



МОДЕЛИРОВАНИЕ ОЧЕРЕДЕЙ QoS НА БАЗЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ СЕТЕЙ ПЕТРИ

А. А. Суконщиков канд. техн. наук; М. А. Тутынин
Вологодский государственный технический университет, г. Вологда, Россия

Дано описание моделей различных типов очередей QoS коммуникационных устройств в вычислительных сетях. Предлагается расширение аппарата сетей Петри — модифицированные атрибутные сети Петри (МАСП), приводится математическое описание МАСП, а также моделей приоритетного и взвешенного механизма обслуживания очередей сетевых устройств QoS.



Предоставление ресурсов сети с учетом степени важности трафика приложений — одна из основных функций QoS. Архитектура позволяет администратору внедрять политику QoS, основанную на правилах, которые разбивают сетевой трафик на несколько классов обслуживания.

Классификация пакетов по значению параметра "тип сервиса" в его заголовке обеспечивает наиболее важным бизнес-приложениям приоритетное обслуживание их трафика.

Классификация трафика осуществляется на периферии сети на основе значения поля "тип сервиса" (ToS), определяющего приоритет IP-пакета.

Политики качества сервиса QoS, определенные для каждого класса сервиса, применяются ко всем устройствам ядра и периферии сети, где используются механизмы очередей, ограничения скорости передачи и формирования профиля трафика [1, 2].

Чаще всего в маршрутизаторах и коммутаторах применяются следующие алгоритмы обработки очередей:

традиционный алгоритм FIFO;

приоритетное обслуживание (Priority Queuing), которое также называют "подавляющим";

взвешенные настраиваемые очереди WFQ (Weighted Fair Queuing).

Каждый алгоритм разрабатывался для решения определенных задач и специфическим образом воздействует на качество обслуживания различных типов трафика в сети. Возможно и комбинированное применение этих алгоритмов.

Сети Петри по выразительной мощности, т. е. по способности адекватно моделировать поведение дискретных систем, превосходят такие классы моделей, как нечеткие графы, но все не обладают "универсальными" возможностями. Это заставило искать такие обобщения сетей, которые увеличивали бы их выразительную мощность [1, 3].

Модифицированные сети Петри

В качестве аппарата спецификации, применяемого для построения моделей механизмов обработки информационно-управляющих потоков в СОИ АСУП с требованиями к качеству обслуживания, разработан аппарат модифицированных атрибутивных сетей Петри (МАСП) [1] с добавлением свойств временных и ингибиторных сетей, который определяется как

$$C = (N, \tau_0, z_v, \varepsilon_v, g_v),$$

где $\tau_0 = (\tau_1^0, \tau_2^0, \dots, \tau_j^0)$ — начальной вектор параметров временных распределений маркеров, каждый компонент τ_i^0 которого представляет собой некоторую неотрицательную нечеткую величину;

$z_v = (z_1^v, z_2^v, \dots, z_n^v)$ — вектор параметров временных задержек маркеров в позициях МАСП

C_{ST}^v , каждый компонент z_i^v которого представляет собой некоторую неотрицательную нечеткую величину;

$\varepsilon_v = (\varepsilon_1^v, \varepsilon_2^v, \dots, \varepsilon_n^v)$ — вектор параметров времен срабатывания разрешенных переходов МАСП C , каждый компонент ε_i^v которого также представляет собой некоторую неотрицательную нечеткую величину;

$g_v = (g_1^v, g_2^v, \dots, g_n^v)$ — вектор параметров изменения корректности потока разрешенных переходов МАСП C , каждый компонент g_i^v которого представляет собой некоторую неотрицательную нечеткую величину.

