

УДК 621.39

**И.В. Дегтяренко (канд. техн. наук, доц.), В.Н. Лозинская**  
ГВУЗ Донецкий национальный технический университет, г. Донецк  
кафедра «Автоматика и телекоммуникации»  
E-mail: ilya\_degtyarenko@ukr.net, lvn\_04@mail.ru

## **ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ ТРАФИКОМ В СЕТЕВОМ УЗЛЕ**

*Разработаны динамические модели планировщика, как средства управления трафиком в сетевом узле. Представленные модели позволяют повысить эффективность использования сетевых ресурсов за счет управления размерами буферного пространства каждой из очередей планировщика. Предложенные математические модели отражают динамику работы планировщиков в пространстве состояний, а переход в базис Мах-plus алгебры позволяет получить заданные оценки, с учетом необходимых параметров качества обслуживания.*

**Ключевые слова:** *параметры качества обслуживания, средства управления трафиком, дисциплина обслуживания очереди, Мах-plus алгебра, дискретно-событийная система, пространство состояний*

### **Общая постановка проблемы**

Обеспечение необходимого уровня качества предлагаемых услуг является основополагающей функцией общей системы управления в современных телекоммуникационных сетях (ТКС) [1]. Одним из средств обеспечения заданного качества обслуживания (QoS) [2] является концепция Traffic Engineering, в рамках которой «заложены» средства управления трафиком, как на отдельном сетевом узле, так и в сети в целом. Иерархичность и мультисервисность современных ТКС стали причиной усложнения задач управления сетью в целом, переместив при этом часть функций управления в управляемый сетевой узел (коммутатор, маршрутизатор).

На данный момент в рамках сетевого узла, в зависимости от модели качества обслуживания предоставляемых услуг (Integrated Service, Differentiated Service), реализованы такие средства управления как: функции «управления допустимостью соединения», классификация пакетов, планировщик, протокол резервирования ресурсов [3]. Особенностью многих видов сетевого оборудования является ограниченность всех вышеперечисленных функций. Это связано с невозможностью перенастройки алгоритмов и введения новых, если это потребуется. Однако, с появлением концепции открытых программно-конфигурируемых сетей (SDN) [4], у поставщиков телекоммуникационных услуг появилась возможность перенастраивать политики планирования с целью повышения эффективности использования сетевых ресурсов.

Так как задачи управления трафиком с учетом эффективности использования сетевых ресурсов, при заданном качестве обслуживания, стали основополагающими в русле управления ресурсами ТКС, то разработка математических моделей алгоритма эффективного управления трафиком, является актуальной проблемой для исследований.

Целью данной работы является разработка динамических моделей работы планировщиков в современных ТКС для нахождения оптимальной величины буферного пространства очередей планировщика, при обеспечении заданных параметров качества обслуживания.

### **Анализ существующих алгоритмов планировщиков**

Алгоритмы планирования обслуживания очередей, как было упомянуто выше, относятся к классу средств, реализованных непосредственно в сетевых узлах. За счет основной функции планировщика, сглаживания профиля трафика, можно достичь таких целей как уменьшение пачечности трафика, повышение эффективности использования канальных ресурсов, осуществление защиты от перегрузки, при обеспечении заданных параметров QoS. Наибольшее распространение в телекоммуникационных сетях получили следующие алгоритмы как DRR, PQ, CQ, LLQ, WFQ, CWFQ и др. Все эти алгоритмы можно разделить на несколько классов [5-8]:

- без приоритетного обслуживания (DRR);
- приоритетного обслуживания (CQ, PQ);
- взвешенного обслуживания (WFQ, PGPS, W2FQ);
- гибридные (LLQ, CWFQ).

На данный момент планировщики без приоритетного обслуживания «трансформировались» в средства циклического обслуживания очередей в сетевом устройстве. Именно поэтому данный класс не будет подробно рассматриваться.

