

УДК 681.326(075)

Савченко А.С., канд. техн. наук  
Чанг Шу

## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА СЕРВИСА В СЕТЯХ ДОСТУПА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ ФОРМИРОВАНИЯ И УПОРЯДОЧЕНИЯ ТРАФИКА

Национальный авиационный университет

*Рассмотрена задача анализа адаптивных алгоритмов формирования и упорядочения трафика вычислительных сетей на участках доступа. Разработаны модели регуляторов типа «маркерное ведро» с различными методами назначения приоритетов трафика. Предложены алгоритмы формирования трафика, используя которые, можно получать требуемое качество сервиса и скорости обработки входных потоков данных*

### **Введение**

На сегодняшний день виртуальные частные сети (VPN) и сети доступа, основанные на технологии *Ethernet*, по критерию эффективность-стоимость превосходят существующие технологии ретрансляции кадров и ATM. Благодаря применению протоколов модифицированного *QoS* и условий соглашения об уровне обслуживания (*Service Level Agreement – SLA*) они обеспечивают требуемый уровень качества и надежности, но при меньшей стоимости. Поэтому исследование характеристики качества сервиса (*Quality of Service – QoS*) при использовании адаптивных алгоритмов маркерного ведра является важной задачей. В работе [1] рассмотрены математические модели методов регулирования трафика с применением алгоритмов дырявого и маркерного ведер [2 – 5].

Здесь описываются новые особенности подхода к *QoS* применительно к объединенным коммутаторам третьего уровня *Ethernet* и маршрутизаторам – измерение пропускной способности, вероятности перегрузки, общая планируемая и виртуальная пропускная способность.

### **Постановка задачи**

Предоставление услуг широкополосного доступа позволяет, с одной стороны, удовлетворить требования пользователей и получить наибольший доход от введения новых услуг, но, с другой стороны, требует больших затрат на построение самих сетей доступа (СД).

Вследствие необходимости обеспечения высокой надежности и живучести наблюдается еще больший рост стоимости этих сетей. Стоимость создания СД, составлявшая ранее до 50-70% стоимости локальных сетей [6], в настоящее время еще повышается. Соответственно, возрастает актуальность задачи оптимального построения СД, особенно выбора базовой топологии ее создания.

Сегодня более 95% всех приложений начинаются и заканчиваются в сетях *Ethernet*. Отправка пакетов и транспорт их через сети *Ethernet* сокращает затраты благодаря исключению конверсии протоколов и других межсетевых операций.

Кроме того, поскольку услуги *Ethernet* могут быть доставлены по различным транспортным сетям, провайдер может использовать существующую инфраструктуру сети, чтобы обеспечить больший доход за предоставленные услуги.

В локальных сетях виртуального частного сервиса (сетях *VPLS*) необходимо обеспечить доставку кадров *Ethernet* через глобальные сети для корпоративных клиентов и механизмы мультисервисной доставки для конечных пользователей.

Приоритетность и управление временем ожидания и джиттером изображения важна для обеих этих услуг, но особенно для мультисервисных приложений. Для доставки голосового и телевизионного трафика с требуемым качеством необходимо обеспечивать управление этими потоками трафика в сетях доступа на основе

*Ethernet*. Коммутационные узлы *Ethernet* должны обеспечивать эффективное формирование трафика, чтобы согласовать интенсивность передаваемого трафика с установленными пределами пропускной способности. Гарантии сервиса описываются так называемым профилем пропускной способности на основе определения типов трафика и измерения интенсивности каждого типа трафика, посылаемого в сеть. Для того, чтобы сервис соответствовал гарантии

Таблица 1.

Возможности и механизмы обеспечения <i>QoS</i>	Традиционное <i>QoS</i>	Модифицированное <i>QoS</i>
Классификация	+	+
Измерение	-	+
Механизмы упорядочения и формирования трафика	+	+
Маркировка пакетов	+	+
Построение кривых случайного раннего обнаружения	-	+
Буферизация и постановка в очередь	+	+
Планирование заданий	-	+
Формирование виртуальной полосы пропускания	-	+

### Требования к модифицированному *QoS*

Для новых приложений необходима более широкая функциональность *QoS*, в частности, измерение пропускной способности. Для этого требуется конкретизация профиля пропускной способности с учетом пакетов, переданных на порт коммутатора с согласованной (в среднем) скоростью передачи, и пакетов со скоростью, равной или выше предельной. Пакеты, скорость которых не превышает согласованную скорость, пропускаются в сеть и доставляются в соответствии с соглашением об уровне обслуживания или спецификацией уровня обслуживания (*Service Level Specification – SLS*). Скорость этих пакетов соответствует профилю пропускной способности.

