К транспортной сети предъявляются требования, которые позволяют обеспечить качество обслуживания для трафика синхронизации (IEEE 1588v2 и SyncE): время задержки передачи пакетов меньше 10 мс (оптимально менее 4 мс), джиттер — меньше 2 мс и коэффициент потери пакетов — меньше 10^{-6}.

Заключение. Точность синхронизации необходима для функционирования мобильной сети стандарта LTE и предоставления услуг пользователям, а также для реализации хендовера, выявления и исправления эффекта Доплера, поддержки механизмов борьбы с интерференцией и перспективных возможностей LTE Advanced. Выбор оптимального метода синхронизации Small cells зависит от стоимостных характеристик, типа оборудования, топологии и загрузки сети, места установки. Окончательное решение по методу синхронизации следует принимать с учетом предпроектных исследований, имея в виду последующее измерение точности синхронизации. Проверка точности синхронизации необходима, так как транспортная сеть построена на оборудовании различных производителей.

В сети с большим числом устройств и высокой загрузкой транспортных каналов точность синхронизации будет хуже. Поэтому для передачи сигналов синхронизации по фиксированным транспортным каналам (wireline backhaul) предпочтительнее вариант отдельного логического/виртуального канала с постоянным значением пропускной способности и с гарантированными значениями сетевых показателей качества, а также с высшим приоритетом для трафика синхронизации.

Для синхронизации массово внедряемых Small cells в помещениях (indoor) целесообразно использовать протокол 1588v2 в режиме Transparent Clock при условии гарантирования качества обслуживания трафика синхронизации и поддержки сетевым оборудованием протокола PTP. При размещении на открытых пространствах (outdoor) Small cells типа microcell и picocell в качестве источника синхронизации рекомендуется применять приемник сигналов систем ГЛОНАСС/GPS или реализовать метод Cellular network listen (на первоначальном этапе развития сети).

ЛИТЕРАТУРА

1. http://www.gsacom.com/news/gsa_374.php.
2. http://www.gsacom.com/news/gsa_369.php.
3. http://www.gsacom.com/news/gsa_373.php.
4. Ericsson mobility report. Ericsson, June 2013. http://www.ericsson.com/res/docs/2013.
5. http://www.smallcellforum.org/Files/File/SCF-Small_Cells_White_Paper.pdf.
6. http://www.wilson-street.com/2012/03/the-borderless-business-enterprises-await-lte.
7. Small cell Forum DOCUMENT 049.01.01. Backhaul Technologies for Small Cells Use Cases, Requirements and Solutions.— February 2013.
8. Small cell Forum DOCUMENT 036.01.02. Topic brief: Femtocell Synchronisation and Location.— May 2012.
9. Small cell Forum DOCUMENT 075.03.01. Synchronization for LTE small cells.— December 2013.
10. 3GPP TS 36.104 V11.3.1 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception (Release 11) .
11. 3GPP TR 36.931 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) requirements for LTE Pico Node B (Release 11) .
12. NGMN Alliance Small Cell Backhaul Requirements.
13. 3GPP TS 33.320 Security of Home Node B (HNB) Home evolved Node B (HeNB) (Release 11) .

Получено 28.04.14

УДК 004.725.4

МОДЕЛИ УЗЛОВ КОММУТАЦИИ МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ СЕТЕЙ СВЯЗИ С ОТНОСИТЕЛЬНЫМИ ФИКСИРОВАННЫМИ И ДИНАМИЧЕСКИМИ ПРИОРИТЕТАМИ

К. И. Сычев, начальник отдела Академии ФСО России, , д.т.н.; sychev-k@mail.ru
А. Е. Умнов, с.н.с. Академии ФСО России, к.т.н.; uma282@mail.ru
М. Е. Незнамов, слушатель Академии ФСО России; maks-neznamov@yandex.ru

Представлены математические модели узлов коммутации мультисервисной сети связи с относительными фиксированными и динамическими приоритетами при простейших и произвольных потоках поступления-обслуживания.

