

УДК 623.624

## Показатели своевременности обслуживания трафика в системе массового обслуживания $Ra/M/1$ на основе аппроксимации результатов имитационного моделирования

Ушанев К. В., Макаренко С. И.

**Постановка задачи:** Развитие телекоммуникационных систем и рост объема мультимедийного трафика, передаваемого через них, актуализируют вопросы обеспечения своевременности и качества его обслуживания. Анализ реальных трасс передачи мультимедийного трафика показывают, что такой трафик обладает свойством структурной сложности. При этом наличие этого свойства ведет к существенному снижению своевременности обслуживания трафика в узлах сети. **Целью работы** является проведение анализа своевременности обслуживания сложного трафика в узлах сети на основе имитационного моделирования и аппроксимации полученных результатов. **Используемые методы.** Для моделирования обслуживания трафика в узле использовались модели систем массового обслуживания  $M/M/1$  (для простого трафика) и  $Ra/M/1$  (для трафика со сложной структурой). Оценка своевременности обслуживания трафика проводилась по показателю – время задержки пакета в модели узла. В качестве метода исследования было выбрано имитационное моделирование, а в качестве инструментария – среда имитационного моделирования GPSS World. При выводе аналитических выражений для зависимости своевременности обслуживания трафика от уровня загрузки узла и уровня сложности трафика использовалось двухуровневая аппроксимация результатов имитационного моделирования. **Новизна.** Элементом новизны работы является аналитическое выражение для показателя своевременности обслуживания сложного трафика, одновременно учитывающее как уровень загрузки узла, так и уровень сложности трафика. **Результаты и их значимость.** Полученное аналитическое выражение для оценки своевременности обслуживания сложного трафика может быть использовано при решении прикладных задач проектирования и анализа сетей связи при передаче мультимедийного трафика в условиях высокой загрузки сети. Кроме того, данное выражение может быть использовано для проверки достоверности результатов ранее проведенных исследований, основанных на аналитических методах оценки качества обработки заявок в системах массового обслуживания.

**Ключевые слова:** трафик, распределение Парето, обработка трафика, пакетная коммутация.

### Актуальность

Развитие телекоммуникационных систем и рост объема мультимедийного трафика (речь, видеоданные, потоки реального времени M2M), передаваемого через них, актуализируют вопросы обеспечения своевременности и качества обслуживания QoS (Quality of service) мультимедийного трафика. Анализ реальных трасс передачи мультимедийного трафика, проведенный в работах [1-3] показывает, что мультимедийный трафик обладает свойством структурной сложности. Наличие этого свойства ведет к снижению своевременности обслуживания трафика в узлах сети.

Под трафиком со сложной структурой будем понимать трафик, у которого коэффициент вариации  $c_\tau$  интервала времени между очередными пакетами имеет значения  $c_\tau > 1$ . Коэффициент вариации  $c_\tau$  – дисперсионная характеристика трафика, определяющая его структурную сложность, и вычисляемая в соответствии с выражением [4]:

$$c_\tau = \sigma_\tau / m_\tau,$$

где  $\tau$  – интервал времени между очередными пакетами трафика;  $m_\tau$  – математическое ожидание значений интервала времени между поступлением очередных пакетов трафика;  $\sigma_\tau$  – среднее квадратическое отклонение значений интервала времени между поступлением очередных пакетов трафика.

Под своевременностью обслуживания трафика в узле сети будем понимать время от момента прихода начала пакета в узел, до момента покидания пакетом узла. Это время определяется задержкой при ожидании пакета в буфере узла и временем его обработки в коммутационном устройстве. При этом время обработки в коммутационном устройстве определяется объемом пакета и, как правило, для этого времени принимается допущение об экспоненциальном законе его распределения.

В работах [3, 5-7] показано, что эффективное решение задач маршрутизации, своевременной передачи информации, критичной к задержкам, а также мультимедийной информации невозможно решать без учета свойств структурной сложности трафика. Таким образом, необходимо учитывать влияние структуры трафика на его передачу по каналам и обработку в узлах сети.

В работах [8-23, 31, 34-39] на основе моделей теории систем массового обслуживания (СМО) были исследованы процессы обработки сложного трафика в узлах сети. В результате проведенных исследований был выявлен эффект существенного (в десятки раз) снижения своевременности обслуживания сложного трафика ( $c_\tau > 1$ ) относительно обслуживания простого трафика, моделируемого простейшим пуассоновским потоком ( $c_\tau = 1$ ). Ввиду того, что вышеуказанными авторами для оценки своевременности обслуживания трафика в узлах использовались различные методические подходы и допущения, то зачастую полученные результаты значительно расходятся. Кроме того, в большинстве исследований не учитываются уровень структурной сложности трафика, а также влияние загрузки коммутатора узла на получаемые результаты.

### Постановка задачи

Указанные выводы актуализируют проведение исследований своевременности обслуживания сложного трафика без введения дополнительных ограничений, связанных с поиском аналитических решений, которые могли бы служить своеобразным эталоном. В связи с этим в качестве исследовательского методического аппарата было выбрано имитационное моделирование, а в качестве инструментария исследования – среда имитационного моделирования GPSS World. При этом результаты исследования на основе имитационного моделирования позволят проверить достоверность результатов ранее проведенных исследований, основанных на аналитических методах оценки QoS в СМО [1, 3-7, 13-17, 22-31, 34-39], а также установить границы применимости этих методов для расчета показателей обслуживания сложного трафика.

Цель работы – построение и исследование аналитических зависимостей уровня своевременности обслуживания сложного трафика от значения показателей сложности и загрузки узла сети за счет аппроксимации результатов имитационного моделирования.

Достижение цели исследования обеспечивается последовательным решением частных задач:

- 1) проведением имитационного моделирования обслуживания сложного трафика в узле сети при различных показателях сложности и загрузки узла;
- 2) аппроксимацией результатов имитационного моделирования для каждого конкретного значения показателя сложности структуры в зависимости от уровня загрузки узла;
- 3) поиском общих закономерностей и двухуровневой аппроксимацией показателей своевременности в зависимости, как от показателя сложности, так и от показателя загрузки узла.

В качестве модели сложного трафика использовался поток, в котором время между приходом заявок имеет Парето-распределение. Выбор Парето-распределения в качестве модели сложного трафика обусловлено следующими соображениями.

Во-первых, как показано в работе [21], сложный трафик с коэффициентом вариации  $c_\tau > 1$  может быть представлен моделью потока с Парето-распределением

$$F(\tau) = 1 - \left(\frac{k}{\tau}\right)^\alpha, \quad k > 0, \alpha > 0, \tau > k, \quad (1)$$

где  $\tau$  – интервал времени между поступлением очередных заявок в потоке с распределением Парето;  $k$  – коэффициент масштаба;  $\alpha$  – параметр формы распределения Парето.

Зависимость между коэффициентом вариации  $c_\tau$  и параметром  $\alpha$  распределения Парето в диапазоне  $\alpha \in [1, 2; 2]$  с погрешностью до 3,27% может быть аппроксимирована выражением [21]

$$c_\tau(\alpha) = 1,41 \cdot 10^4 \cdot e^{-5,384\alpha} + 1,52,$$

откуда

$$\alpha = \frac{1}{5,384} \ln\left(\frac{c_\tau + 1,52}{1,41 \cdot 10^4}\right). \quad (2)$$

Во-вторых, как показано в работах [1, 6, 9, 12, 15, 18, 23-25, 29, 32, 33] самоподобный трафик с коэффициентом Херста  $H$  также может быть представлен моделью потока с Парето распределением (1). При этом зависимость между коэффициентом Херста в диапазоне  $H \in (0,5; 1]$  и параметром  $\alpha$  имеет вид [6, 15, 23, 32, 33]

$$\alpha = 3 - 2H. \quad (3)$$

В-третьих, корректность и адекватность моделирования сложного трафика потоком с Парето распределением моментов поступления заявок

подтверждается аналогичным подходом, используемым различными исследователями в работах [17, 22, 23, 29, 31].

Для формализации задачи в работе введены следующие обозначения:

$\tau$  – интервал времени между поступлением очередных пакетов трафика;

$\alpha$  – параметр формы распределения Парето;

$k$  – коэффициент масштаба распределения Парето;

$H$  – коэффициент Херста, определяющий уровень самоподобия трафика;

$m_\tau$  – математическое ожидание значений интервала времени между поступлением очередных пакетов трафика;

$\sigma_\tau$  – среднее квадратическое отклонение значений интервала времени между поступлением очередных пакетов трафика;

$c_\tau$  – дисперсионная характеристика трафика, определяющая его структурную сложность;

$\lambda$  – интенсивность поступления заявок в потоке с экспоненциальным распределением интервалов времени между ними (имитационная модель  $M/M/1$ );

$\mu=1/T_{\text{обсл}}=1$  – интенсивность обслуживания потока заявок в имитационных моделях  $Pa/M/1$  и  $M/M/1$ ;

$Q=\infty$  – объем буфера в имитационных моделях  $Pa/M/1$  и  $M/M/1$ ;

$\rho$  – загрузка СМО;

$T_{\text{обсл}}=1$  – время обработки заявки в устройстве обслуживания;

$T_{\text{зад}}$  – время задержки заявки в узле;

$T_{\text{зад exp}}$  – время задержки заявки в узле для потока с экспоненциальным распределением моментов поступления заявок;

$T_{\text{зад par}}$  – время задержки заявки в узле для потока с Парето-распределением моментов поступления заявок;

$T_{\text{зад par}}(\rho)$  – функция, аппроксимирующая результаты имитационного моделирования времени задержки заявок потока с Парето-распределением  $T_{\text{зад par}}$  в узле в зависимости от уровня загрузки узла  $\rho$  при определенном уровне сложности трафика  $\alpha$ ;

$T_{\text{зад exp}}(\rho)$  – функция, аппроксимирующая результаты имитационного моделирования времени задержки заявок потока с экспоненциальным распределением  $T_{\text{зад exp}}$  в узле в зависимости от уровня загрузки узла  $\rho$ ;

$T_{\text{зад par}}(\alpha, \rho)$  – функция, аппроксимирующая результаты имитационного моделирования времени задержки заявок потока с Парето-распределением  $T_{\text{зад par}}$  в узле в зависимости от уровня загрузки узла  $\rho$  при различных значениях уровня сложности трафика  $\alpha$ ;

$T_{\text{зад par}}^*(\alpha, \rho)$  – значение времени задержки заявок потока с Парето-распределением в узле, полученное при проведении имитационного моделирования в зависимости от уровня загрузки  $\rho$  узла и уровне сложности трафика  $\alpha$ ;

$A_\rho, B_\rho, C_\rho$  – параметры функции аппроксимации для  $T_{\text{зад par}}(\rho)$  и  $T_{\text{зад exp}}(\rho)$ ;

$A_\rho(\alpha), B_\rho(\alpha), C_\rho(\alpha)$  – функции, аппроксимирующие значения параметров  $A_\rho, B_\rho$  и  $C_\rho$  при различных значениях  $\alpha$ ;

$D_\alpha, E_\alpha, F_\alpha$  – параметры аппроксимации для функций  $A_p(\alpha), B_p(\alpha)$  и  $C_p(\alpha)$ ;  
 $\delta$  – относительная погрешность аппроксимации.

