQ	64 класса очередей (каждая классовая очередь и очередь «по умолчанию» может настраиваться WFQ, т.е. разбиваться на 256 (до 4096) подочереди)
LLQ	К очередям CBWFQ добавляется одна приоритетная очередь

Важно отметить, что, с одной стороны, чем больше формируемых очередей, тем выше дифференциация, которую возможно обеспечить при обслуживании пакетов. С этой точки зрения стремятся, чтобы число очередей соответствовало количеству передаваемых через заданный интерфейс потоков. С другой стороны, с ростом числа поддерживаемых очередей возрастают и задержки, вносимые планировщиком пакетов, и связанные, например в FQ/WFQ, с переключением обслужива-

ния с очереди на очередь, анализом IP-заголовка пакетов, определением активности/пассивности потока, расчетом порядкового номера пакета из той или иной очереди и т.д. Особенно это недопустимо, когда ввиду нестационарности трафика некоторые очереди пустуют, а планировщик необоснованно тратит время на анализ их состояния, внося дополнительные задержки в обслуживание пакетов других очередей. На практике выход из создавшегося положения видится в том, чтобы потоки агрегировались (группировались) по ряду ключевых параметров, связанных с их классификационными признаками и требованиями к уровню качества обслуживания. Это позволяет сократить число используемых очередей или ограничиться доступным числом очередей, заданным по умолчанию, обеспечив приблизительно одинаковый уровень QoS для агрегированных потоков, что является ключевым требованием при агрегации.

Возвращаясь к проблеме обеспечения согласованного решения отдельных интерфейсных задач, отметим, что результаты, полученные в работах [5-9], стоит модифицировать таким образом, чтобы в ходе распределения пакетов по очередям производилась агрегация потоков по соответствию классификационным признакам. К недостаткам решений, предложенных в [7-9], следует отнести то, что в них для обеспечения оптимальной балансировки длин очередей не исключалась возможность направления достаточно различных по своим параметрам (с точки зрения классификации) потоков, что могло приводить к нерациональному распределению ПС интерфейса и соответствующему завышению или занижению качества обслуживания некоторым потокам.

## **I. Модель управления очередями на маршрутизаторах ТКС на основе оптимального агрегирования потоков и распределения пакетов по очередям**

В основу предлагаемой модели будут положены результаты, полученные в работах [5, 6]. Тогда пусть на интерфейс маршрутизатора поступает  $M$  потоков со следующими известными характеристиками:

$a_i$  – величина средней интенсивности  $i$ -го потока;

$K_i = \{k_i^l, l = \overline{1, L}\}$  – множество параметров пакетов  $i$ -го потока, которые используются для классификации сетевого трафика в рамках реализованной в ТКС транспортной технологии, где  $L$  – общее число параметров для классификации трафика.

Примером подобных параметров в IP-технологии являются приоритет пакета (содержимое полей IP-пакета: IP-precedence или DSCP) или значения QoS-group; IP-адреса источника и (или) получателя пакетов; MAC-адреса источника и (или) получателя пакетов; стандартный или расширенный список доступа к источникам/получателям; TCP/UDP-порты источника и (или) получателя пакетов; код длины пакета. В других технологиях пакетной коммутации к подобным параметрам также могут быть отнесены экспериментальные биты MPLS, бит Frame Relay DE.

Пусть для каждого  $i$ -го потока на основе анализа множества параметров  $\{k_i^l, l = \overline{1, L}\}$  определяется его класс  $k_i^{\Pi}$ , который является некоторой функцией от элементов множества  $K_i$ . В общем случае данная функция может носить нелинейный характер, так, например, в работе [9] аналог данной зависимости имел форму

$$k_i^{\Pi}(p_i, d_i) = \frac{p_i}{v \cdot d_i}, \quad (i = \overline{1, M}), \quad (1)$$

где  $p_i$  и  $d_i$  – приоритет и средняя длина пакетов  $i$ -го потока,  $v$  – некоторый нормировочный коэффициент, который должен сглаживать различие в порядке значений приоритета ( $0 \div 7$ ) и длины пакета в байтах.

В общем случае величина  $k_i^{\Pi}$  является безразмерной, и для удобства последующего изложения будем считать, что  $k_i^{\Pi}$  нормируется в пределах от нуля до единицы. Самый важный поток будет иметь значение класса, равного единице, т.е.  $k_i^{\Pi} = 1$ . Чем меньше класс, тем значение  $k_i^{\Pi}$  будет ближе к нулю.