Пакеты, скорость которых выше согласованной, но ниже предельной скорости, не отвечают профилю пропускной способности. Они также проходят в сеть, но доставляются без гарантий сервиса. Пакеты, скорость которых превышает предельную, отбрасываются.

Обычно для измерения профиля пропускной способности применяют одну из

доставки, в коммутационном оборудовании должны быть предусмотрены назначение относительных приоритетов различным типам трафика, управление временем ожидания и джиттером специфических потоков трафика. В табл. 1 приведены сравнительные характеристики традиционного и модифицированного подходов к обеспечению *QoS*.

двух совокупностей количественных и качественных (сравнительных) оценок: “два разряда – три цвета” или “один разряд – три цвета”. В обоих методах пакеты окрашиваются в зависимости от их соответствия соглашению об уровне обслуживания.

Термины “зеленый”, “желтый” и “красный” пакеты используются для сравнительной оценки соответствия параметров потока профилю пропускной способности.

Если пакеты соответствуют средней согласованной скорости профиля пропускной способности, они окрашиваются в зеленый цвет и доставляются в соответствии с гарантиями сервиса, указанными в соглашении об уровне обслуживания. Если скорость пакетов превышает среднюю согласованную, но их скорость ниже предельной скорости профиля пропускной способности, они окрашиваются в желтый цвет и доставляются без гарантий сервиса (обслуживание с наибольшими усилиями – *Best Effort* [5]). Если параметры потока пакетов не соответствуют ни средней согласованной, ни предельной

скорости профиля пропускной способности, они обозначаются красным и обычно отбрасываются немедленно.

Процесс измерения по шкале “два разряда, три цвета”, также известный как “измерение по двум нормам”, обычно осуществляется с помощью алгоритма маркерного ведра. Для определения профиля пропускной способности используются четыре параметра измерения по двум нормам.

1. Два предела пропускной способности:

- средняя интенсивность потока ( $C_{IR}$ ) – норма, вплоть до которой пакеты окрашиваются в зеленый цвет. Эти пакеты обозначаются как  $C_{IR}$ -согласованные;

- предельная интенсивность потока ( $E_{IR}$ ) – норма, вплоть до которой пакеты пропускаются в сеть. Пакеты, интенсивность потока которых превышает  $E_{IR}$ , окрашиваются в красный цвет. Они не соответствуют нормам и, как правило, отбрасываются.

2. Два размера групп пакетов:

- размер группы пакетов, согласованный (в среднем) с профилем пропускной способности ( $C_{BS}$ );

- предельный размер группы пакетов ( $E_{BS}$ ).  $E_{IR}$ , по определению, больше или равна  $C_{IR}$ . Пакеты, интенсивность потока которых выше  $C_{IR}$ , но ниже  $E_{IR}$ , окрашиваются в желтый цвет. Поскольку эти пакеты не согласованы с  $C_{IR}$ , гарантий относительно их доставки не дается.

Поскольку интенсивность трафика может колебаться в широких пределах, и могут иметь место кратковременные всплески, при двухразрядной трехцветной градации измерения предусматривается возможность всплеска интенсивности выше согласованной информационной нормы ( $C_{IR}$ ) и предельной информационной нормы ( $E_{IR}$ ) на определенную величину без маркировки пакетов желтым или красным цветом соответственно. Назовем такую промежуточную окраску условной.

Согласованный размер группы пакетов ( $C_{BS}$ ) – это максимальное число байт, на которое допускается всплеск интенсивности потока пакетов выше  $C_{IR}$ . Пакеты все еще окрашиваются в зеленый цвет.

Предельный размер группы пакетов ( $E_{BS}$ ) – это максимальное число байт, на которое допускается всплеск интенсивности потока пакетов выше  $E_{IR}$ . Пакеты все еще окрашиваются в желтый цвет.