### Имитационное моделирование обслуживания сложного трафика с Парето-распределением

Для исследования своевременности обработки сложного трафика – времени задержки  $T_{\text{зад}}$  пакетов в узле связи была использована имитационная модель с Парето-распределением моментов поступления потока заявок и экспоненциальным временем обслуживания  $Pa/M/1$  (рис. 1), разработанная одним из авторов в среде GPSS World. Текст данной модели представлен в приложении 1, и она была подробно исследована в работе [21].

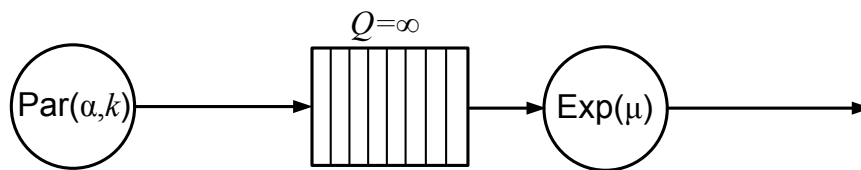


Рис. 1. Имитационная модель  $Pa/M/1$  обслуживания трафика с распределением Парето

Для проведения сравнительного анализа результатов обслуживания сложного и простого трафиков была использована имитационная модель с экспоненциальным распределением моментов поступления и обслуживания потока заявок  $M/M/1$  (рис. 2). Текст данной модели в среде имитационного моделирования GPSS World представлен в приложении 2.

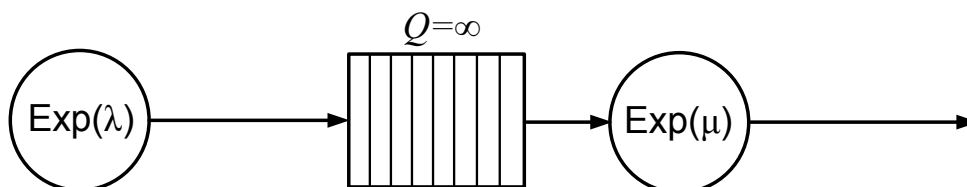


Рис. 2. Имитационная модель  $M/M/1$  обслуживания трафика с экспоненциальным распределением

При проведении моделирования для имитационных моделей были введены следующие ограничения [21].

1. Объем буфера  $Q=\infty$ .
2. Время обработки заявки в устройстве обслуживания принято за единицу  $T_{\text{обсл}}=1/\mu=1$ . К данному времени нормированы все результаты моделирования.
3. Значение параметра  $\alpha$  распределения Парето в имитационной модели  $Pa/M/1$  выбиралось из диапазона  $\alpha \in [1, 2; 2]$  с шагом 0,1.
4. Значение коэффициента масштаба  $k$  распределения Парето в имитационной модели  $Pa/M/1$  выбиралось таким, чтобы обеспечить исследование модели со значением загрузки СМО  $\rho$  в диапазоне  $\rho \in [0, 1; 1)$  с шагом 0,1. Выбор конкретного значения  $k$ ,

соответствующего необходимому уровню загрузки  $\rho$ , определялся по выражению [21]:

$$\rho = \frac{T_{\text{обсл}}}{m_{\text{пар}}(\tau_{\text{пар}})} = \frac{T_{\text{обсл}}(\alpha - 1)}{\alpha \cdot k}, \Rightarrow k = \frac{T_{\text{обсл}}(\alpha - 1)}{\alpha \cdot \rho}. \quad (4)$$

5. Значение интенсивности входного потока  $\lambda$  в имитационной модели  $M/M/1$  выбиралось таким, чтобы обеспечить равенство математического ожидания потоков с Парето- и экспоненциальным распределениями [21]:

$$m_{\text{пар}}(\tau_{\text{пар}}) = m_{\text{exp}}(\tau_{\text{exp}}), \Rightarrow \frac{\alpha \cdot k}{\alpha - 1} = \frac{1}{\lambda}, \Rightarrow \lambda = \frac{\alpha - 1}{\alpha \cdot k} = \frac{\rho}{T_{\text{обсл}}}. \quad (5)$$

6. В каждом эксперименте с имитационными моделями  $M/M/1$  и  $Pa/M/1$  с определенной комбинацией параметров  $\lambda$ ,  $\alpha$ ,  $k$ ,  $\rho$  проводилась генерация серии из  $10^7$  заявок. Для каждой такой комбинации параметров проводилось 20 экспериментов с различными номерами генераторов экспоненциального распределения в устройстве обслуживания (см. листинги программ в приложениях 1 и 2). Это позволило обеспечить доверительную вероятность 0,99 при 1% доверительном интервале:  $T_{\text{зад}} \pm 0,01 T_{\text{зад}}$ .

Вышеуказанные ограничения позволили провести сравнительный анализ своевременности обслуживания потоков с Парето- и экспоненциальным распределениями в широком диапазоне загрузки СМО  $\rho$  при равенстве математических ожиданий исследуемых потоков. Частные результаты проведенного исследования представлены в таблице 1 по материалам работы [21].

Результаты проведенного моделирования позволили сформировать первоначальный базис статистических данных для проведения аппроксимации и получения аналитических выражений для оценки зависимости  $T_{\text{зад}}(\rho)$  при различных значениях  $\alpha$ .

Таблица 1 – Результаты оценки уровня своевременности обслуживания сложного и простого трафика в зависимости от уровня загрузки устройства обслуживания [21]

$T_{обсл}$		1									
Загрузка $\rho$		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	
МОЖ $m_t$ , соответствующая значению загрузки $\rho$ при $T_{обсл}=1$		10	5	3,333	2,5	2	1,667	1,427	1,25	1,111	
Экспон.	$T_{зад\ exp}(\rho)$	1,11	1,25	1,43	1,67	2,0	2,5	3,33	4,87	9,95	
Параметры распределения Парето	$\alpha=2$	$k^*$	5,0	2,5	1,667	1,25	1,0	0,834	0,714	0,625	0,556
	$c_t=1,62$ $H=0,5$	$T_{зад\ par}(\rho)$	1,0	1,04	1,13	1,3	1,57	2,01	2,81	4,56	10,5
	$\alpha=1,9$	$k^*$	4,737	2,368	1,579	1,184	0,947	0,79	0,677	0,592	0,526
	$c_t=1,95$ $H=0,55$	$T_{зад\ par}(\rho)$	1,001	1,042	1,148	1,33	1,624	2,109	3,0	5,015	12,03
	$\alpha=1,8$	$k^*$	4,444	2,222	1,48	1,11	0,889	0,741	0,635	0,556	0,494
	$c_t=2,44$ $H=0,6$	$T_{зад\ par}(\rho)$	1,002	1,05	1,169	1,372	1,7	2,25	3,286	5,646	14,36
	$\alpha=1,7$	$k^*$	4,117	2,059	1,372	1,029	0,823	0,686	0,588	0,515	0,457
	$c_t=3,15$ $H=0,65$	$T_{зад\ par}(\rho)$	1,003	1,061	1,2	1,43	1,81	2,46	3,71	6,67	19,68
	$\alpha=1,6$	$k^*$	3,75	1,875	1,25	0,938	0,75	0,625	0,536	0,468	0,417
	$c_t=4,2$ $H=0,7$	$T_{зад\ par}(\rho)$	1,005	1,077	1,24	1,513	1,968	2,771	4,367	8,54	27,51
	$\alpha=1,5$	$k^*$	3,333	1,667	1,111	4	0,667	0,556	0,476	0,417	0,37
	$c_t=6$ $H=0,75$	$T_{зад\ par}(\rho)$	1,01	1,1	1,31	1,65	2,23	3,3	5,61	11,9	48,61
	$\alpha=1,4$	$k^*$	2,857	1,429	0,952	0,714	0,571	0,476	0,408	0,357	0,317
	$c_t=8,97$ $H=0,8$	$T_{зад\ par}(\rho)$	1,016	1,15	1,42	1,88	2,73	4,38	8,29	21,09	120,8
	$\alpha=1,3$	$k^*$	2,308	1,154	0,769	0,577	0,462	0,385	0,33	0,288	0,256
	$c_{t\ par}=14,2$ $H=0,85$	$T_{зад\ par}(\rho)$	1,033	1,24	1,65	2,4	3,88	7,22	16,74	61,98	575,4
$\alpha=1,2$	$k^*$	1,667	0,834	0,556	0,417	0,333	0,278	0,238	0,208	0,185	
$c_t=23,6$ $H=0,9$	$T_{зад\ par}(\rho)$	1,08	1,48	2,31	4,1	8,6	22,2	78,5	463,6	16542	

Примечания.