Алгоритмы приоритетного обслуживания - обслуживают очереди, согласно их приоритетам. Существует 4 класса очередей при приоритетном обслуживании: High, Medium, Normal, Low. Пакеты попадают в очереди соответственно значению класса обслуживания в поле ToS. Логика работы такого класса планировщиков в следующем: если активна более приоритетная очередь, то из нее обслуживаются все пакеты, затем обслуживание получает очередь, приоритет у которой ниже и т.д. Из логики работы данного алгоритма, очевидно, что постоянное наличие высокоприоритетного трафика в очереди приведет к значительным потерям низкоприоритетного трафика. Исключение данного недостатка возможно путем применения алгоритмов взвешенного обслуживания очередей.

Алгоритмы взвешенного обслуживания очередей на данный момент является самым распространенным классом планировщиков, реализованных в сетевых устройствах. Логика работы данных планировщиков сводится к определению так называемых весов для обслуживания пакетов. Фактически вес определяет долю пропускной способности выходного интерфейса, которую необходимо предоставить для обслуживания каждой из очередей, формируемых согласно договору о предоставлении обслуживания (SLA). В итоге, каждый из пакетов, находящихся в любой из очередей, получает обслуживание. К недостаткам данного класса планировщика можно отнести низкую скорость обработки, что является достаточно критичным для приложений, чувствительных к временным задержкам. Для устранения этого недостатка разработчики предложили ряд гибридных алгоритмов.

Наиболее известным гибридным алгоритмом, который реализован в сетевом оборудовании большинства производителей, остается алгоритм очередей с малыми задержками (Low Latency Queue - LLQ). В данном алгоритме для трафика, чувствительного к задержкам, выделяется одна очередь, для обслуживания которой резервируется определенная пропускная способность исходящего интерфейса, а все остальные очереди обслуживаются в соответствии с алгоритмом взвешенного обслуживания. В этом случае также настраиваются доли пропускных способностей исходящего интерфейса для каждой очереди. Рассмотрим детально алгоритм взвешенного обслуживания очередей и алгоритм очереди с малыми задержками.

### **Алгоритм взвешенного обслуживания очередей**

Реализация алгоритмов планировщиков с взвешенным обслуживанием очередей основана на вычислении значения функции «виртуального времени» ( $V(t)$ ) Функция «виртуальное время» отображает количество циклов, пройденных планировщиком к моменту времени  $t$ . Исходя из значений этой функции, вычисляется значение параметра «время окончания обслуживания»:

$$F_{i,k} = S_{i,k} + \frac{L_{i,k}}{r_i}, \quad (1)$$

$$S_{i,k} = \max\{F_{i,k-1}, V(a_{i,k})\}, \quad (2)$$

где  $F_{i,k}$  - значение параметра «время окончания обслуживания»  $k$ -го пакета  $i$ -го потока;  $S_{i,k}$  - значение параметра «время поступления»  $k$ -го пакета  $i$ -го потока в очередь;  $L_{i,k}$  - длина  $k$ -го пакета,  $i$ -го потока;  $r_i$  - величина пропускной способности, выделяемая для обслуживания  $i$ -го потока;  $V(a_{i,k})$  - значение функции «виртуальное время» в момент времени  $a_{i,k}$  для  $k$ -го пакета  $i$ -го потока.

Для формализации задачи об эффективном использовании пропускной способности исходящего канала (канала выходного интерфейса, например) с заданным качеством обслуживания введем следующие ограничения:

$$\mathbf{d} \leq \mathbf{d}_{\max}, \quad (3)$$

$$\mathbf{r}^{\text{был}} \leq \mathbf{r}^{\text{треб}}, \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^N r_i^{\text{был}} \leq C, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (5)$$

где  $\mathbf{d}_{\max}$  - вектор максимально допустимых задержек для потоков в очередях;  $N$  - число «бэжлог» потоков и размерность векторов;  $\mathbf{r}^{\text{треб}}$  - вектор требуемых, согласно SLA, интенсивностей обслуживания очередей;  $\mathbf{r}^{\text{был}}$  - вектор интенсивностей обслуживания потоков;  $C$  - скорость выходного интерфейса, по которому происходит передача.