N включает следующие элементы:

$$N = (S, T, L, G, F, n, r, K, Z, M_0),$$

где S — множество позиций;

T — множество переходов;

F — множество дуг сети;

M_0 — начальная маркировка предикатов;

G — функция, приписывающая переходам сети условия срабатывания;

n — правило активности перехода $T_{\text{МАСП}}$;

r — правило нечеткого срабатывания $T_{\text{МАСП}}$;

L — функция, приписывающая переходам сети формулу их срабатывания;

K — емкость предиката;

Z — временная база;

$$F \subseteq F_9 \cup F_i; \quad F_i \subseteq F_{i1} \cup F_{i2},$$

где F_9 — множество обычных дуг сети;

F_i — множество ингибиторных дуг сети;

F_{i1} — множество разрешающих ингибиторных дуг сети;

F_{i2} — множество запрещающих ингибиторных дуг сети;

$$T \subseteq T_9 \cup T_{\text{МАСП}},$$

где T_9 — множество обычных переходов сети;

$T_{\text{МАСП}}$ — множество модифицированных переходов МАСП.

Сеть Петри состоит из графической части GT , дающей структурное описание исходной системы, и описательной части BT , относящейся главным образом к описанию поведения отдельных подсистем или элементов, являющихся элементами сети Петри.

GT состоит из позиций, которые могут быть маркированными, переходов и направленных дуг, с помощью которых реализуется связь между позициями и переходами или между переходами и позициями.

S , T и F — конечные множества позиций, переходов и дуг, при этом $F \subseteq (S \times T) \cup (T \times S)$. Из включения $s \in S$, $t \in T$ и $(s, t) \in F$ следует, что s соединено с t .

• Запись $\text{mar}_0 \in N^{SL}$ указывает начальную маркировку;

• запись $\text{acr}(s; t) = M \in N^+$ означает, что при активизации перехода t метка M удаляется из позиции;

запись означает также, что при активизации перехода t метка M перемещается в позицию $s' \in S$, отображение $\text{mar} \in N^S$ называется маркировкой;

• запись $\text{mar}(s) \in N$ указывает число меток, находящихся на позиции s . Позиция $s \in S$ называется маркированной тогда и только тогда, когда $(\text{mar}(s) \geq 1) \wedge (\tau^v(s) > 0)$, при этом $\text{mar}(s) \leq k(s) : k(s) \in K$.

При всяком $s \in S$ и при всяком $t \in T$ для сети Петри определены следующие объекты:

$$\begin{aligned} \text{PRE}(s) &= \{t : t \in T \wedge (s, t) \in F\}; \\ \text{POST}(s) &= \{t : t \in T \wedge (s, t) \in F\}; \\ \text{PRE}(t) &= \{s : s \in S \wedge (s, t) \in F\}; \\ \text{POST}(t) &= \{s : s \in S \wedge (t, s) \in F\}. \end{aligned}$$

Множество дуг CR состоит из двух непересекающихся подмножеств, т. е.

$$\begin{aligned} F.S &= \{(s, t) : s \in S \wedge t \in T \wedge (s, t) \in F\}; \\ F.S &= \{(s, t) : s \in S \wedge t \in T \wedge (t, s) \in F\}. \end{aligned}$$

Для каждого элемента $(s, tr) \in CR.ST$ устанавливается:

a — минимальное число меток, которое должно находиться на одной позиции, чтобы активизировать t относительно s ;

b — число меток, удаляемых с позиции s при активизации перехода t ;

c — как выбираются удаленные метки.

Для каждого элемента $(t, s) \in F.T$ устанавливается, сколько меток при активизации перехода t образуется в позиции s .

Позиции, переходы и метки могут содержать локальные переменные, что указывается в BT . Для обозначения используется термин названия метки, т. е., например, локальная переменная attr5 позиции $s3$ записывается как $s3.\text{attr5}$. Изменение величин описывается в процедурах переходов, указанных в BT . Число меток, находящихся в одной позиции, нужно рассматривать в зависимости от времени. Правило активизации, в данном случае процедура перехода, описываются для каждого перехода. Правило активизации $L(t)$ любого перехода $t \in T$ разделено на два компонента так, что указание отчасти реализуется путем графического изображения, а дополнительное описание — в BT . Правило активизации перехода является либо основным, либо состоит из нескольких основных правил, либо является специальным правилом активизации. Для каждого правила существует определенное графическое изображение, в некоторых случаях правила задаются данными в BT .