- В таблице значения, выделенные серым цветом, соответствуют параметрам загрузки СМО  $\rho$ , желтым – значениям своевременности обслуживания в модели  $M/M/1$  потока с экспоненциальным распределением, интенсивность которого определяется в соответствии с выражением (5), зеленым – значениям своевременности обслуживания в модели  $Pa/M/1$  потока с Парето-распределением, параметры которого заданы в ячейках розового цвета.
- Значение  $k^*$  приведено справочно и соответствует указанному в таблице уровню загрузки  $\rho$  устройства обслуживания в соответствии с выражением (4).
- В ячейках со значением параметра  $\alpha$  дополнительно приведены значения коэффициента вариации  $c_t$  и коэффициента Херста  $H$ , которые соответствуют указанному значению  $\alpha$ .

### Аппроксимация результатов имитационного моделирования $T_{\text{зад}}(\rho)$ в зависимости от уровня загрузки узла для различного уровня сложности трафика

Проведенный анализ результатов имитационного моделирования, представленный в таблице 1, позволил сделать следующие предварительные выводы.

1. В обеих моделях СМО  $M/M/1$  и  $Pa/M/1$  при росте загрузки  $0,6 \leq \rho < 1$  своевременность обработки заявок снижается, а ее показатель – время задержки заявки в устройстве обслуживания  $T_{\text{зад}}$  существенно возрастает, причем данный рост носит нелинейный характер.
2. В модели СМО  $Pa/M/1$  характер снижения своевременности обработки (рост времени задержки  $T_{\text{зад пар}}$ ) определяется показателем сложности трафика, а именно параметром  $\alpha$  распределения Парето. При этом, для большинства значений уровня сложности трафика, определяемого параметром  $\alpha$ , при условии роста загрузки  $0,6 \leq \rho < 1$  значение времени задержки  $T_{\text{зад пар}}$  в СМО  $Pa/M/1$  выше, чем  $T_{\text{зад exp}}$  в модели СМО  $M/M/1$  с экспоненциальным потоком заявок.
3. Нелинейный рост времени задержки  $T_{\text{зад пар}}$  в СМО  $Pa/M/1$  при значениях загрузки  $0,6 \leq \rho < 1$  может быть аппроксимирован экспоненциальной функцией.

Для проведения аппроксимации был выбран диапазон значений загрузки СМО  $0,6 \leq \rho < 1$ . Это было сделано по двум причинам. Во-первых, этот диапазон загрузок наиболее интересен для исследования с точки зрения практики, так как именно при высокой загрузке сети начинают проявляться негативные эффекты обработки сложного реального трафика. Во-вторых, именно этому диапазону загрузки соответствует экспоненциальный тип аппроксимирующей функции  $T_{\text{зад пар}}(\rho)$ , что позволяет использовать этот тип для всех значений  $\alpha$ , впоследствии перейдя к аппроксимации более высокого уровня.

При аппроксимации времени задержки  $T_{\text{зад пар}}(\rho)$  при конкретном значении параметра  $\alpha$  и различных уровнях загрузки была использована экспоненциальная функция, имеющая вид:

$$T_{\text{зад пар}}(\rho) = A_{\rho} e^{B_{\rho} \cdot \rho} + C_{\rho}, \quad (6)$$

где  $A_{\rho}$ ,  $B_{\rho}$ ,  $C_{\rho}$  – параметры аппроксимирующей функции.

Вычисление параметров аппроксимации  $A_{\rho}$ ,  $B_{\rho}$ ,  $C_{\rho}$  производилось в программной среде MathCAD с использованием функции `expfit`.

В результате проведенной аппроксимации были получены значения параметров аппроксимирующих функций для различных значений  $\alpha$ . Значения этих параметров, а также дополнительные параметры аппроксимации для различных значений  $\alpha$  сведены в таблицу 2.



Таблица 2 – Параметры аппроксимирующих функций вида

$$T_{\text{зад пар}}(\rho) = A_{\rho} e^{B_{\rho} \cdot \rho} + C_{\rho} \text{ для различных значений } \alpha$$

Показатель сложности трафика в модели потока с Парето-распределением	Значения параметров в функции $T_{\text{зад пар}}(\rho)$			Средняя относительная погрешность аппроксимации	Аппроксимируемый диапазон загрузки $\rho$	
	$A_{\rho}$	$B_{\rho}$	$C_{\rho}$			
Повышение сложности трафика	$\alpha=2$	$3,532 \cdot 10^{-4}$	11,237	1,778	2,1%	$0,6 \leq \rho \leq 0,9$
	$\alpha=1,9$	$3,147 \cdot 10^{-4}$	11,535	1,866	2,2%	
	$\alpha=1,8$	$2,411 \cdot 10^{-4}$	12,047	2,018	2,6%	
	$\alpha=1,7$	$1,239 \cdot 10^{-4}$	13,119	2,28	3,3%	
	$\alpha=1,6$	$1,187 \cdot 10^{-4}$	13,56	2,536	3,3%	
	$\alpha=1,5$	$3,583 \cdot 10^{-5}$	15,516	3,25	5,2%	
	$\alpha=1,4$	$2,727 \cdot 10^{-6}$	19,517	4,881	8,3%	
	$\alpha=1,3$	$3,344 \cdot 10^{-7}$	23,611	9,01	12%	
	$\alpha=1,2$	$7,485 \cdot 10^{-11}$	36,696	44,285	32,7%	

Отдельные данные моделирования и аппроксимирующие их функции, а также абсолютные оценки погрешности аппроксимации в графическом виде представлены на рис. 3.

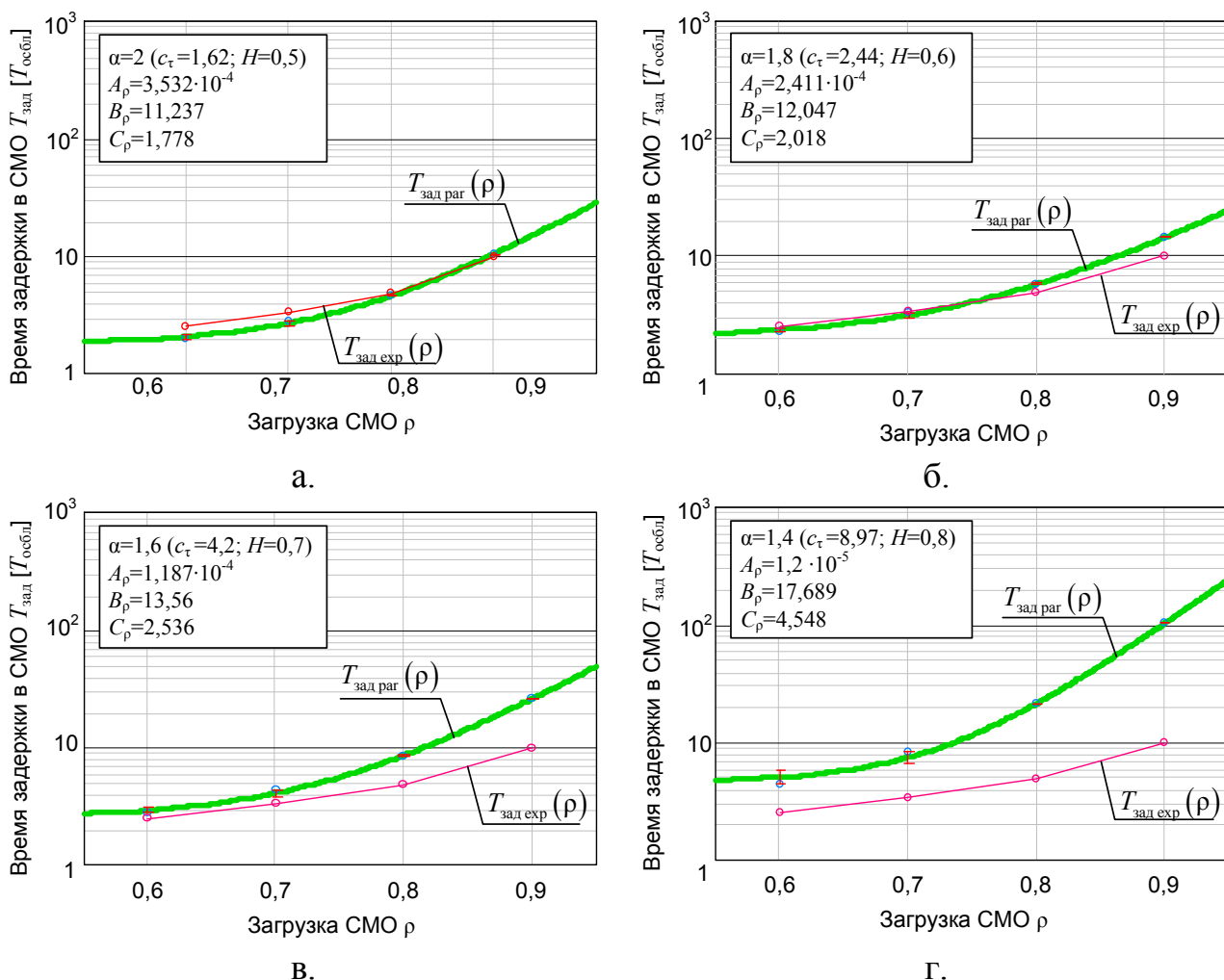


Рис. 3. Значения  $T_{\text{зад пар}}$ ,  $T_{\text{зад экр}}$  полученные на основе имитационного моделирования в моделях СМО  $Pa/M/1$ ,  $M/M/1$  и аппроксимирующие их функции  $T_{\text{зад пар}}(\rho)$ ,  $T_{\text{зад экр}}(\rho)$

Проведенный анализ погрешности аппроксимации (рис. 4) для функций  $T_{\text{зад пар}}(\rho)$  при различных значениях  $\alpha$ , показал, что ошибки аппроксимации быстро убывают с увеличением загрузки СМО. Таким образом, аналитические функции  $T_{\text{зад пар}}(\rho)$  могут быть использованы для прикладных нужд, так как погрешность аппроксимации для большинства функций (при  $1,3 \leq \alpha \leq 2$ ) не превышает 20% при значении загрузки  $\rho=0,67$  и 10% – при  $\rho=0,75$ .