Оптимизационная задача эффективного использования канального ресурса планировщиком может быть сформулирована следующим образом [9]:

$$\frac{\sum_{i=1}^N r_i^{\text{был}}}{C} \rightarrow 1, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (6)$$

Исходя из логики работы планировщика, интенсивность обслуживания потоков можно оценить по формуле:

$$\mathbf{r}^{\text{был}} = \frac{\mathbf{L}(k+1)}{\mathbf{F}(k+1) - \mathbf{F}(k)}. \quad (7)$$

Решение поставленной оптимизационной задачи сводится к нахождению необходимого времени нахождения пакетов в буферах различных очередей, что может быть интерпретировано как внесение некоторых задержек  $\mathbf{D}$  в процесс обслуживания каждой из очередей. Особенность решения поставленной оптимизационной задачи сводится к тому, что вектор  $\mathbf{r}^{\text{был}}$  может быть задан в зависимости от поставленной задачи.

Решение поставленной оптимизационной задачи сводится к нахождению величин интенсивностей обслуживания, удовлетворяющих выражению (6) с ограничениями (3-5). В общем случае значения выходных интенсивностей могут быть рассчитаны один раз на все время работы планировщика. Недостатком математической модели планировщика представленной выражениями (1) и (2) является невозможность синхронной работы нескольких очередей. В работе [10] автором предлагалась дискретно-событийная модель процесса обслуживания пакетов с буфером ограниченной величины. Для внесения синхронизации в работу нескольких очередей воспользуемся эти же подходом.

Рассмотрим следующую дискретно-событийную модель управления планировщиком с 3-мя очередями, представленную на рис. 1. События соответствуют поступлениям пакетов на вход планировщика, например от классификатора. Через время  $q_1, q_2, q_3$  пакеты помещаются

в соответствующие буфера емкостью  $N_1, N_2, N_3$ . По мере формирования управляющих воздействий  $u_1, u_2, u_3$  пакеты извлекаются из буферов и обслуживаются с временами обслуживания  $e_1, e_2, e_3$ . По мере поступления управляющих воздействий  $u_4, u_5, u_6$  пакет поступает в сеть, а планировщик начинает обслуживать следующую очередь. Для описания динамики работы модели перейдем к уравнениям в пространстве состояний.

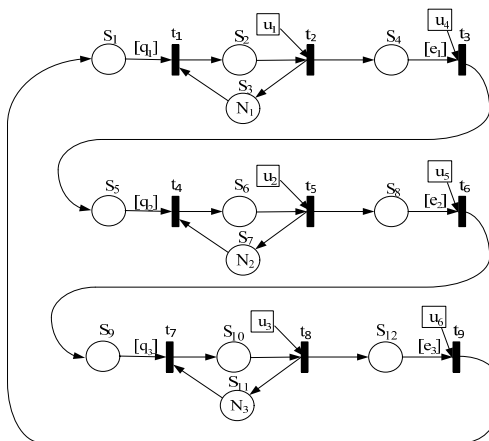


Рисунок 1 - Временно-событийный граф с несколькими управляемыми переходами

Моменты  $k$ -х запусков  $t_i$  переходов соответствуют переменным  $x_i(k)$ . В соответствии с представленным временно-событийным графом уравнения состояний системы примут вид:

$$\begin{aligned}
 x_1(k+1) &= x_2(k - N_1 + 1) \oplus q_1 \cdot x_9(k+1), \\
 x_2(k+1) &= x_1(k+1) \oplus u_1(k+1), \\
 x_3(k+1) &= x_2(k+1) \oplus e_1 \cdot u_4(k+1) \\
 x_4(k+1) &= x_5(k - N_2 + 1) \oplus q_2 \cdot x_3(k+1), \\
 x_5(k+1) &= x_4(k+1) \oplus u_2(k+1), \\
 x_6(k+1) &= x_5(k+1) \oplus e_2 \cdot u_5(k+1) \\
 x_7(k+1) &= x_8(k - N_3 + 1) \oplus q_3 \cdot x_6(k+1), \\
 x_8(k+1) &= x_7(k+1) \oplus u_3(k+1), \\
 x_9(k+1) &= x_8(k+1) \oplus e_3 \cdot u_6(k+1).
 \end{aligned} \tag{8}$$