Если позиция является входной для двух переходов, то в BT необходимо задать последовательность активизации этих переходов. Кроме правила активизации перехода следует задать дополнительную информацию. Поэтому предлагается следующая структура описания перехода:

$$T = (Q; N),$$

где N — множество ограничений на значение поля h , проходящих через переход маркеров: $\forall t.n \in N$;

Q — множество соотношений для переходов, на основе которых прописываются правила срабатывания $\forall t.q(i) \in Q$.

Опишем наиболее общие правила функционирования предлагаемой сети

1. *Правило определения текущей маркировки.*

Любое текущее, в том числе и начальное состояние определяется вектором $\tau = (\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)$, компоненты которого представляют собой нечеткие величины и интерпретируются как значения функции принадлежности нечеткого наличия конкретного маркера в соответствующих позициях $s \in S$ относительно времени, отсчитываемого от момента запуска данной МАСП C_{ST}^T .

Начальное состояние МАСП C_{ST}^T определяется вектором начальной маркировки τ_0 .

2. *Правило (условие) активности перехода.*

Переход $t_k \in T$ МАСП C_{ST}^T называется активным (разрешенным, возбужденным) при некоторой доступной маркировке τ , если выполнено условие

$$T_{\tau_i} > 0, \quad (\forall s_i \in S) \wedge (I(s_i, t_i) > 0), \quad (1)$$

т. е. во всех входных позициях рассматриваемого перехода на момент времени τ должны быть доступные маркеры, представленные отличными от нуля нечеткими величинами. При этом неравенство (1) следует понимать применительно к функции принадлежности соответствующей нечеткой величины для аргумента $\tau \in R_+$. Доступность маркеров в позициях МАСП определяется согласно правилу 4.

3. *Правило нечеткого срабатывания перехода.*

Если переход $t_k \in T$ МАСП C_{ST}^T активен при некоторой доступной маркировке τ , т. е. для него выполнено условие (1), то нечеткое срабатывание данного перехода, осуществляемое за время $s_k = S_{t_k}$, приводит к новой маркировке τ_v , компоненты вектора которой определяются следующим образом:

• для каждой из входных позиций $s_i \in S$, для которых $I(s_i, t_k) > 0$, по формуле

$$\tau_i^v = 0, \quad (\forall s_i \in S) \wedge (I(s_i, t_k) > 0); \quad (2)$$

• для каждой из выходных позиций $s_i \in S$, для которых $O(t, s_i) > 0$, по формуле



$$\tau_j^v = \min(\max_{(i \in \{1,2,\dots,n\}) \wedge (I(p_i, t_k) > 0)} \{\tau_i + s_k, \tau_j\})$$

$$(\forall s_i \in S) \wedge (O(t_k, s_i) > 0) \wedge (\tau_{T_i} \neq 0)$$

$$\mu' = \mu_i - g_i, (\forall s_i \in S) \wedge (O(t_k, s_i) > 0) \wedge (\mu_{T_i} \neq 0), \quad (3)$$

где "max" — расширенная операция максимума для трапецеидального нечеткого интервала (ТНИ);

"min" — расширенная операция минимума для ТНИ;

"+" — операция сложения ТНИ;

• для каждой позиции $s_i \in S$, не являющейся ни входной, ни выходной, по формуле

$$\tau_i^v, (\forall s_i \in S) \wedge (I(s_i, t_k) = 0) \wedge (O(t_k, s_i) = 0). \quad (4)$$

Если некоторые из позиций $s_i \in S$ являются одновременно входными и выходными для активного перехода $t_k \in T$, то для них компоненты вектора новой маркировки рассчитываются последовательно вначале по формуле (2), а затем — по формуле (3).

4. *Правило нечеткой задержки маркеров в позициях.*

После нечеткого срабатывания активного перехода согласно правилу 3 маркеры в выходных позициях для новой маркировки τ_v в общем случае являются недоступными. На них начинают действовать временные задержки в соответствующих выходных позициях сработавшего перехода, определяемые вектором z_T . Соответствующие маркеры становятся доступными только после окончания действия временных задержек, которые определяют доступную маркировку m_v' по формуле

$$T_i' = T_i + Z_j, (\forall s_i \in S) \wedge (O(t_k, s_i) > 0) \wedge (T_i \neq 0), \quad (5)$$

где операция сложения понимается как сложение нечетких величин. Для выходных позиций s_j перехода t_k с $\tau_j = 0$ по определению $\tau_j' = 0$.