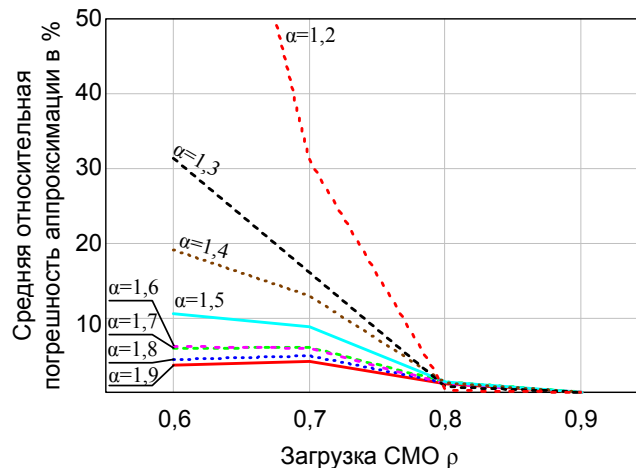


Рис. 4. Погрешности аппроксимации для функций  $T_{\text{зад пар}}(\rho)$  при различных значениях  $\alpha$

При аппроксимации значений времени задержки заявок потока с экспоненциальным распределением  $T_{\text{зад exp}}$ , полученного в результате имитационного моделирования СМО  $M/M/1$ , также была использована экспоненциальная функция вида:

$$T_{\text{зад exp}}(\rho) = A_{\rho} e^{B_{\rho} \cdot \rho} + C_{\rho}. \quad (7)$$

Параметры аппроксимации  $A_{\rho}$ ,  $B_{\rho}$ ,  $C_{\rho}$ , вычисленные в программной среде MathCAD с использованием функции `expfit` для обслуживания экспоненциального потока в СМО  $M/M/1$  при  $0,6 \leq \rho \leq 0,9$ , равны  $A_{\rho} = 5,9 \cdot 10^{-4}$ ,  $B_{\rho} = 10,527$ ,  $C_{\rho} = 2,255$ . При этом средняя относительная погрешность аппроксимации составляет 2,2%.

### Аппроксимация результатов имитационного моделирования $T_{\text{зад}}(\alpha, \rho)$ в зависимости от уровня загрузки узла и уровня сложности трафика

Изменение значений параметров  $A_{\rho}$ ,  $B_{\rho}$ ,  $C_{\rho}$  в аппроксимирующей функцией  $T_{\text{зад пар}}(\rho) = A_{\rho} e^{B_{\rho} \cdot \rho} + C_{\rho}$  (таблица 2) в зависимости от показателя сложности трафика  $\alpha$  в Парето-распределении представлено на рис. 5. Анализ этих графических зависимостей позволил прийти к выводу о возможности их дальнейшей аппроксимации (аппроксимации второго уровня) в виде функций  $A_{\rho}(\alpha)$ ,  $B_{\rho}(\alpha)$ ,  $C_{\rho}(\alpha)$ . Такая аппроксимация позволит аналитически обобщить результаты имитационного моделирования и сформировать аналитическое выражение для оценки времени задержки  $T_{\text{зад пар}}(\alpha, \rho)$  в зависимости, как от уровня загрузки узла, так и уровня сложности трафика.

Из результатов моделирования, которые были использованы для аппроксимации, были исключены данные для  $T_{\text{зад пар}}(\alpha=1,2)$ . Это было сделано для повышения общей точности аппроксимации, так как данные для  $T_{\text{зад пар}}(\alpha=1,2)$  имеют высокую погрешность результатов, как имитационного моделирования, так и проведенной аппроксимации (34,5%).

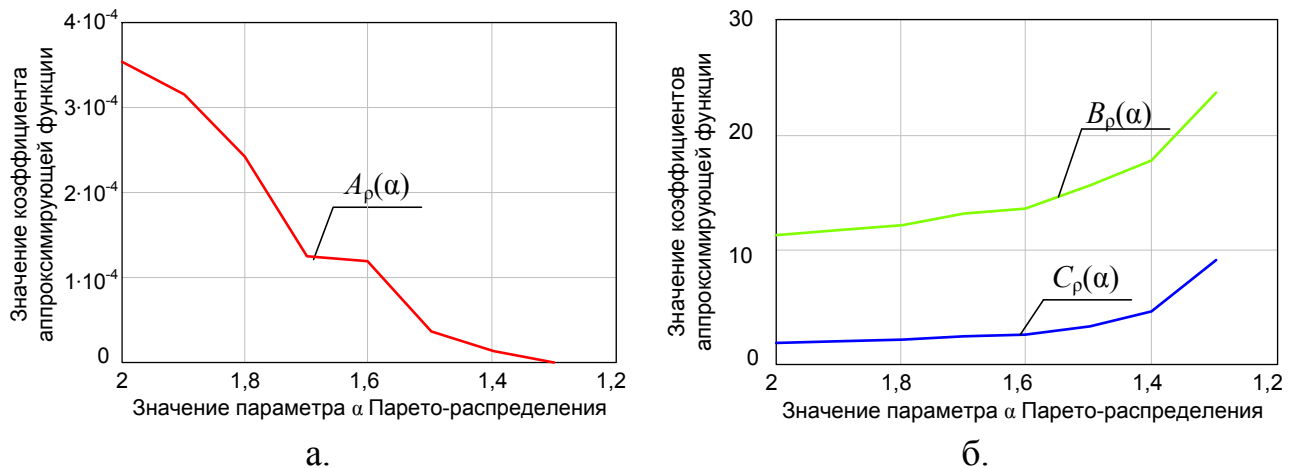


Рис. 5. Изменение значений параметров  $A_p$ ,  $B_p$ ,  $C_p$  в функции

$T_{\text{зад пар}}(\rho) = A_p e^{B_p \cdot \rho} + C_p$  в зависимости от показателя  $\alpha$  Парето-распределения

При аппроксимации времени задержки  $T_{\text{зад пар}}(\alpha, \rho)$  была использована сложная экспоненциальная функция, имеющая вид:

$$T_{\text{зад пар}}(\alpha, \rho) = A_p(\alpha) e^{B_p(\alpha) \rho} + C_p(\alpha), \quad (8)$$

где  $A_p(\alpha)$ ,  $B_p(\alpha)$ ,  $C_p(\alpha)$  – функции, аппроксимирующие значения параметров  $A_p$ ,  $B_p$ ,  $C_p$  при различных значениях  $\alpha$ .

Ввиду сложности подбора аппроксимации для функции  $A_p(\alpha)$  было принято решение об ее аппроксимации кусочно-непрерывной логистической функцией вида:

$$\begin{cases} A_{p,1}(\alpha) = \frac{D_{\alpha,1}}{1 + E_{\alpha,1} e^{-\alpha(F_{\alpha,1})}}, \text{ при } 1,668 < \alpha \leq 2. \\ A_{p,2}(\alpha) = \frac{D_{\alpha,2}}{1 + E_{\alpha,2} e^{-\alpha(F_{\alpha,2})}}, \text{ при } 1,3 \leq \alpha \leq 1,668. \end{cases} \quad (9)$$

Выбор значения  $\alpha=1,668$  в качестве точки смены функциональной зависимости функции в выражении (9) обусловлен тем, что именно при этом значении параметра  $\alpha$  значения функций  $A_{p,1}(\alpha)$  и  $A_{p,2}(\alpha)$  равны и их графики пересекаются (см. рис. 6).

Вычисление параметров аппроксимации  $D_{\alpha,1}$ ,  $E_{\alpha,1}$ ,  $F_{\alpha,1}$ ,  $D_{\alpha,2}$ ,  $E_{\alpha,2}$ ,  $F_{\alpha,2}$  для функций  $A_{p,1}(\alpha)$  и  $A_{p,2}(\alpha)$  производилось в программной среде MathCAD с использованием функции `lgsfit` при начальных параметрах:  $D_{\alpha,1}=D_{\alpha,2}=1$ ,  $E_{\alpha,1}=E_{\alpha,2}=1$ ,  $F_{\alpha,1}=F_{\alpha,2}=1$ .

Для аппроксимации функций  $B_p(\alpha)$  и  $C_p(\alpha)$ , была использована экспоненциальная функция:

$$B_p(\alpha) = D_\alpha e^{E_\alpha \alpha} + F_\alpha,$$

$$C_p(\alpha) = D_\alpha e^{E_\alpha \alpha} + F_\alpha.$$

Вычисление параметров аппроксимации  $D_\alpha, E_\alpha, F_\alpha$  для функций  $B_p(\alpha)$  и  $C_p(\alpha)$  производилось в программной среде MathCAD с использованием функции `expfit`.

В результате проведенной аппроксимации были получены значения параметров  $D_\alpha, E_\alpha, F_\alpha$  аппроксимирующих функций для функций  $A_p(\alpha), B_p(\alpha), C_p(\alpha)$ . Эти значения, а также дополнительные параметры аппроксимации, сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Параметры  $D_\alpha, E_\alpha, F_\alpha$  аппроксимирующих функций для функций  $A_p(\alpha), B_p(\alpha), C_p(\alpha)$

Функция параметра в функции $T_{\text{зад пар}}(\alpha, \rho)$	Значения параметров $D_\alpha, E_\alpha, F_\alpha$ для функций $A_p(\alpha), B_p(\alpha), C_p(\alpha)$		
	$D_\alpha$	$E_\alpha$	$F_\alpha$
$A_{p,1}(\alpha)$	$4,435 \cdot 10^{-4}$	$2,225 \cdot 10^6$	6,889
$A_{p,2}(\alpha)$	$1,384 \cdot 10^{-4}$	$1,01 \cdot 10^{19}$	28,471
$B_p(\alpha)$	$5,52 \cdot 10^3$	-4,652	10,74
$C_p(\alpha)$	$3,451 \cdot 10^5$	-8,301	1,88

Значения функций  $A_p(\alpha), B_p(\alpha), C_p(\alpha)$ , а также абсолютные оценки погрешности аппроксимации представлены в графическом виде на рис. 6.