Или в матрично-векторной форме:

$$\mathbf{x}(k+1) = \underbrace{\begin{pmatrix} \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & q_1 \\ e & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & e & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & q_2 & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & e & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & e & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & q_3 & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & e & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & e & \varepsilon \end{pmatrix}}_{=A_0} \cdot \mathbf{x}(k+1) \oplus \dots \oplus \underbrace{\begin{pmatrix} \varepsilon & e & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \end{pmatrix}}_{=A_{N_1}} \cdot \mathbf{x}(k+1)$$

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{x}(k - N_1 + 1) \oplus \underbrace{\begin{pmatrix} \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & e & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \end{pmatrix}}_{=\mathbf{A}_{N_2}} \cdot \mathbf{x}(k - N_2 + 1) \oplus \underbrace{\begin{pmatrix} \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & e & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \end{pmatrix}}_{=\mathbf{A}_{N_3}} \cdot \\
 & \cdot \mathbf{x}(k - N_3 + 1) \oplus \underbrace{\begin{pmatrix} \varepsilon \\ e \\ \varepsilon \\ e_1 \\ e \\ e_2 \\ \varepsilon \\ e \\ e_3 \end{pmatrix}}_{=\mathbf{B}_0} \cdot \mathbf{u}(k + 1),
 \end{aligned}$$

где  $\mathbf{x}(k) = (x_1(k) \ x_2(k) \ x_3(k) \ x_4(k) \ x_5(k) \ x_6(k) \ x_7(k) \ x_8(k) \ x_9(k))^T$ , а все матрицы  $\mathbf{A}_i = \mathbf{N}$ ,  $i = 2, N_l - 1$ ,  $l = 1, 2, 3$ . Изначально буферы каждой из очередей равны. Перепишем (8) в явном виде и для удобства представления разделим вектора управления на два различных следующим образом ( $u(k + 1), u_1(k + 1)$ ):

$$\mathbf{x}(k + 1) = \mathbf{A}_0^* \cdot (\mathbf{A}_1 \cdot \mathbf{x}(k) \oplus \mathbf{A}_2 \cdot \mathbf{x}(k - 1) \oplus \dots \oplus \mathbf{B}_0 \cdot u(k + 1) \oplus \mathbf{B}_1 \cdot u_1(k + 1)). \tag{9}$$

Введем обозначения:  $\tilde{\mathbf{x}}(k) = (\mathbf{x}(k)^T \ \mathbf{x}(k - 1)^T \ \dots \ \mathbf{x}(k - N_q + 1)^T)^T$ ,  $\tilde{u}(k) = u(k + 1)$ ,  $\tilde{u}_1(k) = u_1(k + 1)$  для  $N_i = 3$  тогда из (9):

$$\begin{pmatrix} \mathbf{x}(k + 1) \\ \mathbf{x}(k) \\ \mathbf{x}(k - 1) \\ \mathbf{x}(k - 2) \\ \mathbf{x}(k - 3) \\ \mathbf{x}(k - 4) \\ \mathbf{x}(k - 5) \\ \mathbf{x}(k - 6) \\ \mathbf{x}(k - 7) \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} \overline{\mathbf{A}}_1 & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} \\ \mathbf{N} & \overline{\mathbf{A}}_2 & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} \\ \mathbf{N} & \mathbf{N} & \overline{\mathbf{A}}_{N_1} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} \\ \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \overline{\mathbf{A}}_4 & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} \\ \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \overline{\mathbf{A}}_5 & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} \\ \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \overline{\mathbf{A}}_{N_2} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} \\ \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \overline{\mathbf{A}}_7 & \mathbf{N} & \mathbf{N} \\ \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \overline{\mathbf{A}}_8 & \mathbf{N} \\ \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \overline{\mathbf{A}}_{N_3} \end{pmatrix}}_{=\mathbf{A}} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{x}(k) \\ \mathbf{x}(k - 1) \\ \mathbf{x}(k - 2) \\ \mathbf{x}(k - 3) \\ \mathbf{x}(k - 4) \\ \mathbf{x}(k - 5) \\ \mathbf{x}(k - 6) \\ \mathbf{x}(k - 7) \\ \mathbf{x}(k - 8) \end{pmatrix} \oplus \underbrace{\begin{pmatrix} \overline{\mathbf{B}}_0 \\ \mathbf{N} \\ \mathbf{N} \\ \mathbf{N} \\ \mathbf{N} \\ \mathbf{N} \\ \mathbf{N} \\ \mathbf{N} \\ \mathbf{N} \end{pmatrix}}_{=\mathbf{B}_0} \cdot \tilde{u}(k) \oplus \underbrace{\begin{pmatrix} \overline{\mathbf{B}}_1 \\ \mathbf{N} \\ \mathbf{N} \\ \mathbf{N} \\ \mathbf{N} \\ \mathbf{N} \\ \mathbf{N} \\ \mathbf{N} \\ \mathbf{N} \end{pmatrix}}_{=\mathbf{B}_1} \cdot \tilde{u}_1(k),$$