Пусть пакеты, поступившие на интерфейс в соответствии с содержанием актуальной таблицы маршрутизации, должны распределяться между  $N$  очередями в ходе решения задач Congestion Management при расчете множества переменных второго типа  $x_{i,j}$  ( $i = \overline{1, M}$ ,  $j = \overline{1, N}$ ). Каждая из переменных  $x_{i,j}$  характеризует долю  $i$ -го потока, направленного на обслуживание в  $j$ -ю очередь. Для решения задач распределения ПС интерфейса между очередями (Resource Allocation) в рамках предлагаемой модели необходимо рассчитать множество переменных  $b_j$ , каждая из которых характеризует величину пропускной способности интерфейса, выделенную для обслуживания  $j$ -й очереди. В рамках последующего изложения условимся, что число потоков превышает количество поддерживаемых на интерфейсе очередей, т.е. имеет место неравенство

$$M > N. \quad (2)$$

По аналогии с классификацией потоков (пакетов) будем считать, что в системе управления очередями установлены также классы и самих очередей, как это сделано, например, в механизмах CBQ, CBWFQ и LLQ. Тогда каждой  $j$ -й очереди сопоставим класс  $k_j^0$  ( $j = \overline{1, N}$ ), который по аналогии с классом потоков  $k_i^{\Pi}$  также является безразмерной величиной, варьируемой в пределах от 0 (не включая) до 1 (включая).

На практике пакеты одного и того же потока направляются в одну и ту же очередь, поэтому в соответствии с физическим смыслом решаемой задачи переменная  $x_{i,j}$  является булевой:

$$x_{i,j} \in \{0, 1\}. \quad (3)$$

Кроме ограничений (3), на управляющие переменные  $x_{i,j}$  накладываются условия сохранения потока на интерфейсе маршрутизатора:

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

Выполнение условия (4) гарантирует, что все пакеты  $i$ -го потока будут направлены в одну из очередей, организованных на рассматриваемом интерфейсе.

Переменные  $b_j$  являются положительными вещественными величинами, на которые также накладывается система ограничений вида

$$0 \leq b_j, \quad \sum_{j=1}^N b_j \leq b, \quad (5)$$

где  $b$  – общая пропускная способность интерфейса, определяемая типом используемой телекоммуникационной технологии. Соблюдение условий (5) определяет корректность распределения ПС интерфейса между отдельными очередями.

Для обеспечения управляемости процессом предотвращения перегрузки интерфейса необходимо выполнить условие:

$$\sum_{i=1}^M a_i x_{i,j} < b_j, \quad (j = \overline{1, N}), \quad (6)$$

т.е. суммарная интенсивность потоков, направленных на обслуживание в  $j$ -ю очередь, не должна превышать пропускную способность интерфейса, которая выделена данной очереди.

Выполнение условия (6) не является достаточным для предотвращения перегрузки буфера очереди по ее длине, т.к. интенсивность потоков, поступающих в ту или иную очередь носит случайный и нестационарный характер. Для каждой  $j$ -й очереди обозначим через  $\bar{n}_j$  и  $n_j^{\max}$  ( $j = \overline{1, N}$ ) ее текущую длину (в пакетах) и максимальную емкость [8, 9]. Тогда условия управляемости процессом предотвращения перегрузкой (6) дополняются условиями предотвращения перегрузки очередей по их длине:

$$\bar{n}_j \leq n_j^{\max} \quad (j = \overline{1, N}), \quad (7)$$

где значения  $\bar{n}_j$  зависят от статистических характеристик потока, выбранной дисциплины обслуживания пакетов и выделенной данной очереди ПС интерфейса. Варианты расчетных выражений для оценки  $\bar{n}_j$  представлены в работах [8, 9].

Развивая и дополняя идеи концепции *Traffic Engineering Queues* [3, 8, 9], регламентирующей вопросы обеспечения сбалансированной загрузки очередей, в структуру модели введем ряд дополнительных условий

$$k_j^0 \bar{n}_j \leq \beta, \quad (j = \overline{1, N}), \quad (8)$$

где  $\beta$  – верхний динамически управляемый предел загруженности очередей по их длине на интерфейсе маршрутизатора. Физический смысл условий (8) состоит в том, чтобы очереди, создаваемые на интерфейсе, загружались сбалансированно. При этом чем выше класс очереди ( $k_j^0$ ), тем меньшую длину она должна иметь.