Когда размер группы пакетов превышает  $E_{IR}$ , пакеты окрашиваются в красный цвет.

### ***Применение модели маркерного ведра для построения адаптивных алгоритмов формирования и упорядочения трафика***

Дадим некоторые важные определения.

1. Генератор маркеров  $ГМ_E$  сбрасывает в ведро  $E$  маркеры со скоростью  $E_{IR}$  в секунду. Если ведро заполнено, лишние маркеры отбрасываются. Время заполнения  $t_{IE} = E_{BS}/E_{IR}$ .

2. Генератор маркеров  $ГМ_C$  сбрасывает в ведро  $C$  маркеры со скоростью  $C_{IR}$  в секунду. Если ведро заполнено, лишние маркеры отбрасываются. Время заполнения  $t_{IC} = C_{BS}/C_{IR}$ .

3. Маркеры накапливаются в ведрах  $E$  и  $C$ . Общая длина временного интервала, занимаемого маркером в ведре  $E$ , равна  $\tau_e = \tau_{ie} + \tau_{ge}$ , где  $\tau_{ie}$  – длительность маркера в ведре  $E$ ;  $\tau_{ge}$  – длина защитного интервала. Общая длина временного интервала, занимаемого маркером в ведре  $C$ , равна  $\tau_c = \tau_{ic} + \tau_{gc}$ , где  $\tau_{ic}$  – длительность маркера в ведре  $C$ ;  $\tau_{gc}$  – длина защитного интервала.

Число маркеров в ведре  $E$  равно  $n_e$ , в ведре  $C$  равно  $n_c$ . Тогда общий суммарный размер маркеров в ведре  $E$  равен  $T_e = n_e \cdot \tau_e$ , в ведре  $C$  равен  $T_c = n_c \cdot \tau_c$ .

Длительность прибывающего пакета обозначим через  $p_s$ .

4. Адаптацию к изменению длительности поступающих пакетов можно осуществлять следующим образом:

- изменяя длительность маркера при постоянной длительности защитного интервала;

- изменяя длительность защитного интервала при постоянной длительности маркера.

И в том, и в другом случае скорости  $E_{IR}$  и  $C_{IR}$  будут меняться до пределов, которые зависят от максимальной пропускной способности коммутационного узла.

Адаптироваться к изменению средней интенсивности пакетов целесообразно путем изменения скоростей  $E_{IR}$  и  $C_{IR}$ .

На рис. 1 изображен график процесса окраски пакетов в зависимости от результатов измерения. Алгоритм измерения используется в модели маркерного ведра. В соответствии с алгоритмом определяется, какие пакеты имеют параметры, находящиеся в пределах допустимой пропускной способности, и для каких пакетов эти пределы превышены.

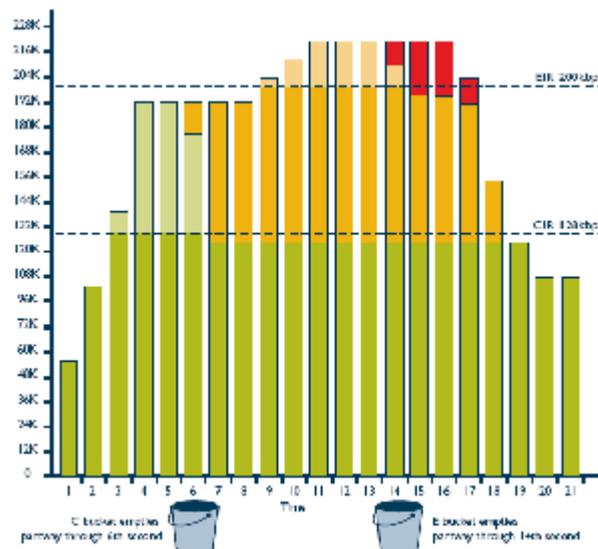


Рис. 1. График двухрядного измерения параметров потока с трехцветной окраской пакетов  $C_p$  – пропускная способность сети. 1 – зеленые пакеты. 2 – пакеты с (условно) зеленой окраской, при кратковременном превышении  $C_{IR}$  не более чем на  $m$  секунд. 3 – желтые пакеты, интенсивность потока которых выше  $C_{IR}$ , но ниже  $E_{IR}$ . 4 – пакеты с (условно) желтой окраской, при кратковременном превышении  $E_{IR}$  не более чем на  $n$  секунд,  $n > m$ . 5 – красные пакеты