а в пространстве состояний (9) будет иметь вид:

$$\tilde{\mathbf{x}}(k+1) = \mathbf{A} \cdot \tilde{\mathbf{x}}(k) \oplus \mathbf{B}_0 \cdot u(k) \oplus \mathbf{B}_1 \cdot u_1(k). \quad (10)$$

Данная математическая модель описывает динамику работы планировщика со взвешенным обслуживанием очередей. Однако, как представлено выше, также в сетевых устройствах используются гибридные алгоритмы планировщика.

#### Алгоритм гибридного обслуживания очередей

Гибридный алгоритм планировщика подразумевает наличие одной очереди, при появлении в которой пакеты сразу же начинают обслуживаться. Т.е. пакеты не попадают в буфер, а сразу же передаются. Условно можно считать, что буфер в одной из очередей отсутствует. Т.к. модель (рис.1) составлена т.о., что номер по порядку очереди соответствует приоритету трафика в ней, то модель планировщика с гибридным алгоритмом обслуживания очередей будет с нулевым размером буферного пространства впервой очереди. Тогда (8) можно переписать в следующем виде:

$$\begin{aligned} x_1(k+1) &= x_2(k+1) \oplus q_1 \cdot x_9(k+1), \\ x_2(k+1) &= x_1(k+1) \oplus u_1(k+1), \\ x_3(k+1) &= x_2(k+1) \oplus e_1 \cdot u_4(k+1) \\ x_4(k+1) &= x_5(k - N_1 + 1) \oplus q_2 \cdot x_3(k+1), \\ x_5(k+1) &= x_4(k+1) \oplus u_2(k+1), \\ x_6(k+1) &= x_5(k+1) \oplus e_2 \cdot u_5(k+1) \\ x_7(k+1) &= x_8(k - N_2 + 1) \oplus q_3 \cdot x_6(k+1), \\ x_8(k+1) &= x_7(k+1) \oplus u_3(k+1), \\ x_9(k+1) &= x_8(k+1) \oplus e_3 \cdot u_6(k+1). \end{aligned} \quad (11)$$

Сделаем аналогичные преобразования и, учитывая (9), перепишем (11) в явном виде со следующими обозначениями:  $\tilde{\mathbf{x}}(k) = (\mathbf{x}(k)^T \ \mathbf{x}(k-1)^T \ \dots \ \mathbf{x}(k - N_q + 1)^T)^T$ ,  $\tilde{u}(k) = u(k+1)$ ,  $\tilde{u}_1(k) = u_1(k+1)$  для  $N_i = 3$ .