Согласованный расчет управляющих переменных  $x_{i,j}$ ,  $b_j$  и  $\beta$  будет обеспечен в ходе решения оптимизационной задачи, связанной с минимизацией целевой функции вида:

$$F = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N h_{i,j}^x x_{i,j} + \beta, \quad (9)$$

где  $h_{i,j}^x$  – условная стоимость (метрика) обслуживания пакетов  $i$ -го потока с помощью  $j$ -й очереди. Физический смысл формулированной задачи в целом состоит в том, что расчет управляющих переменных должен приводить к минимизации суммарной стоимости использования сетевых ресурсов: первое слагаемое отвечает за порядок использования буфера очереди, а второе – пропускной способности интерфейса.

Важно отметить, что критерием направления того или иного потока в определенную очередь является максимальное совпадение (соизмеримость) их классов  $k_i^{\Pi}$  и  $k_j^0$ . Тогда в рамках усовершенствования модели (3)-(9) предлагается, чтобы метрика, отвечающая за распределение потоков пакетов по очередям, а при выполнении условия (2) и за агрегирование потоков, рассчитывалась согласно формуле

$$h_{i,j}^x = w_x^b (k_i^{\Pi} - k_j^0)^2, \quad (i = \overline{1, M}, j = \overline{1, N}). \quad (10)$$

Таким образом, метрика  $h_{i,j}^x$  является неотрицательной величиной и напрямую зависит от квадрата расстояния между классами отдельных потоков и очередей. С помощью параметра  $w_x^b$  можно регулировать влияние на конечное численное значение целевой функции (9) ее первого и второго слагаемого.

Предложенная модель с вновь вводимыми формализмами (1), (2), (8)-(10) позволяет обеспечить согласованное решение задач по агрегированию и распределению потоков по очередям, а также по распределению пропускной способности интерфейса между системой поддерживаемых на нем очередей. Новизна модели состоит в том, что при распределении потоков по очередям осуществляется их агрегирование на основе сравнения классов потоков и очередей в ходе анализа множества классификационных признаков.

## II. Исследование предложенной модели управления очередями

Проводился анализ процесса управления очередями на интерфейсе маршрутизатора с использованием предложенной модели. В ходе моделирования число потоков изменялось от 10 до 500, а число очередей от 4 до 256. Например, в табл. 2 представлены исходные данные и результаты расчета для двадцати пяти потоков ( $N = 25$ )

и двенадцати очередей ( $M = 10$ ), пропускной способности 100 1/с ( $b = 100$ ) и  $w_x^b = 100$ .

Таблица 2. Исходные данные и результаты расчета для  $N = 25$ ,  $M = 10$  и  $b = 100$

Характеристики потоков			Параметры очередей				
номер потока	класс потока	средняя интенсивность потока (1/с)	номер использ. очереди	класс очереди	средняя интенсивность потока в очереди (1/с)	выделенная ПС	Средняя/максимальная длина очереди
8	0,0257	0,7643	1	0,1111	10,1951	11,3857	7,6680/10
9	0,0568	0,8024					
10	0,1429	0,7699					
13	0,0295	5,6561					
16	0,1148	2,2024					
7	0,1904	0,1738	2	0,2099	10,4765	12,6191	4,0596/8
11	0,1714	5,6116					
17	0,2361	1,4172					
19	0,1728	3,2739					
18	0,2891	1,1239	3	0,3086	2,7479	3,5241	2,7605/5
20	0,3237	1,5307					
22	0,2996	0,0933					
-	-	-	4	0,4074	-	-	-
3	0,4679	5,4051	5	0,5062	20,9374	29,7049	1,6832/5
4	0,4585	0,8290					
14	0,4723	3,8289					
24	0,5528	5,7753					
25	0,5547	5,0991					
12	0,6258	1,6394	6	0,6049	1,6394	2,4260	1,4084/5
1	0,6901	4,3839	7	0,7037	9,6191	14,7871	1,2107/4
15	0,6784	5,2352					
5	0,8061	4,7645	8	0,8025	11,2608	17,9241	1,0617/4
6	0,8247	1,1365					
21	0,8011	1,8349					
23	0,7756	3,5249					
2	0,8537	4,6417	9	0,9012	4,6417	7,6291	0,9454/4
-	-	-	10	1	-	-	-

В ходе расчетов средняя длина очереди определялась при условии, что работа интерфейса моделировалась, для примера, системой массового обслуживания М/М/1 [8, 9]. Минимизируемый верхний динамический порог загрузки очередей составлял  $\beta = 0,8520$ . Как показали результаты моделирования, агрегация потоков осуществлялась в соответствии с близостью их классов и класса очереди, в которую они направлялись. Достоинством предложенной модели также является то, что использовалось лишь минимально необходимое число очередей, достаточное для

обеспечения дифференцированного обслуживания на интерфейсе. Как показано в табл. 2, четвертая и десятая очереди не задействовались, т.к. не было потоков с соизмеримыми для них классами. Минимизация количества поддерживаемых очередей без снижения уровня QoS приводит к пропорциональному снижению времени, затрачиваемого на обработку пакетов на интерфейсе в конкретной очереди. В рамках рассмотренного примера удалось сократить число используемых очередей на 20%. При другом соотношении числа потоков и очередей, а также их классов выигрыш по данному показателю варьировался от 10-14% до 25-33%.