Описание маркера в МАСП

Маркер в разрабатываемой сети Петри должен содержать информацию об источнике, приемнике (приемниках), времени порождения, времени жизни, а также информацию для QoS. Однако в раскрашенных сетях все маркеры, находящиеся в некотором месте, равноправны и извлекаются из места в произвольном порядке. Поэтому для моделирования очереди мы используем нумерацию маркеров в соответствующем месте. В связи с этим предлагается следующая структура атрибутов маркера:

$$M = (c, h, s, n_0, t_0, T, t, a, b, r, \mu),$$

где c — цвет маркера;

h — номер маркера в позиции;

s — номер места маркера в позиции;

n_0 — номер маркера в генераторе;

t_0 — время порождения маркера;

T — время жизни маркера;

t — текущее время жизни маркера;

a — адрес источника;

b — адрес приемника — множество значений;

r — размер маркера;

μ — нечеткий показатель корректности маркера.

$$t_0, n_0 = \text{const}; a, b \neq 0; V_{\min} \leq r \leq V_{\max}; \mu : (0 \div 1),$$

где V_{\min} , V_{\max} — минимальный и максимальный размеры пакета.

Цвет маркера соответствует принадлежности пакета к тому или другому классу обслуживания. Номер места маркера в позиции и номер маркера в позиции вводятся для реализации в МАСП механизмов обработки трафика. Нечеткий показатель корректности маркера служит для учета общего неблагоприятного влияния на пакет при его прохождении через сеть.

Приоритетное обслуживание

Механизм приоритетного обслуживания очередей (Priority Queuing), который также называют "подавляющим", предполагает наличие четырех входных очередей: очереди с высоким, средним, обычным и низким приоритетами обслуживания.

Сетевой администратор может определить принадлежность потока трафика к любой из четырех очередей. Пакеты, принадлежащие очереди с высоким приоритетом обслуживания, передаются первыми. Когда высокоприоритетная очередь окажется пустой, начнется передача пакетов следующей по приоритету очереди обслуживания и т. д.

Отметим, что передача пакетов очереди со средним приоритетом обслуживания не начнется до тех пор, пока не будут обслужены все пакеты высокоприоритетной очереди.

Приоритетное обслуживание пакетов востребовано в сетях, где передача трафика, необходимого для решения критически важных задач, должна быть осуществлена даже при условии полного доминирования высокоприоритетного трафика в моменты перегрузки сети. Если интенсивность высокоприоритетного трафика сравняется на определенный промежуток времени с линейной интенсивностью или превысит ее, механизм приоритетного обслуживания очередей все равно обеспечит передачу высокоприоритетной информации до поступления ее следующей порции, даже если для этого придется пожертвовать управляющим трафиком сети.

Механизм приоритетного обслуживания очередей поддерживает классификацию пакетов в зависимости от входного интерфейса, простого или расширенного списка доступа на основании IP-адреса, размера пакета и сгенерировавшего этот пакет приложения.

Следует отметить, что неклассифицированный трафик по умолчанию относится к очереди с обычным приоритетом обслуживания. В пределах очереди пакеты обрабатываются в соответствии с механизмом FIFO.

Формальное описание модели подавляющего приоритетного обслуживания (рис. 1): $s1, s2, s3, s4$ — позиции классифицированного трафика;

ка; $s5$ — позиция общего канала; $t1, t2, t3, t4$ — переходы приоритетного обслуживания;

$$K(s1) = 1; K(s2) = 1; K(s3) = 1;$$

$$K(s4) = 1; (s5) = 1;$$

$$G(t2) : \text{mar}(s1) = 0;$$

$$G(t3) : (\text{mar}(s1) = 0) \wedge (\text{mar}(s2) = 0);$$

$$G(t4) : (\text{mar}(s1) = 0) \wedge (\text{mar}(s2) = 0) \wedge (\text{mar}(s3) = 0).$$