Ключевые слова: *узел коммутации, мультисервисная сеть связи, качество обслуживания, системы массового обслуживания, относительные и динамические приоритеты.*

Введение. Ведущей мировой тенденцией развития телекоммуникаций является переход от узкоспециализированных (выделенных) сетей связи к мультисервисным (МСС). При их проектировании и эксплуатации необходимо обеспечить заданное качество передачи трафика (уровней задержек, потерь и пр.), т.е. нужны адекватные оценки соответствующих показателей качества. Для получения «сквозных» оценок нужно определить их на отдельных элементах МСС — узлах коммутации (УК). Для этого требуются адекватные математические модели УК, которые можно вычислять, используя методы теории массового обслуживания. В данном случае системой обслуживания является рассматриваемый УК, на вход которого поступают заявки — пакеты передаваемого трафика МСС. В реальных сетях узлами коммутации служат коммутаторы Ethernet (с функциями QoS), IP-маршрутизаторы и другие устройства коммутации и маршрутизации пакетного трафика. Важнейший элемент системы обслуживания — принятая дисциплина обслуживания (ДО), которая определяет порядок обработки поступивших пакетов. Для обеспечения совместной передачи сообщений различных классов с тре-

буемым для каждого из них качеством вводится система приоритетов.

В существующих УК пакетного трафика наибольшее распространение получили следующие ДО: First in, First out («первым пришел — первым ушел»), Fair Queuing (справедливая очередь), Priority Queueing (очередь по приоритету), Custom Queuing (настраиваемая пользователем очередь), Weighted Fair Queueing (взвешенная справедливая очередь), Weighted Round-Robin Queueing (взвешенная циклическая очередь), Class-Based Weighted Fair Queuing (взвешенная справедливая очередь, основанная на классах), Low Latency Queuing (очередь с низкой задержкой). В выходных интерфейсах УК, как правило, настраивается одна ДО очередей, хотя применяются также и их различные комбинации. Для обслуживания разнородного трафика УК МСС наиболее эффективны такие ДО (или их комбинации), которые обеспечивают дифференцированное обслуживание за счет назначения приоритетов и исключают дискриминацию низкоприоритетных потоков пакетов высокоприоритетными.

Получить математические модели УК МСС, в которых используются перечисленные дисциплины обслуживания, можно с помощью аналитических выражений теории массового обслуживания для базовых ДО: с относительными фиксированными приоритетами и относительными динамическими приоритетами [1]. (Первоначальные приоритеты назначаются согласно классам сервиса, т.е. наибольший приоритет получают пакеты приложений, чувствительные к задержкам. В дальнейшем приоритет пакета возрастает в линейной зависимости от времени ожидания обслуживания, рассчитывается и назначается операционной системой УК.)

Обобщенная схема исследуемой модели (рис. 1) представляет собой модель узла коммутации мультисервисной сети связи, на вход которого поступает разнородный трафик, соответствующий видам услуг МСС. Для получения математических моделей УК МСС приняты следующие допущения и ограничения: моделируется одноканальная система обслуживания с бесконечным буфером и относительными приоритетами; обслуживающий прибор надежный; интенсивность поступающей нагрузки $\rho_R < 1$; математическое ожидание и дисперсия числа поступающих пакетов $N(\Delta t_i)$ за интервал времени Δt_i ограничены $m_{N(\Delta t_i)} < \infty$, $\sigma_{N(\Delta t_i)} < \infty$. Использование модели системы обслуживания с неограниченной очередью (бесконечным буфером) обусловлено свойством эквивалентности систем с конечным и бесконечным буфером при малых нормах потерь [2].