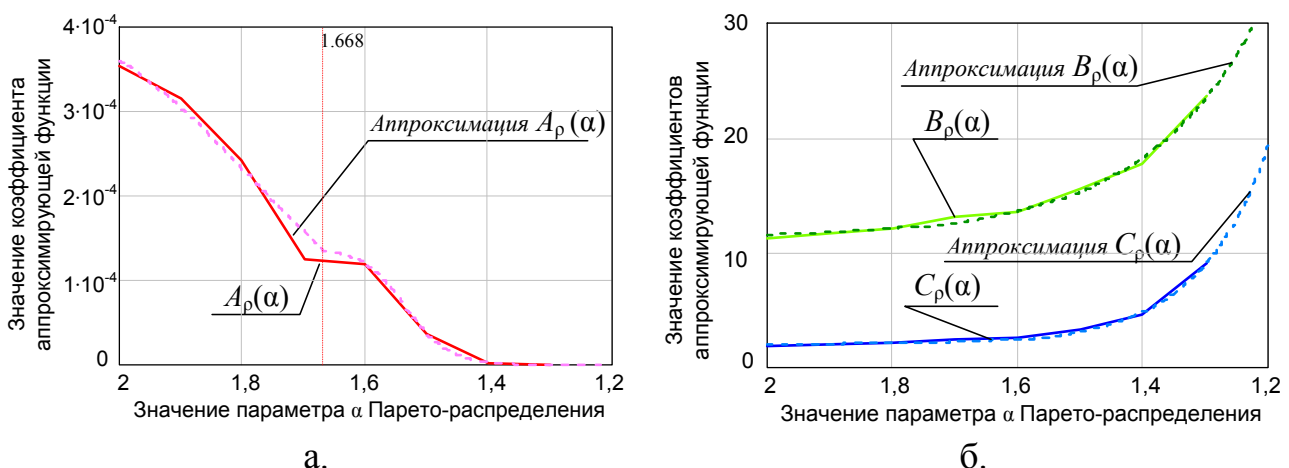


Рис. 6. Значения функций  $A_p(\alpha), B_p(\alpha), C_p(\alpha)$ , полученные на основе имитационного моделирования в модели СМО  $Pa/M/1$

Обобщая полученные результаты, можно сделать вывод, что проведенные в работе [21] исследования своевременности обслуживания сложного трафика, представленного потоком с Парето-распределением моментов поступления заявок, со значениями параметра  $1,3 \leq \alpha \leq 2$ , основанные на имитационной модели

$Pa/M/1$  в диапазоне загрузки СМО  $0,6 \leq \rho \leq 0,9$ , могут быть аппроксимированы следующей сложной функцией:

$$T_{\text{зад пар}}(\alpha, \rho) = A_p(\alpha) \left[ (5,52 \cdot 10^3 \exp(-4,652\alpha) + 10,74)\rho \right] + (3,451 \cdot 10^5 \exp(-8,301\alpha) + 1,88), \quad (10)$$

где

$$A_p(\alpha) = \begin{cases} \frac{4,435 \cdot 10^{-4}}{1 + 2,225 \cdot 10^6 e^{-6,889\alpha}}, & \text{при } 1,668 < \alpha \leq 2; \\ \frac{1,384 \cdot 10^{-4}}{1 + 1,01 \cdot 10^{19} e^{-28,471\alpha}}, & \text{при } 1,3 \leq \alpha \leq 1,668. \end{cases}$$

Графики, соответствующие исходным результатам имитационного моделирования (из таблицы 1) и аппроксимирующей их функции  $T_{\text{зад пар}}(\alpha, \rho)$ , а также относительной погрешности аппроксимации  $\delta$  – представлены на рис. 7.

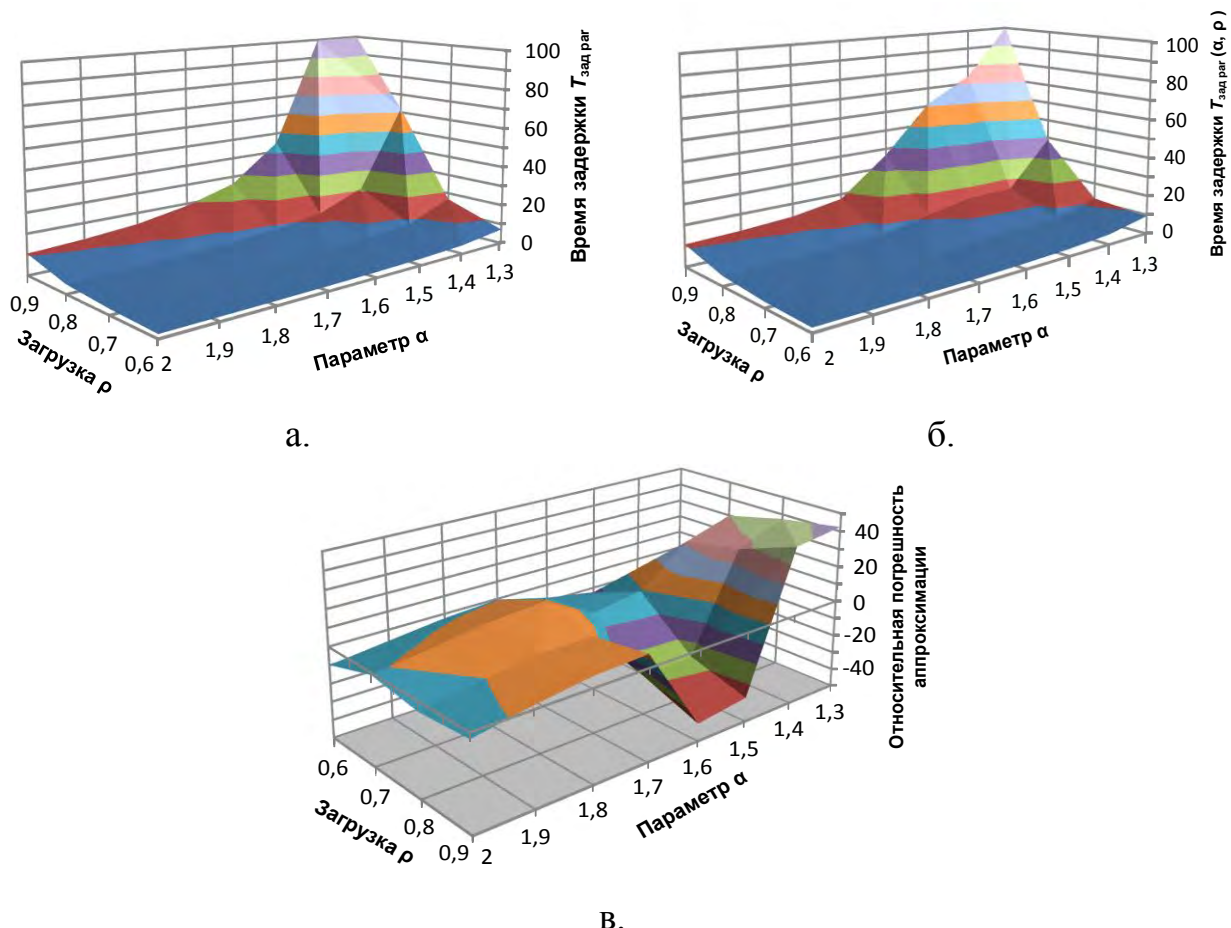


Рис. 7. Графические зависимости:

- а. – исходные результаты имитационного моделирования, в соответствии с данными из таблицы 1;
- б. – значение аппроксимирующей функции  $T_{\text{зад пар}}(\alpha, \rho)$  в соответствии с выражением (10);
- в. – относительная погрешность аппроксимации в соответствии с выражением (11).

При этом погрешность аппроксимации определялась по выражению:

$$\delta(\alpha, \rho) = \frac{T_{\text{зад пар}}(\alpha, \rho) - T_{\text{зад пар}}^*(\alpha, \rho)}{T_{\text{зад пар}}^*(\alpha, \rho)} \cdot 100\%, \quad (11)$$

где значение  $T_{\text{зад пар}}(\alpha, \rho)$  определяется по формуле (10), а значение  $T_{\text{зад пар}}^*(\alpha, \rho)$  определяется из таблицы 1 для одних и тех же значениях параметра  $\alpha$  и загрузки  $\rho$ .

### Вывод

Проведенные исследования показали, что мультимедийный трафик обладает свойством структурной сложности. Наличие этого свойства ведет к существенному снижению своевременности обслуживания трафика в узлах сети. Оценка снижения своевременности обслуживания сложного трафика в узлах сети была проведена на основе имитационного моделирования. Для моделирования обслуживания трафика в узле использовались модели систем массового обслуживания  $M/M/1$  (для простого трафика) и  $Pa/M/1$  (для трафика со сложной структурой, которая задавалась параметром  $\alpha$  Парето-распределения). В работе проведена двухуровневая аппроксимация результатов имитационного моделирования, которая позволила получить аналитическое выражение (10) для зависимости своевременности обслуживания трафика от уровня загрузки узла и уровня сложности трафика.

Полученное аналитическое выражение (10) для оценки своевременности обслуживания сложного трафика может быть использовано при решении прикладных задач проектирования и анализа сетей связи при передаче мультимедийного трафика в условиях высокой загрузки сети. Кроме того, данное выражение может быть использовано для проверки достоверности результатов ранее проведенных исследований, основанных на аналитических методах оценки качества обработки заявок в системах массового обслуживания.

Исследования своевременности обслуживания сложного трафика в узлах сети выполнены при государственной поддержке РФФИ инициативного научного проекта № 13-07-97518 и поддержке Департамента приоритетных направлений науки и технологий Минобрнауки РФ – грантом Президента РФ № МК-755.2012.10.