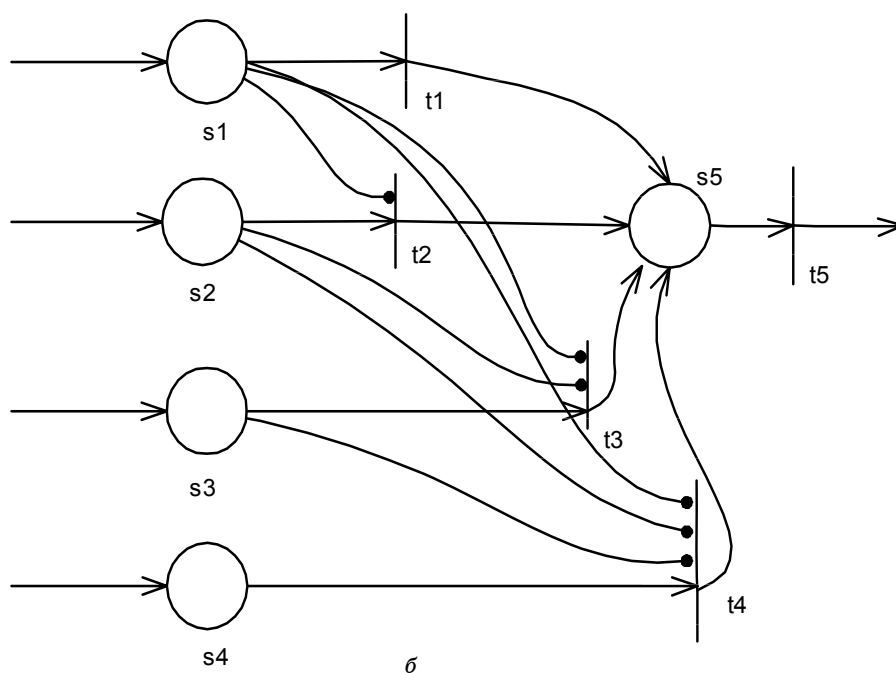
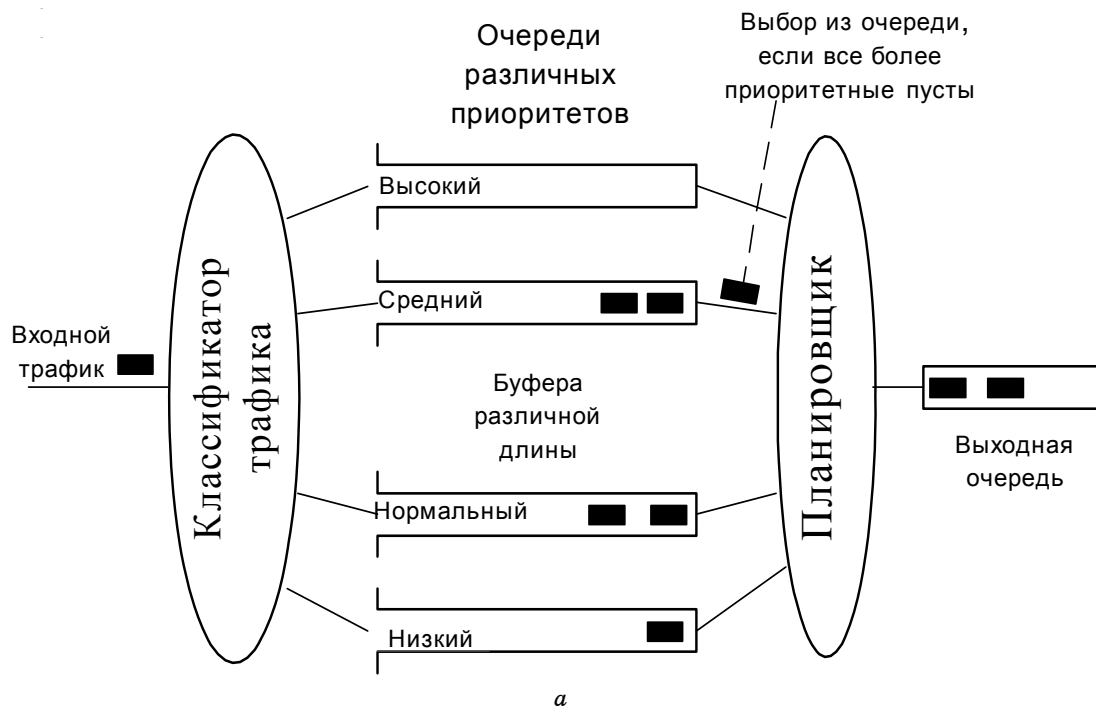