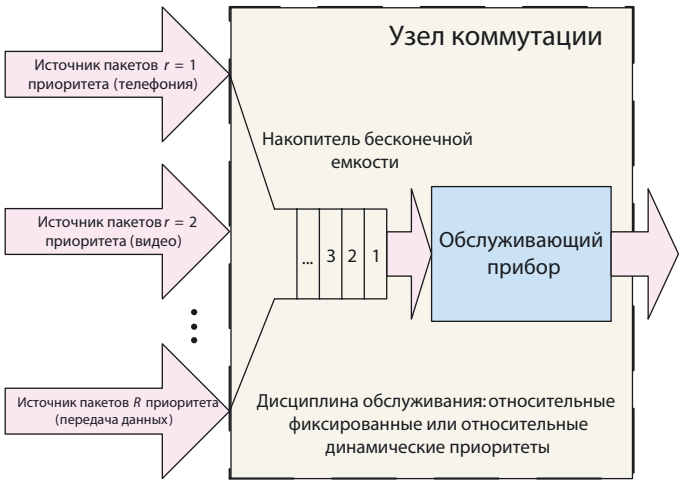

Рис. 1. **Модель узла коммутации**

Использование модели с одним обслуживающим прибором обусловлено тем, что на каждом участке сети входящие потоки мультиплексируются в общий выходной буфер (при моделировании это формально соответствует одноканальной системе обслуживания) .

Необходимо отметить две особенности поступающего на вход УК МСС трафика и, соответственно, математического моделирования узлов коммутации**.** Во-первых, трафик МСС разнородный, к качеству обслуживания предъявляются разные требования. Следовательно, от одномерного описания трафика необходимо перейти к многомерному по видам услуг [2]. Во-вторых, трафик современных МСС обладает сложной структурой. Широко используемые в настоящее время методы моделирования и расчета сетевых систем, основанные на классической теории телетрафика, в которой потоки пакетов аппроксимируются простейшими, не дают адекватной картины происходящего в сети [3] .

Таким образом, сложность моделирования поступающих потоков пакетов, а также разнообразие применяемых дисциплин их обслуживания определяют актуальность получения адекватных моделей УК МСС.

Модели систем обслуживания с фиксированными приоритетами известны, а для моделей с динамическими приоритетами имеется только аналитический результат для среднего времени ожидания обслуживания при простейшем входящем потоке и показательном времени обслуживания пакетов. Вместе с тем описание любой системы обслуживания требует определения всего рассматриваемого комплекса показателей качества (согласно Рекомендации МСЭ-Т Y.1540, это задержка пакетов, вариация задержки (джиттер), потери пакетов) — как при простейших потоках пакетов, так и при произвольных [4] .

Исследование процессов функционирования УК МСС с дисциплиной обслуживания на основе динамических приоритетов (ДП) начнем с анализа соответствующих «классических» моделей теории очередей с простейшими потоками и относительными фиксированными приоритетами (ФП). Это обусловлено фундаментальностью получаемых для них результатов и, как следствие, возможностью их распространения на более общие модели УК, в том числе с динамическими приоритетами.

Основные показатели качества функционирования «классических» УК типа $\vec{M}_r / \vec{M}_r / 1 / \infty$ *с фиксированными приоритетами* [2]:

а) среднее время ожидания обслуживания

$$w_r = \frac{\rho_R}{\mu_R(1-\rho_{r-1})(1-\rho_r)},$$

где ρ_r и ρ_R — суммарная интенсивность нагрузки УК соответственно пакетами приоритета не выше r и пакетами всех приоритетов $\overline{1,R}$; $\mu_R = \dfrac{\Lambda_R}{\sum_{i=1}^{R}\dfrac{\lambda_i}{\mu_i}}$ — интенсивность обслуживания суммарного потока пакетов всех приоритетов $\overline{1,R}$; Λ_R — суммарная интенсивность поступления в УК пакетов приоритета не выше r ($r = \overline{1,R}$);

б) средняя длина очереди (на основе распределения вероятностей состояний, или формулы Литтла)

$$l_r = \begin{cases} L_r, & r = 1, \\ L_r - L_{r-1}, & r = \overline{2,R}; \end{cases} \quad L_r = \sum_{m=1}^{\infty} m P_{m+1}(r), \qquad (1)$$

где L_r — средняя длина очереди суммарного потока пакетов приоритета не выше r; $P_{m+1}(r)$ — вероятность того,

что в УК в произвольный момент времени находится $m+1$ пакетов r-го приоритета;