В рассматриваемой модели используются два ведра, одно с объемом, равным  $C_{BS}$  (ведро  $C$ ), другое – с объемом, равным  $E_{BS}$  (ведро  $E$ ). Маркеры поступают в ведра со скоростями, равными  $C_{IR}$  и  $E_{IR}$  соответственно. Одновременно каждый раз, когда отправляется очередной пакет или группа пакетов, группа маркеров, длительность которой численно равна длительности группы пакетов, уходит из ведер. Пока ведро  $C$  не опустошено, пакеты окрашиваются в зеленый цвет.

Когда ведро  $C$  опустошено, а ведро  $E$  еще заполнено, хотя бы частично, пакеты окрашиваются в желтый цвет. В периоды, когда оба ведра опустошаются, пакеты окрашиваются в красный цвет. На рис. 2

изображена алгоритмическая схема процесса окраски.

Другой часто используемый метод измерения – одноразрядный с трехцветной окраской. В этом процессе задается только один предел пропускной способности, но два размера групп пакетов (см. рис. 3; отметим отсутствие условно желтых пакетов).

Алгоритм, используемый в этом процессе, может также быть описан на основе аналогии маркерного ведра. При одноразрядном измерении с трехцветной окраской также используются два ведра с объемами, равными  $C_{BS}$  и  $E_{BS}$ . Первое ведро наполняется маркерами до нормы, равной  $C_{IR}$ , а избыток маркеров переливается во второе ведро.