## Выводы

Как показывает практика, в ходе управления очередями при настройке интерфейса маршрутизатора исходят из двух противоречивых требований. С одной стороны, число используемых очередей на интерфейсе должно быть максимальным и в пределе стремиться к количеству передаваемых через него потоков для обеспечения максимально возможной дифференциации в обслуживании. Но, с другой стороны, с ростом числа поддерживаемых очередей заметно растут и задержки, вносимые планировщиком пакетов, которые связаны с формированием очередей, анализом их состояния и т.д. Рациональный выход из создавшейся ситуации видится в том, чтобы потоки агрегировались по ряду ключевых параметров, связанных с их классификационными признаками и требованиями к уровню качества обслуживания. Это нацелено на обоснованное сокращение числа используемых очередей с обеспечением приблизительно равного уровня качества обслуживания для агрегированных потоков в одной очереди.

В этой связи получила дальнейшее развитие потоковая модель управления очередями на маршрутизаторах ТКС на основе оптимального агрегирования потоков и распределения пакетов по очередям. Новизна модели состоит в том, что при распределении потоков по очередям осуществляется их агрегирование на основе сравнения классов потоков и очередей в ходе анализа множества классификационных признаков. Кроме того, в модели сохранено важное свойство относительно реализации требований концепции *Traffic Engineering Queues* и связанное с обеспечением сбалансированной загруженностью очередей по их длине.

Использование предложенной модели позволяет оптимизировать процесс агрегирования потоков, распределения пакетов по отдельным очередям и выделения очередям пропускной способности интерфейса, придав решению этих задач высокий уровень согласованности. Результаты исследований подтвердили работоспособность предложенной модели, а также ее эффективность с точки зрения корректного решения задач по управлению очередями. Оптимизация процесса агрегирования потоков позволяет в зависимости от соотношения числа потоков и очередей, а также их классов сократить количество поддерживаемых очередей от 15-18% до 25-33% без снижения уровня дифференциации качества обслуживания потоков пользователей,



что способствует сокращению времени на обработку пакетов на интерфейсе и минимизации межконцевой задержки пакетов в сети в целом.

### Список литературы:

1. Вегешна Ш. Качество обслуживания в сетях IP: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 386 с.
2. Álvarez S. QoS for IP/MPLS networks. – Cisco Press, 2006. – 299 p.
3. Li Y. Panwar S. Liu C.J. On the Performance of MPLS TE Queues for QoS Routing // Simulation series. – 2004. – Vol. 36; part 3. – P. 170–174.
4. Крылов В.В., Самохвалова С.С. Теория телетрафика и ее приложения. - Санкт Петербург: БХВ-Петербург, 2005. - 288 с.
5. Симоненко А.В, Ахмад Хайлан, Али Али. Модель динамического управления очередями и пропускной способностью канала связи на маршрутизаторах мультисервисной сети // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.- техн. сб. 2008. – Вып. 155. – С. 164-168.
6. Лемешко А.В. Симоненко А.В., Ватти Махмуд. Поточковая модель управления очередями с динамическим распределением пропускной способности исходящего канала связи // Наукові записки УНДІЗ 2008. – №3 (5). – С.34-39.
7. Лемешко А.В., Симоненко А.В. Математическая модель динамического управления канальным и буферным ресурсом на узлах телекоммуникационной сети // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.- техн. сб. 2009. – Вып. 156. – С.36-41.
8. Лемешко А.В., Симоненко А.В., Сиващенко С.И. Поточковая модель динамической балансировки очередей на узлах телекоммуникационной сети // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.- техн. сб. 2009. – Вып. 159. – С.46-49.
9. Али С. Али, Симоненко А.В. Поточковая модель динамической балансировки очередей в MPLS-сети с поддержкой Traffic Engineering Queues: [Электронный ресурс] // Проблемы телекоммуникаций. – 2010. – № 1 (1). – С. 59 – 67. – Режим доступа до журн.: [http://pt.journal.kh.ua/2010/1/1/101\\_ali\\_balancing.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2010/1/1/101_ali_balancing.pdf).