$$\begin{pmatrix} \mathbf{x}(k+1) \\ \mathbf{x}(k) \\ \mathbf{x}(k-1) \\ \mathbf{x}(k-2) \\ \mathbf{x}(k-3) \\ \mathbf{x}(k-4) \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} \overline{\mathbf{A}}_1 & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} \\ \mathbf{N} & \overline{\mathbf{A}}_2 & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} \\ \mathbf{N} & \mathbf{N} & \overline{\mathbf{A}}_{N_1} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} \\ \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \overline{\mathbf{A}}_4 & \mathbf{N} & \mathbf{N} \\ \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \overline{\mathbf{A}}_5 & \mathbf{N} \\ \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \mathbf{N} & \overline{\mathbf{A}}_{N_2} \end{pmatrix}}_{=\mathbf{A}} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{x}(k) \\ \mathbf{x}(k-1) \\ \mathbf{x}(k-2) \\ \mathbf{x}(k-3) \\ \mathbf{x}(k-4) \\ \mathbf{x}(k-5) \end{pmatrix} \oplus \underbrace{\begin{pmatrix} \overline{\mathbf{B}}_0 \\ \mathbf{N} \\ \mathbf{N} \\ \mathbf{N} \\ \mathbf{N} \\ \mathbf{N} \end{pmatrix}}_{=\mathbf{B}_0} \cdot \tilde{u}(k) \oplus \underbrace{\begin{pmatrix} \overline{\mathbf{B}}_1 \\ \mathbf{N} \\ \mathbf{N} \\ \mathbf{N} \\ \mathbf{N} \\ \mathbf{N} \end{pmatrix}}_{=\mathbf{B}_1} \cdot \tilde{u}_1(k).$$

Общее уравнение в пространстве состояний для (11) имеет вид, аналогичный (10).

Представленная математическая модель позволяет наиболее точно описывать работу планировщика, т.к. здесь учтены такие параметры, как: вносимые задержки при поступлении пакетов в очередь, времена обслуживания пакетов в очередях, буферное пространство каждой очереди; синхронизацию работы очередей.

Для осуществления функций управления в представленные математические модели внесены вектора  $\mathbf{q}$  и  $\mathbf{e}$ . Ограничение (3) учтено в векторе  $\mathbf{q}$ , а ограничение (4) – в векторе  $\mathbf{e}$  соответственно. Вектор  $\mathbf{e}$ , характеризующий время, затрачиваемое на обслуживание, вносит некоторую долю задержки в ее значение «из конца-в-конец» и фактически «замедляет» поток. В представленных математических моделях логика такова, что вектор управления «корректирует» эти задержки. Следовательно, решив обратную задачу можно найти вектор

необходимых корректировок для получения оптимального решения согласно (6). Введем следующую переменную:

$$\mathbf{W} = \mathbf{A} \cdot \tilde{\mathbf{x}}(k) \oplus \mathbf{B}_0 \cdot u(k), \quad (12)$$

тогда (11) переписывается в

$$\tilde{\mathbf{x}}(k+1) = \mathbf{W} \oplus \mathbf{B}_1 \cdot u_1(k). \quad (13)$$

Решая уравнение (13) относительно  $\mathbf{W}$  можно получить две оценки:

- точную, если  $\mathbf{W} < \tilde{\mathbf{x}}(k+1)$ , то  $\mathbf{B}_1 \cdot u_1(k) = \tilde{\mathbf{x}}(k+1)$ ;

$$u_1(k) = \mathbf{B}_1^{-T} \cdot \tilde{\mathbf{x}}(k+1); \quad (14)$$

- грубую, если  $\mathbf{W} = \tilde{\mathbf{x}}(k+1)$ , то  $\mathbf{B}_1 \cdot u_1(k) \leq \tilde{\mathbf{x}}(k+1)$ ; вектор корректировок вычисляется согласно (14).

Элементы рассчитанного вектора корректировок показывают, какой объем буферного пространства необходимо выделить для пакетов определенной очереди (при наличии в ней такового). Оцененный объем буферного пространства выделяется на время, затрачиваемое планировщиком для обслуживания по одному пакету из каждой очереди.

### Выводы

В представленной статье произведен анализ средств управления трафиком. На его основе сформулирована задача оптимального использования сетевого ресурса для планировщика с заданными качествами обслуживания.

Проанализированы существующие алгоритмы планировщиков. Выявлено, что существующие алгоритмы обладают рядом недостатков, основным из которых является статическое представление их математических моделей.

В статье впервые разработаны дискретно-событийные модели работы планировщиков сетевого устройства в базисе Мах-Plus алгебры, которые учитывают задержки на обработку запросов и позволяют формализовать процесс синтеза алгоритма управления в пространстве состояний.

На основе разработанных моделей и сформулированной задачи оптимального использования ресурсов представлен метод управления трафиком, позволяющий улучшать эффективность использования сетевых ресурсов при заданном уровне качества обслуживания.