### Приложение 1.

#### Листинг программы имитационной модели $M/M/1$ в среде GPSS World

; Блок описания используемых переменных

```
VrDelta TABLE X$Delta,0,1,60 ; Гистограмма распределения значений интервалов
; времени между пакетами трафика
; с экспоненциальным распределением
INITIAL X$Time,0 ; Установить начальное значение "Time",
; равным нулю
VrObs1 TABLE MP2,0,1,60 ; Гистограмма времени обслуживания пакетов
Moj EQU 4.33 ; МОЖ значения интервала времени между
; очередными пакетами трафика
```

```
T_obs1 EQU 1 ; Среднее время обслуживания пакета
Fun VARIABLE (AC1-X$Time) ; Функция вычисления значений интервалов
; времени "Delta" между очередными пакетами
; (разность абсолютного модельного времени
; и сохраненного значения ячейки "Time")
; Блок генерации и обслуживания экспоненциального трафика
GENERATE (Exponential(17,0,MoJ)); Генератор пакетов трафика
; с экспоненциальным распределением
SAVEVALUE Delta,V$Fun ; Сохранить в ячейку "Delta" значение,
; вычисленное по формуле "Fun"
SAVEVALUE Time,AC1 ; Сохранить в ячейку "Time" значение, равное
; абсолютному модельному времени
TABULATE VrDelta ; Сохранить вычисленное значение переменной
; "Delta" в таблицу "VrDelta" для построения
; гистограммы распределения
MARK 2 ; Сохранить в ячейку "2" значение абсолютного
; модельного времени
QUEUE Ocher ; Занять одно место в буфере "Ocher"
SEIZE OKU ; Занять устройство "OKU"
DEPART Ocher ; Освободить одно место в буфере "Ocher"
ADVANCE (Exponential(45,0,T_obs1)) ; Среднее время обслуживания пакета
; в устройстве "OKU", равное T_obs1
RELEASE OKU ; Освободить устройство "OKU"
SAVEVALUE 1,MP2 ; Сохранить в ячейку "1" значение разности
; между абсолютным модельным временем
; и значением, сохраненным в ячейке "2"
TABULATE VrObs1 ; Сохранить в таблицу "VrObs1" значение
; полученной разности
TERMINATE 1 ; Вывести из системы обслуженный пакет
START 1000000 ; Обслужить 1 млн. пакетов
```

## Приложение 2.

### Листинг программы имитационной модели Pa/M/1 в среде GPSS World

```
; Блок описания используемых переменных
VrDelta TABLE X$Delta,0,1,60 ; Гистограмма распределения значений интервалов
; времени между пакетами Парето-трафика
INITIAL X$Time,0 ; Установить начальное значение "Time",
; равным нулю
VrObs1 TABLE MP2,0,1,60 ; Гистограмма времени обслуживания пакетов
VrOcher QTABLE Ocher,0,1,70 ; Гистограмма времени нахождения пакетов
; в очереди к обслуживанию
Alpha EQU 1.0001 ; Параметр формы распределения Парето
k EQU 1 ; Коэффициент масштаба распределения Парето
T_obs1 EQU 1 ; Среднее время обслуживания пакета
Fun VARIABLE (AC1-X$Time) ; Функция вычисления значений интервалов
; времени "Delta" между очередными пакетами
; (разность абсолютного модельного времени
; и сохраненного значения ячейки "Time")
; Блок генерации и обслуживания трафика Парето
GENERATE (k#(Uniform(1,0,1)+1E-6#Uniform(1,0,1)) ^ (-1/Alpha))
; Трафик с Парето распределением
; интервалов времени между пакетами с шагом
; дискретизации  $\epsilon=10^{-12}$ 
SAVEVALUE Delta,V$Fun ; Сохранить в ячейку "Delta"
; значение, вычисленное по формуле "Fun"
SAVEVALUE Time,AC1 ; Сохранить в ячейку "Time" значение, равное
; абсолютному модельному времени
TABULATE VrDelta ; Сохранить вычисленное значение переменной
; "Delta" в таблицу "VrDelta" для построения
; гистограммы распределения
MARK 2 ; Сохранить в ячейку "2" значение абсолютного
```

```
                                ; модельного времени
QUEUE   Ocher                    ; Занять одно место в буфере "Ocher"
SEIZE   OKU                       ; Занять устройство "OKU"
DEPART  Ocher                    ; Освободить одно место в буфере "Ocher"
ADVANCE (Exponential(45,0,T_obs1)) ; МОЖ времени обслуживания пакета
                                ; в устройстве "OKU", равное T_obs1
RELEASE OKU                       ; Освободить устройство "OKU"
SAVEVALUE 1,MP2                  ; Сохранить в ячейку "1" значение разности
                                ; между абсолютным модельным временем
                                ; и значением, сохраненным в ячейке "2"
TABULATE VrObs1                 ; Сохранить в таблицу "VrObs1" значение
                                ; полученной разности
TERMINATE 1                      ; Вывести из системы обслуженный пакет
START 1000000                    ; Обслужить 1 млн. пакетов
```

## Литература

1. Платов В. В., Петров В. В. Исследование самоподобной структуры телетрафика беспроводной сети // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2004. № 3. С. 38-49.
2. Скуратов А. К. Статистический мониторинг и анализ телекоммуникационных сетей: Автореферат дис. ... д-ра техн. наук. – М.: Государственный научно-исследовательский институт информационных технологий и телекоммуникаций «Информика», 2007. – 36 с.
3. Иванов И. П. Математические модели, методы анализа и управления в корпоративных сетях: Автореферат дис. ... д-ра тех. наук. – М.: Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 2010. – 34 с.
4. Алиев Т. И. Основы моделирования дискретных систем. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 363 с.
5. Буров А. А. Исследование влияния методов маршрутизации на качество обслуживания в мультисервисных сетях связи, функционирующих в экстремальных условиях: Автореферат дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2009. – 23 с.
6. Назаров А. Н., Сычев К. И. Модели и методы расчета показателей качества функционирования узлового оборудования и структурно-сетевых параметров сетей связи следующего поколения. – Красноярск: Изд-во ООО «Поликом», 2010. – 389 с.
7. Кучерявый Е. А. Управление трафиком и качество обслуживания в сети Интернет. – СПб.: Наука и техника, 2004. – 336 с.
8. Головкин Н. И. Исследование моделей систем массового обслуживания в информационных сетях: Автореферат дис. ... д-ра техн. наук. – Владивосток: Тихоокеанский государственный экономический университет, 2007. – 39 с.
9. Ложковский А. Г. Анализ и синтез систем распределения информации в условиях мультисервисного трафика: дис. ... д-ра техн. наук. – Одесса: Одесская национальная академия связи им. А. С. Попова, 2010. – 267 с.
10. Бахарева Н. Ф., Карташевский И. В., Тарасов В. Н. Анализ и расчет непуассоновских моделей трафика в сетях ЭВМ // Инфокоммуникационные технологии. 2009. Т. 7. № 4. С. 61-66.



11. Бахарева Н. Ф., Тарасов В. Н., Ушаков Ю. А. Обобщенная двумерная диффузионная модель массового обслуживания типа  $GI/G/1$  // Телекоммуникации. 2009. № 7. С. 2-8.
12. Бахарева Н. Ф. Аппроксимативные методы и модели массового обслуживания для исследования компьютерных сетей: Автореферат дис. ... д-ра техн. наук. – Пенза: Пензенский государственный университет, 2011. – 36 с.
13. Тарасов В. Н., Бахарева Н. Ф., Горелов Г. А. Математическая модель трафика с тяжелохвостным распределением на основе системы массового обслуживания  $H_2/M/1$  // Инфокоммуникационные технологии. 2014. Т. 12. № 3. С. 36-41.
14. Карташевский И. В., Буранова М. А. Влияние механизмов управления QoS на показатели качества обслуживания мультимедийного трафика сети Internet // T-comm – Телекоммуникации и Транспорт. 2013. № 8. С. 54-60.
15. Агеев Д. В., Игнатенко А. А., Копылев А. Н. Методика определения параметров потоков на разных участках мультисервисной телекоммуникационной сети с учетом эффекта самоподобия // Проблемы телекоммуникаций. 2011. № 3 (5). С. 18-37.
16. Шувалов В. П., Мирзакулова Ш. А. Моделирование процесса обслуживания самоподобного трафика коммутатором второго уровня // T-comm – Телекоммуникации и Транспорт. 2014. № 8. С. 102-105.
17. Линец Г. И. Методы структурно-параметрического синтеза, идентификации и управления транспортными телекоммуникационными сетями для достижения максимальной производительности: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2013. – 34 с.
18. Пастухов А. С., Иванов Ю. А. Оценка взаимного влияния самоподобных Internet и видеотрафика при передаче в стандарте DVB/IP/MPEG-4 по гибридным сетям спутниковой связи // Вестник Чувашского университета. 2008. № 2. С. 160-169.
19. Алиев Р. Т., Король В. В. Анализ характеристик мультимедийного трафика в локальных вычислительных сетях // Имитационное моделирование. Теория и практика. 2003. Т. 1. С. 45-49.
20. Маколкина М. А. Разработка и исследование моделей оценки качества передачи видео в IP-сетях: дис. ... канд. техн. наук. – СПб., Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2014. – 187 с.
21. Ушанев К. В. Имитационные модели системы массового обслуживания типа  $Pa/M/1$ ,  $H_2/M/1$  и исследование на их основе качества обслуживания трафика со сложной структурой // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 4. С. 217-251.
22. Задорожный В. Н., Долгушин Д. Ю., Юдин Е. Б. Аналитико-имитационные методы решения актуальных задач системного анализа больших сетей / Под ред. В. Н. Задорожного – Омск: Издательство ОмГТУ, 2013. – 324 с.
23. Будко П. А., Рисман О. В. Многоуровневый синтез информационно-телекоммуникационных систем. Математические модели и методы оптимизации: Монография. – СПб.: ВАС, 2011. - 476 с.