в) вероятность превышения заданного объема буфера K (принимается за вероятность потерь пакетов)[1]

$$P_{K+1}(r) = \rho_R(1-\rho_r)\rho_r^K,\ \rho_R < 1;$$

г) джиттер задержки пакетов, который рассчитывается как среднеквадратичное отклонение времени пребывания пакетов в УК:

$$\sigma(t_{\text{пп}}(r)) = \sqrt{t_{\text{пп}}^{(2)}(r) - (t_{\text{пп}}(r))^2};$$

$$t_{\text{пп}}^{(2)}(r) = w_r^{(2)} + 2w_r x_r + x_r^{(2)}, \qquad (2)$$

где $t_{\text{пп}}^{(2)}(r)$ — второй момент времени пребывания пакетов в УК; x_r — среднее время обслуживания пакетов r-го приоритета; $w_r^{(2)}$ — второй момент времени ожидания обслуживания, определяемый на основе «закона сохранения накопленной в очереди работы»:

$$w_r^{(2)} = \begin{cases} w_1^{*(2)}, & r = 1; \\ \left(\dfrac{\Lambda_r}{\lambda_r}\right)^3 \left(w_r^{*(2)} - \sum\limits_{i=1}^{r-1}\left(\dfrac{\lambda_i}{\Lambda_r}\right)^3 w_{r-1}^{*(2)}\right), & r = \overline{2,R}, \end{cases} \qquad (3)$$

λ_r — интенсивность поступления в УК пакетов r-го приоритета r ($r = \overline{1,R}$); $w_r^{*(2)}$ — второй момент времени ожидания обслуживания в УК с суммарной интенсивностью поступающей нагрузки ρ_r (без учета приоритетов), вычисляемый для любых ρ_r по формуле

$$w_r^{*(2)} = \frac{2\rho_R}{\mu_r^2(1-\rho_r)^3}.$$

Выше отмечено, что необходимы аналитические выражения для всего рассматриваемого комплекса показателей качества как при простейших потоках пакетов, так и при произвольных. Для получения аналитических зависимостей показателей качества функционирования УК типа $\vec{G}_r / \vec{G}_r / 1 / \infty$ используется метод исследования УК МСС при произвольных распределениях поступления и обслуживания пакетов различных классов качества (приоритетов) [2].

Основные показатели качества функционирования УК типа $\vec{G}_r / \vec{G}_r / 1 / \infty$ с фиксированными приоритетами [2]:

а) средняя длина очереди l_r, которая определяется согласно выражению (1), где

$$L_r = \Lambda_r w_r^* \frac{C_{a,r}^2 + C_{x,r}^2}{2};$$

w_r^* — среднее время ожидания обслуживания в УК с суммарной интенсивностью поступающей нагрузки ρ_r (без учета приоритетов), определяемое выражением $w_r^* = \dfrac{\rho_R}{\mu_r(1-\rho_r)^2}$; $\mu_r = \sum\limits_{i=1}^{r}\dfrac{\lambda_r}{\rho_r^*} = \dfrac{\Lambda_r}{\rho_r}$ — интенсивность обслуживания суммарного потока пакетов приоритета не выше r; $C_{a,r}^2$ — квадратичный коэффициент вариации[2] времени поступления пакетов объединенного потока приоритета ($\overline{1,r}$); $C_{x,r}^2$ — квадратичный коэффициент вариации времени обслуживания пакетов объединенного потока приоритета ($\overline{1,r}$);

б) среднее время ожидания обслуживания (формула Литтла)

$$w_r = l_r / \lambda_r; \qquad (4)$$

в) вероятность превышения заданного объема буфера

$$P_{K+1}(r) = \rho_R(1-\hat{\rho}_r)\hat{\rho}_r^K;$$

$$\hat{\rho}_r = \exp\left(-\frac{2(1-\rho_r)}{C_{a,r}^2\rho_r + C_{x,r}^2}\right),\ \rho_R < 1; \qquad (5)$$

г) джиттер задержки пакетов $\sigma(t_{\text{пп}}(r))$, вычисляемый согласно выражению (2), где

$$w_r^{*(2)} = \frac{2\rho_R}{\mu_r^2(1-\rho_r)^2}\left(\frac{C_{a,r}^2 + C_{x,r}^2}{2}\right)^2. \qquad (6)$$

Большинство процессов на сетевом уровне (в IP-ориентированных сетях связи) могут быть описаны посредством распределений с «тяжелыми» хвостами (РТХ), например с помощью ограниченного распределения Парето. Для моделирования применяется ограниченное распределение, потому что в реальных сетях связи размеры передаваемых протокольных блоков данных (пачек пакетов) ограничены, а размеры буферов сетевых узлов конечны.