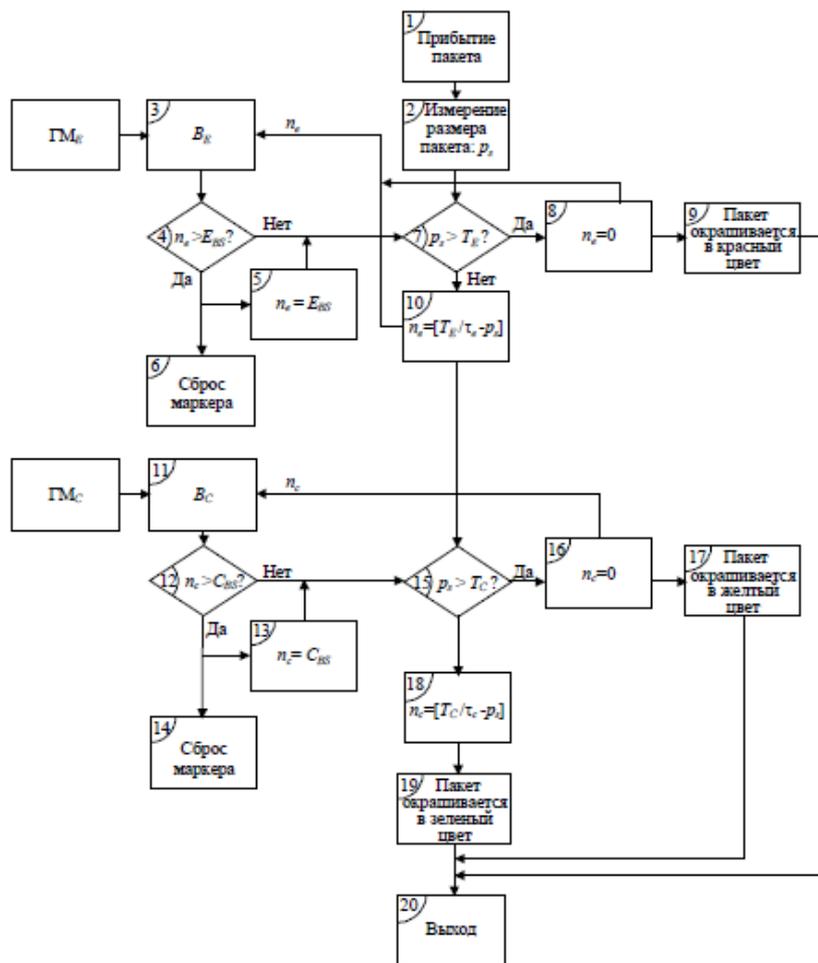


Рис. 2. Алгоритм двухразрядного измерения с трехцветной окраской

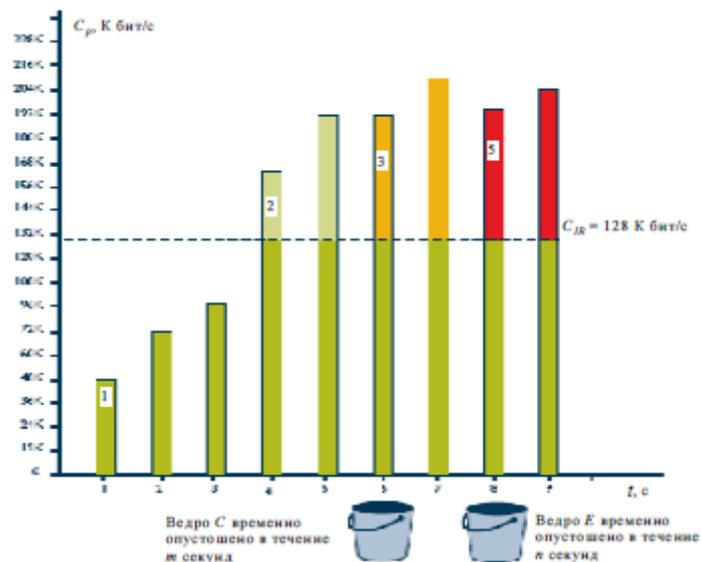


Рис. 3. Одноразрядные измерения с трехцветной окраской. 1 – зеленые пакеты. 2 – условно зеленые пакеты. 3 – желтые пакеты. 5 – красные пакеты

Когда пакеты уходят, маркеры удаляются из ведер. Если первое ведро не опустошено, пакеты окрашиваются в зеленый цвет. Если первое ведро опустошено, но второе заполнено хотя бы частично, пакеты окрашиваются в желтый цвет.

Когда оба ведра опустошены, пакеты окрашиваются в красный цвет. На рис.

4 изображена алгоритмическая схема процесса измерения. Процессы, описанные выше, определяются как измерение “вслепую”. Другими словами, пакеты не имеют никакого подтверждения соответ-

ствия, сделанного до того, как они придут в измеритель. Априори принимается, что перед началом процесса измерения все пакеты окрашены в зеленый цвет. Они

окрашиваются в желтый или красный цвета, только если класс трафика превышает лимиты пропускной способности на данном устройстве.