24. Петров В. В. Структура телетрафика и алгоритм обеспечения качества обслуживания при влиянии эффекта самоподобия: дис. ... канд. техн. наук. – М.: Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», 2004. — 199 с.

25. Осин А. В. Влияние самоподобности речевого трафика на качество обслуживания в телекоммуникационных сетях: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.13. – М.: Московский государственный университет сервиса, 2005. – 164 с.

26. Соколов Н. А. Задачи перехода к сети связи следующего поколения: Автореферат дис. ... д-ра техн. наук. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2006. – 36 с.

27. Шелухин О. И., Осин А. В. Влияние самоподобности трафика на оптимизацию параметров телекоммуникационных сетей // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2007. Т. 3. № 1. С. 55-59.

28. Бахарева Н. Ф., Ушаков Ю. А. Управление нагрузкой на сети ЭВМ распознаванием и моделированием трафика // Инфокоммуникационные технологии. 2008. Т. 6. № 3. С. 56-62.

29. Малофей О. П., Фомин Л. А., Родионов В. В., Ряднов Д. С. Моделирование самоподобного трафика при построении сетей NGN // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2009. № 11. С. 176-186.

30. Сычев К. И., Умнов А. Е. Способ обеспечения качества обслуживания разнородного трафика в узлах коммутации мультисервисных сетей связи на основе динамических приоритетов // Т-comm – Телекоммуникации и Транспорт. 2012. № 7. С. 206-210.

31. Макаренко С. И. Анализ математических моделей информационных потоков общего вида и степени их соответствия трафику сетей интегрального обслуживания // Вестник Воронежского государственного университета. 2012. Т. 8. № 8. С. 28-35.

32. Кучук Г. А. Учет фрактальных свойств пульсирующего трафика // Материалы I Международной научно-технической конференции «Инфотелекоммуникационные технологии в науке, производстве и образовании». URL: <http://www.selfsimilar.narod.ru/kuchuk1.pdf> (дата обращения: 30.11.2015).

33. Федорова М. Л., Леденева Т. М. Об исследовании свойства самоподобия трафика мультисервисной сети // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2010. № 1. С. 46-54.

34. Новиков Е. А., Павлов А. Р., Зиннуров С. Х. Метод оперативного планирования частотно-временного ресурса спутника-ретранслятора при нестационарном входном потоке сообщений // Авиакосмическое приборостроение. 2014. № 5. С. 14-23.

35. Новиков Е. А. Оперативное распределение радиоресурса спутника-ретранслятора при нестационарном входном потоке сообщений с учетом

запаздывания в управлении // Информационно-управляющие системы. 2014. № 2 (69). С. 79-86.

36. Новиков Е. А., Косяков Е. Н., Павлов А. Р. Динамическое резервирование радиоресурса в сетях спутниковой связи при передаче самоподобного трафика // Труды Научно-исследовательского института радио. 2014. № 2. С. 49-60.

37. Жуков С. Е., Новиков Е. А., Павлов А. Р. Метод динамического распределения радиоресурса ретранслятора в сетях спутниковой связи с учетом неоднородности трафика и запаздывания при управлении // Труды Научно-исследовательского института радио. 2014. № 1. С. 74-80.

38. Новиков Е. А. Оценка пропускной способности спутника-ретранслятора при резервировании радиоресурса с упреждением // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2014. № 3 (15). С. 62-69.

39. Новиков Е. А. Применение моделей структурной динамики при решении задачи распределения частотно-временного ресурса сети спутниковой связи на основе стандарта DVB-RCS // Информационно-управляющие системы. 2013. № 3 (64). С. 78-83.

### References

1. Platov V. V., Petrov V. V. Issledovanie samopodobnoj strukturi teletrafika besprovodnoj seti [Self-Similar Structure Research of the Wireless Network teletraffic]. *Electrical and data processing facilities and systems*, 2004, no 3. pp. 38-49 (In Russian).

2. Skuratov A. K. *Statisticheskii monitoring i analiz telekommunikacionnykh setei*. Diss. doct. tehn. nauk [Statistical Monitoring and the Analysis of Telecommunication Networks. Extended Abstract of Dr. habil. Thesis]. Moscow, State Research Institute of Information Technologies and Telecommunications «Informika», 2007. – 36 с (In Russian).

3. Ivanov I. P. *Matematicheskie modeli, metody analiza i upravleniia v korporativnykh setiakh*. Diss. doct. tehn. nauk [Mathematical Models, Methods of the Analysis and Management in Corporate Networks. Extended Abstract of Dr. habil. Thesis]. Moscow, Moscow State Technical University named after N. E. Bauman, 2010. 34 p. (In Russian).

4. Aliev T. I. *Osnovy modelirovaniia diskretnykh system* [Bases of Modeling of Discrete Systems]. Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics Publ., 2009. 363 p. (In Russian).

5. Burov A. A. *Issledovanie vliianiia metodov marshrutizatsii na kachestvo obslujivaniia v multiservisnykh seiakh sviazi, funkcioniruyuschikh v ekstremalnykh usloviiah*. Diss. kand. tehn. nauk [Research of Routing Methods Influence on a Quality of Service at the Multiservice Communication Networks Functioning on Extreme Conditions. Extended Abstract Ph. D. Thesis]. Novosibirsk, Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences, 2009. 23 p. (In Russian).

6. Nazarov A. N., Sychev K. I. *Modeli i metody rascheta pokazatelej kachestva funkcionirovaniia uzlovogo oborudovaniia i strukturno-setevykh parametrov setej*

*svjazi sledujushhego pokolenija* [The Models and the Methods of Measuring of Quality Indicators of Nodal Equipment Functioning and Network Structural Parameters of Next Generation Networks]. Krosnoyarsk, Polykom Publ., 2010. 389 p. (In Russian).

7. Kucheryavii E. A. *Upravlenie trafikom i kachestvo obsluzhivaniya v seti Internet* [Traffic Management and the Quality of Service on the Internet]. Saint-Petersburg, Science and Technology Publ., 2004. 336 p. (In Russian).

8. Golovko N. I. *Issledovanie modelej system massovogo obslujivaniia v informacionnykh setiakh*. Diss. doct. tehn. nauk [Models Research of Queue Systems at Information Networks. Extended Abstract of Dr. habil. Thesis]. Vladivostok, The Pacific State Economic University, 2007. 39 p. (In Russian).

9. Lojkovskij A. G. *Analiz i sintez system raspredeleniia informacii v usloviiah multiservisnogo trafika*. Diss. doct. tehn. nauk [The Analysis and Synthesis of Information Distribution Systems in the Conditions of Multiservice Traffic. Dr. habil. Thesis]. Odessa, Odessa National Academy of Telecommunications named after A. S. Popov, 2010. 267 p. (In Russian).

10. Bakhareva N. F., Kartashevskii I. V., Tarasov V. N. The Analysis and Calculation of Not-Poisson Models of the Traffic in Computer Networks. *Infokommunikacionnye Tehnologii*, 2009, vol. 7, no. 4, pp. 61-66 (In Russian).

11. Bakhareva N. F., Tarasov V. N., Ushakov U. A. Obobshhennaja dvumernaja diffuzionnaja model' massovogo obsluzhivaniya tipa [The Generalized Two-Dimensional Diffusion Waiting Line Model of Type  $GI/G/1$ ]. *Telecommunications*, 2009, no. 7, pp. 2-8 (In Russian).

12. Bakhareva N. F. *Approksimativnie metody I modeli massovogo obslujivaniia dlia issledovaniia kompyuternykh setei*. Diss. doct. tehn. nauk [Approximation Methods and Queue Models for Research of Computer Networks. Extended Abstract of Dr. habil. Thesis]. Penza, Penza State University, 2011. 36 p. (In Russian).

13. Tarasov V. N., Bakhareva N. F., Gorelov G. A. Mathematical Model of Traffic with Heavy-Tailed Distributions based Queueing  $H_2/M/1$ . *Infokommunikacionnye Tehnologii*, 2014, vol. 12, no. 3, pp. 36-41 (In Russian).

14. Kartashevskii I. V., Buranova M. A. Vliianie mekhanizmov upravleniia QoS na pokazateli kachestva obsluzhivaniia mul'timediinogo trafika seti Internet [Influence of Mechanisms of Management QoS on Indicators of Quality of Service of the Multimedia Traffic of Network Internet]. *T-comm – Telecommunications and Transport*, 2013, no. 8, pp. 54-60 (in Russian).

15. Ageev D. V., Ignatenko A. A., Kopylev A. V. Metodika opredelenija parametrov potokov na raznyh uchastkah mul'tiservisnoj telekommunikacionnoj seti s uchetom jeffekta samopodobija [Technique of Determination of Parameters of Streams on Different Sites of a Multiservice Telecommunication Network taking into Account Effect of Self-Similarity]. *Problemy telekomunikatsiy*, 2011, vol. 5, no. 3, pp. 18-37 (In Russian).

16. Shuvalov V. P., Mirzakulova S. A. Modeling of Self-Similar Traffic Processing by L2 Switch. *T-comm – Telecommunications and Transport*, 2014, no. 8, pp. 102-105 (In Russian).

17. Linec G. I. *Metody strukturno-parametricheskogo sinteza, identifikacii i upravlenija transportnymi telekommunikacionnymi setjain dlja dostizhenija maksimal'noj proizvoditel'nosti*. Diss. dokt. tehn. nauk [The Methods of Structural Parametric Synthesis, Identification and Control of Transport Telecommunication Networks for Achievement of the Maximum Productivity. Extended Abstract of Dr. habil. Thesis]. Stavropol, Northern-Caucasus State University, 2013. 34 p. (In Russian).