Для ограниченного распределения Парето квадратичный коэффициент вариации времени поступления пакетов объединенного потока приоритета ($\overline{1,r}$) определяется как

$$C_{a,r}^2 = \left(\frac{\chi_{\max_r}^2\chi_{\min_r}^{\alpha_r} - \chi_{\max_r}^{\alpha_r}\chi_{\min_r}^2}{2-\alpha_r} - \right.$$
$$\left. - \frac{\alpha_r\left(\chi_{\max_r}\chi_{\min_r}^{\alpha_r} - \chi_{\max_r}^{\alpha_r}\chi_{\min_r}\right)^2}{(1-\alpha_r)^2\left(\chi_{\max_r}^{\alpha_r} - \chi_{\min_r}^{\alpha_r}\right)}\right)\times \qquad (7)$$
$$\times\frac{(1-\alpha_r)^2\left(\chi_{\max_r}^{\alpha_r} - \chi_{\min_r}^{\alpha_r}\right)}{\alpha_r\left(\chi_{\max_r}\chi_{\min_r}^{\alpha_r} - \chi_{\max_r}^{\alpha_r}\chi_{\min_r}\right)^2};\ \alpha_r = 3 - 2H_r,$$

где $\chi_{\min_r}$ и $\chi_{\max_r}$ — минимальное и максимальное значения случайной величины, характеризующие размеры пачек пакетов для объединенного трафика r-го приоритета (класса обслуживания); α_r – характеристический показатель, отвечающий за тяжесть хвоста распределения; H_r — показатель Херста, определяющий степень устойчивости процесса [2].

Таковы основные результаты теории очередей с фиксированными приоритетами.

Исследование систем обслуживания с динамическими приоритетами. Анализ работы Клейнрока показал, что дисциплина обслуживания s-порядка с ДП является наиболее общей и включает в себя класс обслуживания с ФП [5]. Следовательно, данные дисциплины взаимосвязаны отношением подобия. Данное утверждение было доказано на основе третьей теоремы подобия [6, 7], из чего следует, что если выражение для какого-либо показателя качества функционирования рассматриваемых УК МСС с ДО на основе ДП получить в аналитической форме нельзя, то, применяя теорию подобия, можно определить искомые значения показателей качества функционирования УК МСС.

[1] Вероятность превышения заданного числа мест ожидания K в модели $M/M/1/\infty$ асимптотически сходится при увеличении K и малых потерях к вероятности потерь пакетов в модели $M/M/1/K$.

[2] Квадратичный коэффициент вариации случайной величины — мера относительного разброса случайной величины; показывает, какую долю среднего значения этой величины составляет ее средний разброс. Данные коэффициенты характеризуют изменчивость потока пакетов и определяются измерениями трафика на входе в УК МСС. $C^2 = 1$ — для показательного распределения времени, $C^2 = 0$ — для детерминированного.

Запишем константы (коэффициенты) подобия:

$$c_r^L = \frac{L_r^{\text{ДП}}}{L_r^{\text{ФП}}};\ c_r^{P_{K+1}} = \frac{P_{K+1}^{\text{ДП}}(r)}{P_{K+1}^{\text{ФП}}(r)}, \qquad (8)$$

где c_r^L, $c_r^{P_{K+1}}$ — коэффициенты подобия, определяемые отношениями средней длины очереди и вероятности потери пакетов соответственно для суммарного потока пакетов приоритета не выше *r*.