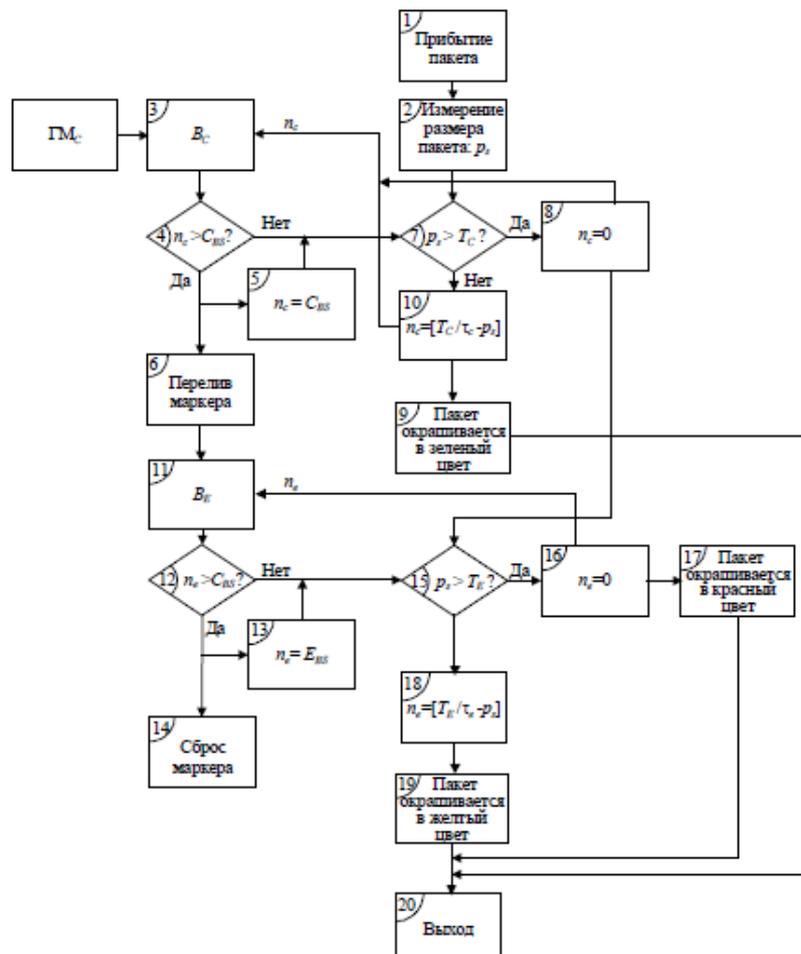


Рис. 4. Алгоритм одноразрядного измерения с трехцветной окраской

При измерении с предварительным окрашиванием пакеты могут быть размечены при прохождении предыдущего узла. Когда красный пакет входит в измеритель, его цвет не меняется. Если в измеритель входит желтый пакет, он может быть маркирован красным, если превышены предельная пропускная способность и максимальный размер пакета. В остальных случаях цвет окраски сохраняется. По методу явного окрашивания устройство не будет помечать несоответствующие или неопределенные пакеты как соответствующие.

Далее необходимо оповестить последующие сетевые узлы о цвете пакетов. Как упомянуто выше, гарантия доставки предоставляется только для зеленых пакетов. Для того, чтобы услуга соответствовала *SLA*,

узлам нужно знать, какой цвет имеют пакеты. Эта задача решается путем перемаркировки значений полей 802.1p и/или *DSCP* в пакетах в соответствии с результатами измерения. Сетевой узел определяет значения 802.1p/*DSCP*, используемые для окраски пакета в другой цвет.

### **Упорядочение или формирование**

Как отмечено выше, красные пакеты обычно отбрасываются. Однако немедленное отбрасывание красных пакетов это метод, известный как упорядочение (обслуживание). Альтернативный метод работы с несоответствующими пакетами известен как формирование.

Механизм формирования вытекает из правила постановки пакетов в очередь. Каждый порт выхода имеет набор исхо-

дящих очередей, для которых установлены различные приоритеты или веса. С помощью механизмов *QoS* пакеты размещаются в соответствующей исходящей очереди. Естественно, все очереди имеют ограниченную длину, так что пакеты не могут размещаться в них до бесконечности. Если буфер коммутатора переполнен, будут отбрасываться даже пакеты с высоким приоритетом.

В процессе формирования вместо простого отбрасывания всех красных пакетов используются более совершенные правила постановки пакетов в исходящие очереди. Правила различны для каждого цвета пакета. Зеленые пакеты подчиняются самым мягким правилам, и большинство этих пакетов будет передано в исходящую очередь.

Правила для желтых пакетов более строги, поэтому их число в исходящей очереди меньше. Самые строгие правила – для красных пакетов, особенно, при переполнении буфера.

Есть множество классов трафика, проходящего через устройство, каждый со своими лимитами пропускной способности. Для класса трафика с превышением лимита можно использовать пропускную способность, выделенную для других потоков трафика, интенсивность которых ниже лимита пропускной способности. Если же все потоки трафика находятся на пределе пропускной способности, формирователь запрещает использовать чужие ресурсы пропускной способности.

Самый общий метод, используемый для организации селективного доступа пакетов в исходящие очереди – это случайное раннее обнаружение/сброс (*Random Early Detection – RED*).

### **Случайное раннее обнаружение/сброс**

При перегрузке пакеты по методу *RED* начинают отбрасываться до того, как исходящая очередь превысит назначенную максимальную длину. Уровни *RED* используются для отбрасывания пакетов с меньшими весами, а затем и пакетов с большими весами, до тех пор, пока затор не ликвидируется.

Кривая уровней *RED* состоит из набора значений “старт”, “стоп”, “сброс”. Этими тремя значениями определяется нелинейная функция, изображенная на рис. 5.