18. Pastukhov A. S., Ivanov Yu. A. Ocenka vzaimnogo vliianiia samopodobnykh Internet i videotrafika pri peredache v standarte DVB/IP/MPEG-4 po gibridnim setiam sputnikovoi svyazi [Interference estimation of self-similar internet and video traffics on transmission throw hybrid satellite networks by DVB/IP/MPEG-4 standard]. *Proceedings of Chuvash State University*, 2008, no. 2, pp. 160-169 (In Russian).

19. Aliev R. T., Korol V. V. Analiz kharakteristik mul'timediinogo trafika v lokal'nykh vychislitel'nykh setiakh [The Analysis of Traffic Characteristics of Local Area Networks]. *Imitating Simulation. Theory and Practice*, 2003, vol. 1, pp. 45-49 (in Russian).

20. Makolkina M. A. *Razrabotka i issledovanie modelei otsenki kachestva peredachi video v IP-setiakh*. Diss. kand. tehn. nauk [Working Out and Research of Models of an Estimation of Quality of Transfer of Video in IP-Networks. Ph. D. Thesis]. Saint-Petersburg, Saint-Petersburg State University of Telecommunications by Professor M.A. Bonch-Bruevich, 2014. 187 p. (in Russian).

21. Ushanev K. V. Simulation Models of Queuing Systems of Type  $Pa/M/1$ ,  $H_2/M/1$  and Research on the Basis of their Quality of Service Traffic with a Complicated Structure. *Systems of Control, Communication and Security*, 2015, no. 4, pp. 217-251 (in Russian).

22. Zadorozhnii V. N., Dolgushin D. U., Udin E. B. *Analitiko-imitatsionnye metody resheniia aktual'nykh zadach sistemnogo analiza bol'shikh setei* [Analytical-Imitating Methods of the Decision of Actual Problems of the System Analysis of the Big Networks]. Omsk, Omsk State Technical University Publ., 2013. 324 p. (in Russian).

23. Budko P. A., Risman O. V. *Mnogourovnevij sintez informacionno-telekommunikacionnykh sistem. Matematicheskie modeli i metody optimizacii* [Multi-Level Synthesis of Information Telecommunication Systems. Mathematical Models and Methods of Optimization. Treatise]. Saint-Petersburg, Military Academy of the Signal Corps Publ., 2011. 476 p. (in Russian).

24. Petrov V. V. *Struktura teletrafika i algoritm obespecheniia kachestva obsluzhivaniia pri vliianii efekta samopodobiia*. Diss. kand. tehn. nauk [Structure of the Teletraffic and Algorithm of Maintenance of Quality of Service at Influence of Effect of Self-Similarity. Ph. D. Thesis]. Moscow, National Research University "Moscow Power Engineering Institute", 2004. 199 p. (in Russian).

25. Osin A. V. *Vliianie samopodobnosti rechevogo trafika na kachestvo obsluzhivaniia v telekommunikatsionnykh setiakh*. Diss. kand. tehn. nauk [Influence of Self-Similitude of the Speech Traffic on Quality of Service in Telecommunication

Networks. Ph. D. Thesis]. Moscow, Moscow State Academy of Consumer Services, 2005. 164 p. (in Russian).

26. Sokolov N. A. *Zadachi perekhoda k seti svyazi sleduyushchego pokoleniia*. Diss. doct. tehn. nauk [Transition Problems to a Next Generation Network. Extended Abstract of Dr. habil. Thesis]. Saint-Petersburg, The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications, 2006. 26 p. (In Russian).

27. Shelukhin O. I., Osin A. V. Vliianie samopodobnosti trafika na optimizaciyu parametrov telekommunikacionnykh setei [Self-Similitude Influence to the Traffic Optimization Parameters of Telecommunication Networks]. *Electrical and data processing facilities and systems*, 2007, vol. 3 no 1. pp. 55-59 (In Russian).

28. Bakhareva N. F., Ushakov U. A. Traffic Recognition and Simulation for the Purpose of Network Utilization Management. *Infokommunikacionnye Tehnologii*, 2008, vol. 6, no. 3, pp. 56-62 (In Russian).

29. Malofej O. P., Fomin L. A., Rodionov V. V., Rjadnov D. S. Self-Similar Traffic Model Analysis in NGN Nets Formation. *Izvestiya Southern Federal University. Engineering Sciences*, 2009, no. 11, pp. 176-186 (In Russian).

30. Sychev K. I., Umnov A. E. Method of Quality Assurance of Service of the Heterogeneous Traffic in Switching Nodes of Next Generation Networks on the Basis of Dynamic Priorities. *T-comm – Telecommunications and Transport*, 2012, no. 7, pp. 206-210 (In Russian).

31. Makarenko S. I. Analyzing of Mathematical Models of General type Data Streams and Degree of their Conformity to Integral Service Net Traffic. *Proceedings of Voronezh State University*, 2012, vol. 8, no. 8, pp. 28-35.

32. Kuchuk G. A. Uchet fraktal'nykh svoystv pul'siruiushchego trafika [The Account of Fractal Properties of the Pulsing Traffic]. *Materiali I Mezhdunarodnoi nauchno-technicheskoi konferencii "Infotelekomunikacionnie tehnologii v nauke, proizvodstve i obrazovanii"* [The Materials of the 1<sup>st</sup> International Scientific and Technical Conference "Infotelecommunication Technologies in a Science, Manufacture and Formation"]. Available at: <http://www.selfsimilar.narod.ru/kuchuk1.pdf> (accessed 30 November 2015) (in Russian).

33. Fedorova M. L., Ledeneva T. M. About Research of Property of Self-Similarity of the Traffic of a Multiservice Network. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems analysis and information technologies*, 2010, no. 1, pp. 46-54 (in Russian).

34. Novikov E. A., Pavlov A. R., Zinnurov S. H. Method of operative planning of the satellite repeater's time-and-frequency resource under non stationary ingress flow. *Aerospace Instrument Making*, 2014, no. 5, pp. 14-23 (in Russian).

35. Novikov E. A. Operative distribution of satellite repeater radio resource in terms of non-stationary ingress flow with account of time lagged control. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2014, vol. 69, no 2, pp. 79-86 (in Russian).

36. Novikov E. A., Kosyakov E. N., Pavlov A. R. Dynamic reservation of a radio resource in satellite communication networks by transfer of the self-similar traffic. *Trudi NIIR*, 2014, no. 2, pp. 49-60 (in Russian).

37. Zhukov S. E., Novikov E. A., Pavlov A. R. Method of radio resource dynamic distribution in networks of satellite communication taking into account heterogeneity of a traffic and delay at management. *Trudi NIIR*, 2014, no. 1, pp. 74-80 (in Russian).

38. Novikov E. A. Estimate of the satellite repeater's capacity under radio resource's redundancy with feed-forward. *Radio and telecommunication systems*, 2014, vol. 15, no. 3, pp. 62-69 (in Russian).

39. Novikov E. A. Using of structural dynamics models in tasks of time-frequency source distribution in satellite communication system based on DVB-RCS standard. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2013, vol. 64, no 3, pp. 78-83 (in Russian).

Статья поступила 15 декабря 2015 г.

### Информация об авторах

*Ушанев Константин Владимирович* – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Адъюнкт кафедры сетей и систем связи космических комплексов. Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: передача и обработка трафика со сложной и самоподобной структурой. E - mail: stan\_007@mail.ru

*Макаренко Сергей Иванович* – кандидат технических наук, доцент. Доцент кафедры сетей и систем связи космических комплексов. Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: устойчивость сетей и систем связи к преднамеренным деструктивным воздействиям; радиоэлектронная борьба; информационное противоборство. E - mail: mak-serg@yandex.ru

Адрес: Россия, 197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская д. 13.

---

## The Timeliness Indicators of Traffic Service in Queue Systems $Pa/M/1$ Based on Approximation of Imitating Modeling Results

K. V. Ushanev, S. I. Makarenko

**Problem statement:** the volume of the multimedia traffic which is pitched through telecommunication networks is grows. Thus the multimedia traffic possesses property of the difficult structural. This property reduces timeliness of service of the traffic in network knots. These facts do actual research of timeliness of service of the traffic in network nodes. **The article purpose.** The analysis of timeliness for service of difficult traffic in network nodes on basis simulation modeling and approximation of the received results is the purpose of this article. **Used methods.** Models of queue systems  $M/M/1$  (for the simple traffic) and  $Pa/M/1$  (for traffic with difficult structure) have been used for modeling of service of traffic in network node. Packet delay time in node model has been used as meaning of timeliness of traffic service. Simulation modeling has been selected as a research method. The environment imitative modeling GPSS World has been selected as research toolkit. Two-level approximation for results of simulation modeling has been used for make analytical expressions for the analysis of dependence of timeliness of traffic service from level of node loading and difficult traffic level. **Novelty.** Analytical expression for meaning of timeliness of service of difficult traffic simultaneously considering both loading level of node, and complexity traffic level are novelty of paper. **Results and practical relevance.** Analytical expression for

*estimation of timeliness of difficult traffic service which was received in this article. That expression can be used at the decision of applied tasks of designing and analysis of a communication network. Especially for a communication network with transmission of the multimedia traffic and there are conditions of high loading is conducted. Besides, this expression can be used for check reliability of results before led researches based on analytical valuation methods of quality of service in queue systems.*

**Key words:** *the traffic, Pareto distribution, traffic processing, package switching.*

### **Information about Authors**

*Konstantin Vladimirovich Ushanev* – Doctoral Candidate. The Postgraduate Student of the Department of Networks and Communication Systems of Space Systems. A. F. Mozhaisky Military Space Academy. Field of research: the transmission and servicing of the complicated structure traffic and self-similar structure traffic. E-mail: stan\_007@mail.ru

*Sergey Ivanovich Makarenko* – Ph.D. of Engineering Sciences, Docent. Associate Professor at the Department of Networks and Communication Systems of Space Systems. A. F. Mozhaisky Military Space Academy. Field of research: stability of network against the purposeful destabilizing factors; electronic warfare; information struggle. E-mail: mak-serg@yandex.ru

Address: Russia, 197198, Saint-Petersburg, Zhdanovskaya str., 13.