### Список использованной литературы

1. Дымарский Я.С. Управление сетями связи: принципы, протоколы, прикладные задачи. / Я.С. Дымарский, Н.П. Крутякова, Г.Г. Яновский // Серия изданий «Связь и бизнес», М.: ИТЦ «Мобильные коммуникации», 2003.-384с.
2. ITU-T E.800 (09/2008). Определение терминов, относящихся к качеству обслуживания. [Электронный ресурс] / ITU-T. – Режим доступа: <http://handle.itu.int/11.1002/1000/9524>
3. Кучерявый Е.А. Управление трафиком и качество обслуживания в сети Интернет / Е.А. Кучерявый. – СПб.: Наука и Техника, 2004. – 336 с.: ил.
4. Aditya Akella. CS 5114 Network Programming Languages Software-Defined Networking [Электронный ресурс] / Aditya Akella, Aaron Gember, Nick McKeown. - Режим доступа: <http://www.cs.cornell.edu/courses/CS5114/2013sp/lectures/lec05.pdf>
5. Adan Ivo, Queueing Theory [Электронный ресурс] / Ivo Adan, Jacques Resing. - Режим доступа: <http://www.win.tue.nl/~iadan/queueing.pdf>
6. Feng Lu, Weighted Fair Queueing with Differential Dropping [Электронный ресурс] / Lu Feng, Geoffrey M. Voelker, Alex C. Snoeren. – Режим доступа: <http://cseweb.ucsd.edu/~snoeren/papers/ewfq-infocom12.pdf>
7. Markaki M. Comparison of packet schedulers for differentiated services in the Internet / M. Marakaki, M.P. Saltouros, I.S. Venieris // Proc. ATM&IP 2000. – U.K., 2000. – с. 120-125.

8. Braden R., RFC 2309. Recommendations on queue management and congestion avoidance in the Internet [Электронный ресурс]/ D. Clark, J. Crowcroft, B. Davie, S. Deering, D. Estrin, S. Floyd, V. Jacobson, G. Minshall, C. Partridge, L. Peterson, K. Ramakrishnan, S. Shenker, J. Wroclawski, and L. Zhang. – Режим доступа: <http://tools.ietf.org/pdf/rfc2309.pdf>
9. Лемешко О.В., Євсєєва О.Ю., Симоненко Д.В. Модель динамічного балансування мережних ресурсів у телекомунікаційній мережі // Системи обробки інформації. - 2008. - № 5(72). - С.71 – 74
10. Лозинская В.Н. Математические модели компонентов телекоммуникационных систем / В.Н. Лозинская // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. Випуск 1 (24). - Донецьк, ДонНТУ, 2013. С - 121-126

### References

1. Dimarskii, J.S., Krutjakova, N.P. and Janovskii, G.G. (2003), *Upravlenie setjami svjazi: principi, protokoli, prikladnie zadachi* [Telecommunication Networks management: principles, protocols, applied tasks], Mobilnie kommunikatsii, Moscow, Russia.
2. International Telecommunication Union (2008), “ITU-T E.800 (09/2008): Quality of telecommunication services: concepts, models, objectives and dependability planning – Terms and definitions related to the quality of telecommunication services”, available at: <http://handle.itu.int/11.1002/1000/9524> (Accessed 29 April 2014).
3. Kutcherjavii, E.A. (2004), *Upravlenie trafikom i kachestvo obslugivaniya v seti Internet* [Traffic management and quality of service at Internet], Nauka i tehnika, Saint-Petersburb, Russia.
4. Aditya Akella, Aaron Gember and Nick McKeown (2013), “Network Programming Languages Software-Defned Networking”, available at: <http://www.cs.cornell.edu/courses/CS5114/2013sp/lectures/lec05.pdf> (Accessed 29 April 2014)
5. Adan Ivo and Jacques Resing (2002), “Queueing Theory”, available at: <http://www.win.tue.nl/~iadan/queueing.pdf> (Accessed 29 April 2014).
6. Feng Lu, Voelker M., Geoffrey and Snoeren C., Alex, “Weighted Fair Queuing with Differential Dropping”, available at: <http://cseweb.ucsd.edu/~snoeren/papers/ewfq-infocom12.pdf> (Accessed 29 April 2014)
7. Markaki, M., Saltouros, M.P. and Venieris, I.S. (2000) “Comparison of packet schedulers for differentiated services in the Internet”, IFIP ATM&IP 2000, Proceedings of the IFIP ATN&IP 2000, U.K., pp 120-125.
8. Lemeshko O.V., Evseeva, O.J. and Simonenko D.V. (2008), “Dynamic balancing network resources model at telecommunication network”, *Systems of information processing*, vol. 5, no. 72, pp. 71-74.
9. Lozinskaya, V.N. (2013), “Mathematical models of telecommunication network components”, *Naukovi pratsi Donetskogo natsionalnogo tehnicnogo univercitety. Ser.: Obchysljuvalna tehnika ta avtomatyzatsija*, vol.1, no. 24, pp. 121-126.