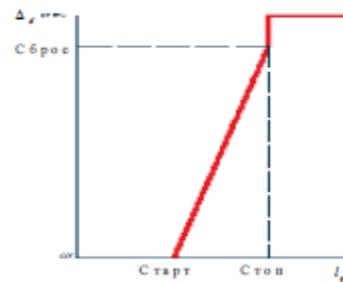


Рис. 5. Одиночная кривая *RED*.  $\Delta_d$  – процент отброшенных пакетов;  $l_q$  – длина очереди

Параметром “Старт” определяется максимальная длина очереди перед началом отбрасывания пакетов. Параметром “Стоп” определяется длина, которой очередь должна достичь перед тем, как формирователь остановит сброс по случайному закону. В дальнейшем будут отбрасываться только следующие пакеты. Параметром “Сброс” определяется процент пакетов, которые отброшены до момента, когда длина очереди достигает значения “Стоп”. По существу, значением параметра “Сброс” определяется, как быстро должна возрасти норма отбрасывания пакетов, так как длина очереди растет от значения “Старт” к значению “Стоп”.

Эти фундаментальные кривые собраны в группы кривых *RED*. Группа – это набор трех кривых, один для каждого из трех возможных цветов пакета. Таким образом, красные пакеты начинают отбрасываться, когда лишь небольшая часть данных возвращается в исходящие очереди, желтые пакеты отбрасываются, когда возврат в очереди увеличивается, и зеленые пакеты начинают отбрасываться, когда затор достаточно велик.

### **Смешанное планирование**

Общая задача сетевого планирования (маркировки, измерения и применения алгоритма *RED*) – установить очередность продвижения пакетов. В процессе планирования определяется дисциплина обслуживания – выбора пакетов из раз-

ных очередей и передачи. Существует ряд различных алгоритмов планирования. От выбора алгоритма зависит способ передачи пакетов.

Алгоритмы планирования делятся на две основные категории – приоритетное планирование и планирование по круговой системе (циклическое планирование).

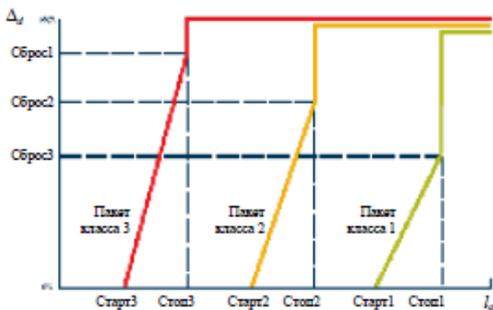


Рис. 6. Группа кривых *RED*.  $\Delta_d$  – процент отброшенных пакетов;  $l_q$  – длина очереди

В случае приоритетного планирования очереди согласованы с набором приоритетов. Пакеты с высшим приоритетом ставятся в очередь наименьшей задержкой. Если возникает очередь пакетов с высшим приоритетом, они передаются прежде пакетов с низшим приоритетом. Поэтому, если имеется интенсивный трафик пакетов с высшим приоритетом, шансы отправки пакетов из очереди с более низким приоритетом будут нулевыми.

При использовании циклической системы планирования очереди имеют место возвраты в пересылке пакетов. Существуют различные алгоритмы циклического планирования:

- простая круговая система;
- нагруженная круговая система;
- круговая система с дефицитом нагрузки;
- самосинхронизирующаяся справедливая очередь.

Лучшим решением считается использование смешанного механизма назначения приоритетов и круговой системы планирования. Со смешанным планированием очереди трафика делятся на два набора – один набор очередей действует согласно приоритетному планированию, и один набор действует согласно

планированию по круговой системе. Приоритетные очереди имеют преимущество в обслуживании перед очередями круговой системы.

При использовании смешанной системы планирования неэластичный узкополосный трафик, чувствительный к задержкам, ставится в приоритетную очередь, а эластичный широкополосный трафик ставится в циклическую очередь. Это гарантирует минимизацию задержек неэластичного трафика, так как приоритетные очереди обслуживаются в предпочтении к очередям круговой системы. Поскольку приоритетный трафик является узкополосным, проблем с потерями низкоприоритетного трафика не возникнет. Даже если поток трафика, направленный в одну из циклических очередей, имеет высокую интенсивность, это не может привести к застою другой круговой очереди.