Рассматриваемые показатели качества функционирования УК, такие как L_r и $P_{K+1}(r)$, связаны между собой линейной зависимостью (1), поэтому можем записать

$$c_r^L = c_r^{P_{K+1}}.$$

Коэффициент подобия, определяемый отношением средних значений времени ожидания обслуживания для индивидуального потока пакетов *r*-го приоритета, составляет

$$c_r^{w^*} = \frac{w_r^{\text{ДП}}}{w_r^{\text{ФП}}}. \qquad (9)$$

Основные показатели качества функционирования УК типа $\vec{M}_r / \vec{M}_r / 1 / \infty$ *с относительными динамическими приоритетами*:

а) среднее время ожидания обслуживания [5]:

$$w_r^{\text{ДП}} = \frac{\dfrac{\rho_R}{\mu_R(1-\rho_R)} - \sum\limits_{i=r+1}^{R} \rho_i w_i \left(1 - \dfrac{b_i}{b_r}\right)}{1 - \sum\limits_{i=1}^{r-1} \rho_i \left(1 - \dfrac{b_r}{b_i}\right)},$$

где b_r — коэффициент, определяющий скорость нарастания приоритета для пакетов соответствующих классов обслуживания ($b_1 \geq b_2 \geq ... \geq b_r \geq 0$);

б) средняя длина очереди пакетов *r*-го приоритета в УК (формула Литтла)

$$l_r^{\text{ДП}} = w_r^{\text{ДП}} \lambda_r;$$

$$L_r^{\text{ДП}} = \sum_r l_r^{\text{ДП}} \quad L^{\text{ДП}} = \sum_R l_r^{\text{ДП}}; \qquad (10)$$

в) вероятность превышения заданного объема буфера *K*

$$P_{K+1}^{\text{ДП}}(r) = c_r^{P_{K+1}} P_{K+1}^{\text{ФП}}(r), \qquad (11)$$

где $c_r^{P_{K+1}}$ — коэффициент (константа) подобия систем обслуживания (при фиксированных значениях ρ_r), который выводится согласно (8);

г) джиттер задержки пакетов, определяемый по формуле (2), где второй момент времени ожидания обслуживания рассчитывается на основе теории подобия (9) согласно правилу нахождения второго момента произведения случайной величины и константы:

$$w_r^{\text{ДП}(2)} = \left(c_r^{w^*}\right)^2 w_r^{\text{ФП}(2)}, \qquad (12)$$

где $w_r^{\text{ФП}(2)}$ — второй момент времени ожидания обслуживания в УК типа $\vec{M}_r / \vec{M}_r / 1 / \infty$ с ФП, рассчитываемый по формуле (3).

Для получения аналитических зависимостей показателей качества функционирования УК типа $\vec{G}_r / \vec{G}_r / 1 / \infty$ с ДП использовались решения для моделей теории очередей с простейшими потоками и относительными динамическими приоритетами, а также метод исследования УК при произвольных распределениях поступления и обслуживания пакетов различных классов качества и методы теории подобия [2].

Основные показатели качества функционирования УК типа $\vec{G}_r / \vec{G}_r / 1 / \infty$ *с относительными динамическими приоритетами* [7]:

а) средняя длина очереди, определяемая с использованием метода диффузионной аппроксимации и «закона сохранения накопленной в очереди работы»:

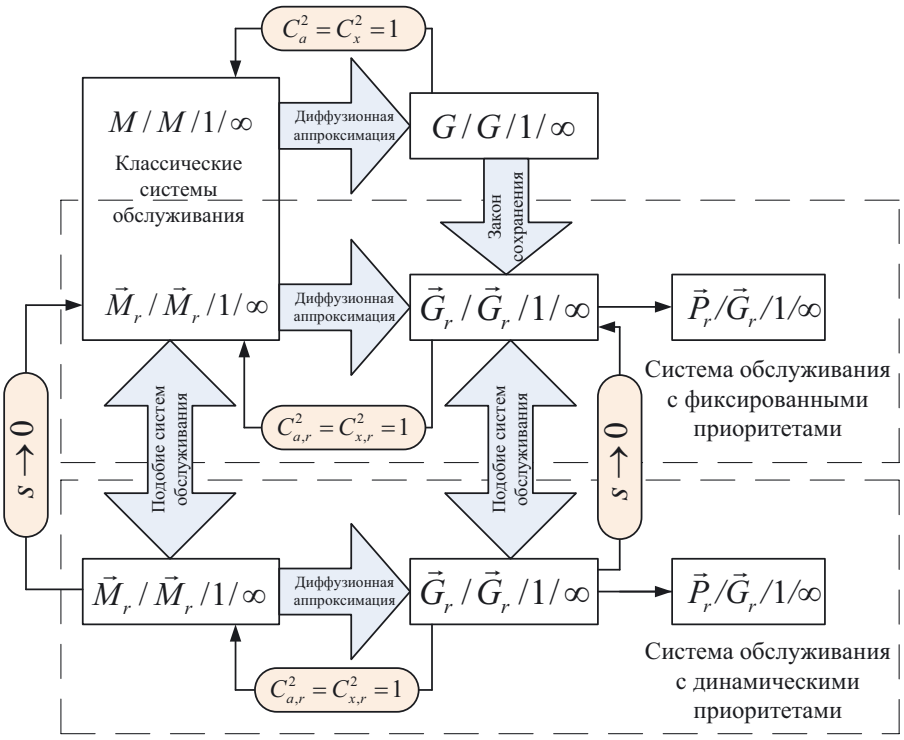

Рис. 2. **Структура взаимосвязей моделей УК МСС**

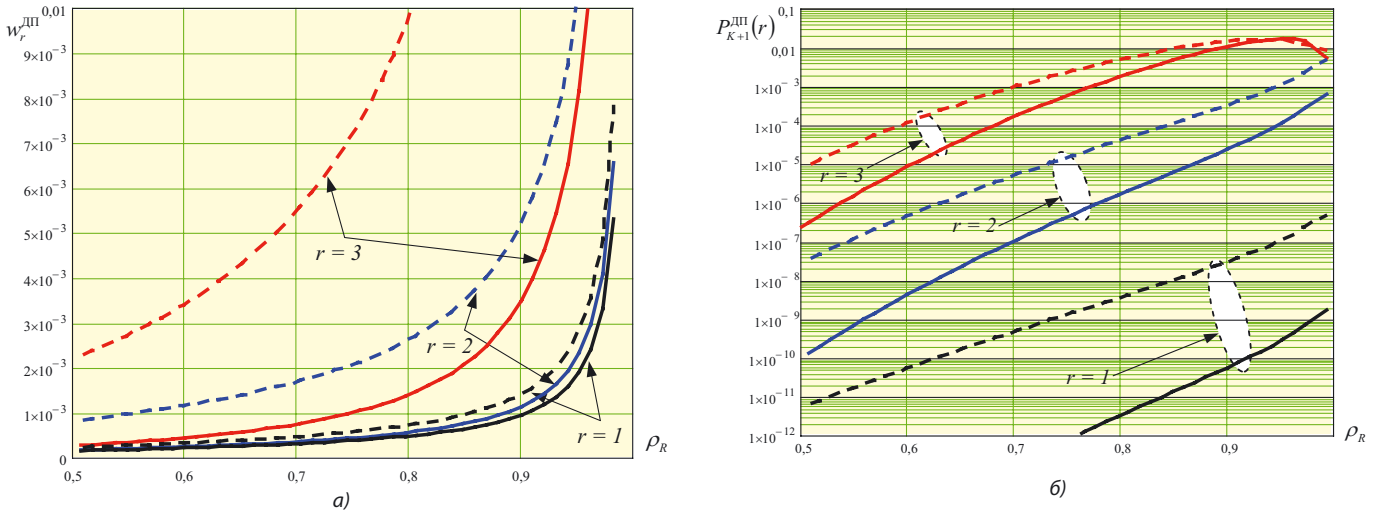

Рис. 3. **Результаты оценки показателей качества функционирования:**
а **— среднее время ожидания обслуживания;** *б* **— вероятность превышения заданного объема буфера в УК типа $\vec{M}_r / \vec{M}_r / 1 / \infty$ (сплошная линия) и $\vec{P}_r / \vec{M}_r / 1 / \infty$ (пунктирная линия) с ДП**

$$L_r^{ДПG/G/1} = L_r^{ДПM/M/1} \frac{C_{a,r}^2 + C_{x,r}^2}{2},$$

где $L_r^{ДПM/M/1}$ — средняя длина очереди объединенного потока пакетов приоритета не выше r ($\overline{1,r}$) с суммарной интенсивностью поступающей нагрузки ρ_r для УК типа $\vec{M}_r / \vec{M}_r / 1 / \infty$ на основе ДО с ДП, определяемая согласно (10). При этом $l_r^{ДП}$ рассчитывается по (1);