Рис. 1. Модель "подавляющего" приоритетного обслуживания:

а — механизм функционирования; б — модель на аппарате модифицированных сетей Петри

Взвешенные настраиваемые очереди

Алгоритм взвешенных очередей (Weighted Queuing) разработан для того, чтобы можно было предоставить всем классам трафика определенный минимум пропускной способности или гарантировать некоторые требования к задержкам. Под весом данного класса понимается процент предоставляемой классу трафика пропускной способности от полной пропускной способности выходного интерфейса.

Алгоритм, в котором вес классов трафика может назначаться администратором, называется "настраиваемой очередью" (Custom Queuing). В случае, когда веса назначаются автоматически, на основании некоторой адаптивной стратегии реализуется так называемый алгоритм "взвешенного справедливого обслуживания".

Как и при приоритетном обслуживании, трафик делится на несколько классов, для каждого из которых ведется отдельная очередь пакетов. Но с каждой очередью связывается не ее приоритет, а процент пропускной способности выходного интерфейса, гарантируемый данному классу трафика при перегрузках этого интерфейса.

Формальное описание модели (рис. 2):

$s1, s2, s3, s4$ — выходные позиции буферов для каждого класса обслуживания;

$s4''$ — позиция счетчика трафика через переход $t4$;

$s5$ — макропозиция выходного буфера;

$s6, s7, s8, s9$ — макропозиции механизма обработки взвешенных очередей "карусельного" типа;

$t1, t2, t3, t4$ — переходы обработки буферов для каждого класса обслуживания;

$t4'$ — переход подсчета трафика через переход $t4$;

$t4''$ — переход обнуления счетчика трафика через переход $t4$;

$t5$ — переход выходного буфера;

$t6, t7, t8, t9$ — переходы механизма обработки взвешенных очередей "карусельного" типа.

$$K(s4') = 1; K(s6) = 1; K(s7) = 1; K(s8) = 1; K(s9) = 1;$$

$$K(s9') = 1; K(s9'') = 1;$$

$$t1.n = t1'.n = N1; t2.n = t2'.n = N2;$$

$$t3.n = t3'.n = N3; t4.n = t4'.n = N4;$$

$$G(t4') : (\text{mar}(s4') = 1) \wedge (M(s4').h \leq t4'.n);$$

$$L(t4') : (\text{acr}(s4''; t4') = M') \wedge$$

$$\wedge (\text{acr}(t4'; s4'') = M') \wedge (M'(s4'').h = M'(s4'').h + M(s4').r) \wedge (\text{acr}(s4; t4') = M) \wedge (\text{acr}(t4'; t5) = M);$$