Смешанное планирование является эффективным компромиссом, который объединяет преимущества двух типов планирования, и позволяет избегать их недостатков, обеспечивая оптимальное распределение потоков трафика в очереди.

Если к одной исходящей очереди пересылается более одного класса трафика, и полная пропускная способность, выделенная для всех классов, ограничена, для общей очереди выхода может быть назначен лимит пропускной способности. Лимитирование пропускной способности известно как применение виртуальной пропускной способности к исходящей очереди.

Виртуальная пропускная способность ограничивает норму, в которой очередь выхода может выпустить пакеты, которые могут также заставить пакеты накапливаться в очереди. Когда пакеты накапливаются в очереди, включается механизм кривых *RED*, и принимают решения, об отбрасывании некоторых пакетов.

Виртуальная пропускная способность обеспечивает гибкость благодаря

тому, что интенсивности потоков трафика согласуются с доступной пропускной способностью.

Можно объединить три процесса измерения, кривые *RED* и механизмы выбора виртуальной пропускной способности, чтобы обеспечить большую гибкость, чем простое решение *QoS*, которое только конфигурирует класс трафика с отбрасыванием красных пакетов.

Обычно трудно предсказать, какие порты *UDP* будут использоваться в сеансах передачи голоса или видео и требуют модифицированного *QoS*. Поэтому для обмена параметрами установки сеанса, мониторинга и динамической классификации пакетов при передаче голоса и видео в сеансе связи используется динамическое распознавание приложений (*Dynamic Application Recognition – DAR*).

В процессе *DAR* коммутационное устройство анализирует сообщения об инициировании сеанса передачи речевых или видео данных. Эти сообщения поступают на интерфейс и сравниваются с заранее сконфигурированным объектом *DAR*. Объект *DAR* сообщает устройству о типе сеанса, с которым необходимо согласовать параметры интерфейса. Далее устройство создает динамический классификатор для организации сеанса и использует динамический классификатор, чтобы отсортировать пакеты голоса и видео в соответствующие классы трафика и применить обработку *QoS*.

### **Выводы**

1. В настоящее время более 95% всех приложений начинаются и заканчиваются в сетях *Ethernet*. Отправка пакетов и транспорт их через сети *Ethernet* сокращает затраты благодаря исключению конверсии протоколов и других межсетевых операций. Кроме того, поскольку услуги *Ethernet* могут быть доставлены по различным транспортным сетям, провайдер может эффективно использовать существующую инфраструктуру сети. Мультисервис на

основе *Ethernet* должен быть способен обеспечивать управление потоками разнородного трафика с гарантированным качеством.

2. Для обеспечения требуемого качества сервиса и мультисервисного обслуживания в сетях доступа *Ethernet* необходимо использовать различные смешанные механизмы формирования и упорядочения трафика. Это могут быть алгоритмы дырявого и маркерного ведер, назначение приоритетов трафика методом маркирования потоков (окрашивания пакетов в красный, желтый или зеленый цвета) и алгоритмы случайного раннего обнаружения с взвешиванием маркированных потоков. Рассмотренные алгоритмы можно использовать как отдельно друг от друга, так и совместно.

3. В дальнейшем планируется исследовать статистическую динамику алгоритмов адаптивного формирования и упорядочения трафика с использованием марковских моделей процессов прохождения трафика как альтернирующих процессов восстановления.

### **Список литературы**

1. Чанг Шу. Математические модели алгоритмов регулирования и формирования трафика // Проблеми інформатизації та управління. Зб. наук. пр.: Вип. 1 (19). – К.: НАУ, 2007. – С. 154–162.
2. Столлингс В. Современные компьютерные сети. 2-е издание. – СПб.: Питер, 2003. – 783 с.
3. Heinanen, J. and R. Guerin, “A Single Rate Three Color Marker”, RFC 2697, September 1999. – 245 с.
4. Heinanen, J. and R. Guerin, “A Two Rate Three Color Marker”, RFC 2698, September 1999. – 368 с.
5. Таненбаум Э. Компьютерные сети. 4-е изд. – СПб.: Питер, 2003. – 992 с.
6. Соколов В.Н. Сети абонентского доступа. Принципы построения. – М.: – ЗАО “Энтер-профи”. – 1999. – 254 с.