б) среднее время ожидания обслуживания $w_r^{ДП}$, определяемое по (4);

в) вероятность $P_{K+1}^{ДП}(r)$ превышения заданного объема буфера K, вычисляемая согласно (11), с учетом того что $P_{K+1}^{ФП}(r)$ — вероятность превышения заданного объема буфера для УК типа $\vec{G}_r / \vec{G}_r / 1 / \infty$ на основе ДО с фиксированными приоритетами, рассчитываемая согласно (5);

г) джиттер задержки пакетов, определяемый по формуле (2), где второй момент времени ожидания обслуживания рассчитывается на основе теории подобия (9) согласно (12) с учетом того, что $w_r^{ФП(2)}$ — второй момент времени ожидания обслуживания для УК типа $\vec{G}_r / \vec{G}_r / 1 / \infty$ с ФП, вычисляемый по (6) .

Для получения зависимостей показателей качества функционирования УК типа $\vec{P}_r / \vec{G}_r / 1 / \infty$ (входящий поток, описываемый ограниченным распределением Парето) необходимо квадратичный коэффициент вариации времени поступления пакетов рассчитывать по формуле (7) .

На рис. 2 показана структура взаимосвязей между исследуемыми моделями УК МСС с относительными фиксированными и динамическими приоритетами. На основе метода исследования УК МСС при произвольных распределениях поступления и обслуживания пакетов различных классов качества (приоритетов) получены модели УК типа $\vec{G}_r / \vec{G}_r / 1 / \infty$ и, как частный случай, модели УК типа $\vec{P}_r / \vec{G}_r / 1 / \infty$. При соответствующем выборе квадратичных коэффициентов вариации времени поступления и обслуживания пакетов $C_{a,r=1}^2 = C_{x,r}^2 = 1$ данные модели сходятся к моделям «классических» систем обслуживания $\vec{M}_r / \vec{M}_r / 1 / \infty$.

На рис. 3 представлены результаты оценки показателей качества функционирования УК типа $\vec{M}_r / \vec{M}_r / 1 / \infty$ и $\vec{P}_r / \vec{M}_r / 1 / \infty$ на основе ДО с ДП.

Заключение. Используя известные результаты для «классических» моделей теории очередей, метод исследования УК при произвольных распределениях поступления и обслуживания пакетов различных классов качества, а также методы теории подобия, были получены модели узлов коммутации мультисервисных сетей связи с относительными фиксированными и динамическими приоритетами при простейших и произвольных потоках поступления-обслуживания. Данные математические модели позволяют для отдельных узлов коммутации рассчитывать основные показатели качества обслуживания трафика, такие как средняя задержка пакетов, джиттер задержки и потери.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Крылов В.В.** Теория телетрафика и ее приложения.— СПб.: БХВ-Петербург, 2005.— 288 с.
2. **Назаров А.Н., Сычев К.И.** Модели и методы расчета показателей качества функционирования узлового оборудования и структурно-сетевых параметров сетей связи следующего поколения.— Красноярск: Поликом, 2011.— 491 с.
3. **Шелухин О.И.** Фрактальные процессы в телекоммуникациях.— М.: Радиотехника, 2003.— 480 с.
4. ITU-T Recommendation Y.1540. Internet protocol data communication service — IP packet transfer and availability performance parameters.— March 2011.
5. **Клейнрок Л.** Вычислительные системы с очередями.— М.: Мир, 1979.— 600 с.
6. **Гухман А.А.** Введение в теорию подобия.— М.: Высшая школа, 1973.— 295 с.
7. **Умнов А.Е., Сычев К.И.** Способ обеспечения качества обслуживания разнородного трафика в узлах коммутации мультисервисных сетей связи на основе динамических приоритетов //T-Comm — Телекоммуникации и Транспорт.— 2012.— № 7.— С. 206–210.

Получено после доработки 05.03.14