$$G(t4'') : (\text{mar}(s9') = 1) \wedge (\text{mar}(s4'') = 1);$$

$$L(t4'') : (\text{acr}(s4''; t4'') = M') \wedge$$

$$\wedge (\text{acr}(t4''; s4'') = M') \wedge (M'(s4'').h = 0);$$

$$G(t6) : (\text{mar}(s_{\text{Manager}}) = 1) \wedge (\text{mar}(s9) = 1);$$

$$G(t7) : (\text{mar}(s_{\text{Manager}}) = 1) \wedge (\text{mar}(s6) = 1);$$

$$G(t8) : (\text{mar}(s_{\text{Manager}}) = 1) \wedge (\text{mar}(s7) = 1);$$

$$G(t9) : (\text{mar}(s_{\text{Manager}}) = 1) \wedge (\text{mar}(s8) = 1).$$

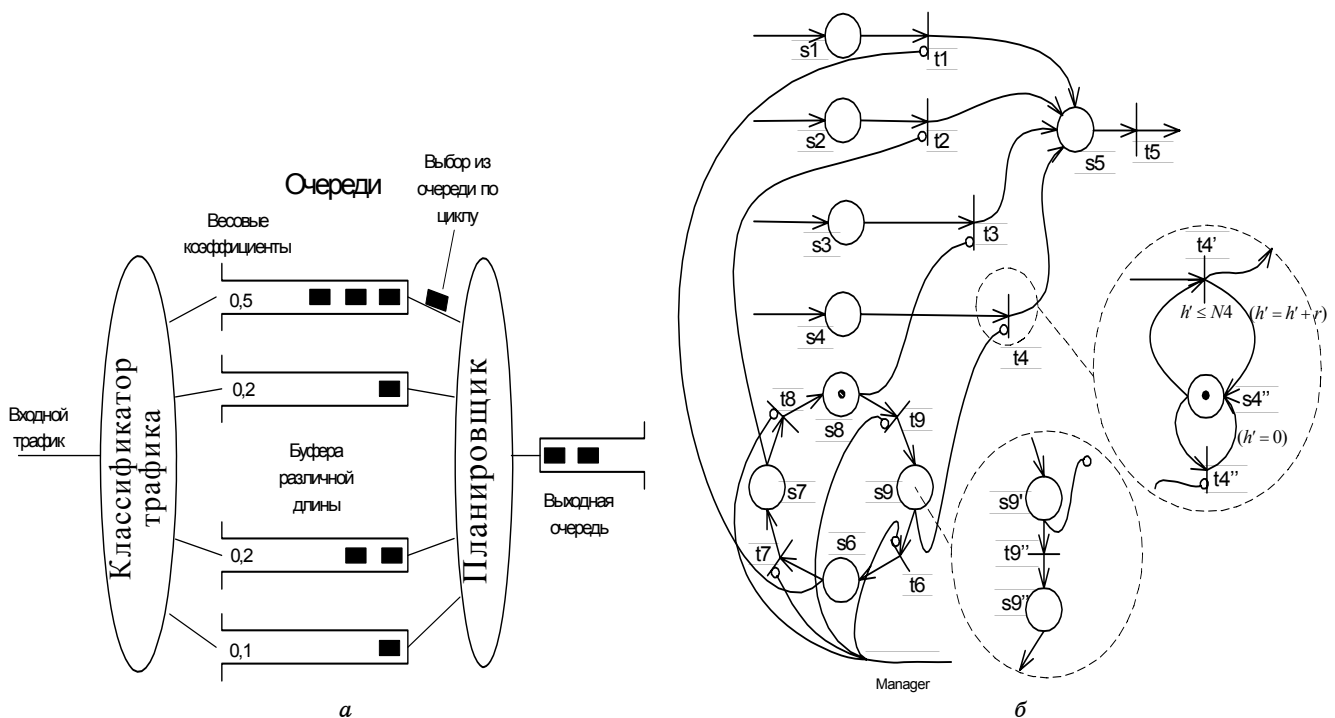


Рис. 2. Моделирование взвешенных настраиваемых очередей:

a — механизм функционирования; b — моделирование механизма с помощью модифицированных сетей Петри

Заключение

Предлагается аппарат модифицированных атрибутных сетей Петри как развитие аппарата сетей Петри для применения при анализе обработки информационных потоков в сетевых узлах с поддержкой QoS.

Предлагаемые МАСП более адекватно и удобно выражают в терминах сетей особенности функционирования реальных дискретных систем. На основании предлагаемого аппарата МАСП создана библиотека типовых элементов

механизмов обслуживания очередей, используемых в коммуникационных узлах сетей.

Литература

1. Суконищikov А. А. Методы и модели анализа сетей АСУ с поддержанием качества обслуживания/А. А. Суконищikov, Д. В. Давыдов. — Вологда: ВоГТУ, 2007. — 139 с.
2. Вишневский В. М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. — М.: Техносфера, 2003. — 512 с.
3. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. — СПб.: БХВ-Петербург, 2003. — 736 с.