Надійшла до редакції:  
30.04.2014 р.

Рецензент:  
докт. техн. наук, проф. Скобцов Ю.О.

**І.В. Дегтяренко, В.М. Лозинська**

**ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»**

*Динамічні моделі засобів управління трафіком в мережевому вузлі. Розроблено математичні моделі планувальника, як засобу управління трафіком в мережевому вузлі. Моделі, що надані, дозволяють підвищити ефективність використання мережних ресурсів за рахунок управління розміром буферного простору кожної з черг планувальника.*



Запропоновані математичні моделі відтворюють динаміку роботи планувальника в просторі станів, а перехід до базису Max-plus алгебри дозволяють отримати задані оцінки, з урахуванням необхідних параметрів якості обслуговування.

**Ключові слова:** параметри якості обслуговування, засоби управління трафіком, дисципліна обслуговування черги, Max-plus алгебра, дискретно-подієва система, простір станів.

**I.V. Degtjarenko, V.M. Lozinskaja**

**Donetsk National Technical University**

**Dynamic models of control traffic means at network node.** *Development of software-defined networking concept let to reconfigure the most of existing traffic controls at telecommunication node. Necessity of its modification causes of low efficient network resources use. Among of frequently used traffic controls at telecommunication node are service queues schedulers. This is due to traffic “conditioning” feature and as result opportunity of decreasing data lost level. For modern telecommunication devices most common are schedulers with fair and hybrid queue servicing. Limitation of existing algorithms can be explained by it static character at the same time with dynamic changing character of incoming traffic and it non-controllability. For modification of these algorithms, formalized an optimization problem, limitations of which are quality of service parameters. Also being of more than one queue at one network device suggests packet service synchronization. All noted limitations eliminated with introduced discrete-event models. For every model was find state space equations by conversion into Max-plus algebra basis. Control functions in represented models execute vectors of incoming request delays and requests’ service time. The solving of the given optimization problem is in finding of adjustments vector, which in fact shows the required queue buffer space size for every computing cycle. Thus, in represented article for the first time the discrete-event models of network device’s scheduler into Max-plus algebra basis are designed. These models count service request delays what let to formalize synthesis process of the control algorithm on state space. Based on designed models, made optimization problem and with the definite quality of service level increasing the efficient using of network resources method can be implement.*

**Keywords:** quality of service parameters, traffic controls, queue service discipline, Max-plus algebra, discrete-event system, state space.



**Дегтяренко Ілья Вячеславович**, Україна, закончил Донецкий национальный технический университет, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автоматизации и телекоммуникаций ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» (ул. Артема, 58, г. Донецк, 83001, Украина). Основное направление научной деятельности – методы анализа нестационарных сигналов, методы управления ресурсами телекоммуникационных сетей.



**Лозинская Виктория Николаевна**, Україна, закончила Донецкий национальный технический университет, ассистент кафедры автоматизации и телекоммуникаций ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» (ул. Артема, 58, г. Донецк, 83001, Украина). Основное направление научной деятельности – разработка и модернизация современных методов и алгоритмов управления трафиком, повышение эффективности использования сетевых ресурсов телекоммуникационных сетей.