

УДК 004.724.4

Имитационные модели системы массового обслуживания типа $Ra/M/1$, $H_2/M/1$ и исследование на их основе качества обслуживания трафика со сложной структурой

Ушанев К. В.

Постановка задачи: в настоящее время рост доли мультисервисного трафика в сетях связи, а также необходимость обеспечения требований потребителей услуг связи, делают актуальными вопросы обеспечения качества обслуживания трафика сложной структуры в узлах сетей связи. **Целью работы** является оценка времени задержки пакетов в узлах сети связи при обслуживании трафика сложной структуры на основе разработанной имитационной модели. В качестве критерия сложности структуры трафика используется коэффициент вариации интервала времени между очередными пакетами. В качестве модели трафика сложной структуры используются потоки, имеющие Парето- и гиперэкспоненциальное распределения в широком диапазоне изменения их входных параметров и уровня загрузки узлового оборудования сети связи. **Используемые методы:** модель узлового оборудования формализована на основе научно-методического аппарата теории массового обслуживания и реализована в программной среде имитационного моделирования GPSS World. **Новизной** данной работы являются количественные оценки качества обслуживания трафика сложной структуры по показателю времени задержки при обслуживании в узловом оборудовании сети связи, полученные в результате проведенного исследования разработанных имитационных моделей обслуживания трафика с Парето- и гиперэкспоненциальным распределениями в широком диапазоне изменения их входных параметров. **Результат:** на основе данных, полученных при исследовании имитационных моделей обслуживания трафика типа $Ra/M/1$, $H_2/M/1$, было определено, что своевременность обслуживания трафика со сложной структурой в узлах связи по показателю времени задержки существенно зависит от загрузки узлового оборудования. При исследовании имитационной модели обслуживания трафика с распределением Парето $Ra/M/1$ было выявлено, что значение коэффициента вариации интервала времени между очередными заявками такого трафика имеет экспоненциальную зависимость от значений параметра формы распределения Парето. Также при заданном диапазоне значений параметров потока с распределением Парето, определяющих загрузку устройства обслуживания (при фиксированном времени обслуживания), характерны три области, в которых время задержки заявок потока с распределением Парето имеет значения: больше, чем время задержки для потока с экспоненциальным распределением; меньше, чем время задержки для потока с экспоненциальным распределением; практически равные значениям времени задержки для потока с экспоненциальным распределением. Определены предельные значения коэффициента масштаба для потока с распределением Парето, которые приводят к перегрузке устройства обслуживания. При исследовании имитационной модели $H_2/M/1$ получена количественная оценка уровня снижения своевременности обслуживания потока с гиперэкспоненциальным распределением относительно потоков с распределением Парето и с экспоненциальным распределением. Получены оценки уровня снижения своевременности обслуживания по показателю времени задержки в зависимости от уровня загрузки устройства обслуживания и от значения коэффициента вариации. На основе полученных данных имитационного моделирования сделан вывод о том, что своевременность обслуживания в узлах сетей связи трафика сложной структуры с распределением Парето по показателю времени задержки снижается. При повышении загрузки узлового оборудования сети связи до 0,9 и росте значения коэффициента вариации интервала времени между пакетами до 23,6 своевременность обслуживания снижается до 539 раз по сравнению с обслуживанием экспоненциального трафика. Для гиперэкспоненциального распределения при тех же значениях загрузки сети связи и коэффициента вариации своевременность обслуживания снижается до 8000 раз по сравнению с обслуживанием экспоненциального трафика. **Практическая значимость:** разработанная имитационная модель и полученные при проведении моделирования результаты позволяют обосновать перспективные требования к быстродействию узлового оборудования сетей связи, которые в дальнейшем позволят обеспечить своевременность обслуживания трафика со сложной структурой.

Ключевые слова: сеть связи, имитационное моделирование, качество обслуживания, коэффициент Херста, коэффициент вариации, свойство самоподобия, свойство фрактальности.

Актуальность

В настоящее время в связи с развитием высокоскоростных сетей связи (СС) растет доля циркулирующего в них мультисервисного трафика (передача данных реального времени, речи, видео). За счет этого повышаются требования к пропускной способности СС и к качеству обслуживания QoS (Quality of service) мультисервисного трафика.

Анализ работ [1-6] показал, что одним из свойств мультисервисного трафика является его структурная сложность, оказывающая влияние на своевременность обслуживания трафика в узлах СС. Под трафиком со сложной структурой будем понимать трафик, у которого коэффициент вариации c_τ интервала времени между очередными пакетами имеет значения $c_\tau > 1$. Коэффициент вариации c_τ – дисперсионная характеристика трафика, определяющая его структурную сложность, и вычисляемая в соответствии с выражением [7]:

$$c_\tau = \sigma_\tau / m_\tau, \quad (1)$$

где τ – интервал времени между очередными пакетами трафика; m_τ – математическое ожидание (МОЖ) значений интервала времени между поступлением очередных пакетов трафика; σ_τ – среднее квадратическое отклонение (СКО) значений интервала времени между поступлением очередных пакетов трафика.

Мультисервисному трафику, циркулирующему в СС, присущи нестационарные свойства, которые моделируются стационарными потоками со сложной структурой, обладающими свойством самоподобия.

В работах [1, 8, 9] указывается, что свойство самоподобия оказывает влияние на своевременность обработки трафика, циркулирующего в реальных сетях связи. При этом показателем наличия данного свойства у трафика является коэффициент Херста H , принимающий значения в диапазоне $H \in (0,5; 1]$.

Широкое применение в качестве модели реального трафика для расчетов показателей качества его обслуживания получил поток с пуассоновским распределением, который не учитывает свойство самоподобия. Таким образом, для получения более точных оценок показателей качества обслуживания реального трафика, циркулирующего в реальных СС, необходима разработка адекватных моделей, которые бы учитывали свойство самоподобия.

Анализ работ [9-12, 16] показал, что в качестве модели реального трафика, позволяющей более адекватно описать свойство самоподобия, используется поток с Парето-распределением значения интервала времени между поступлением очередных заявок.

Анализ исследований [9-11] показал, что при использовании потока с распределением Парето в качестве модели трафика со сложной структурой ($c_\tau > 1$), наиболее актуален диапазон значений параметра формы

$\alpha \in (1; 2]$. Данные значения параметра α распределения Парето позволяют описать сложную структуру трафика за счет формирования больших значений СКО $\sigma_{\tau_{\text{par}}}$ интервала времени между моментами поступления очередных заявок потока.

Функция распределения Парето определяется выражением

$$F(\tau_{\text{par}}) = 1 - \left(\frac{k}{\tau_{\text{par}}} \right)^{\alpha}, k > 0, \alpha > 0, \tau_{\text{par}} > k, \quad (2)$$

где τ_{par} – интервал времени между поступлением очередных заявок потока с распределением Парето; k – коэффициент масштаба; α – параметр формы распределения Парето.

Значения статистических характеристик МОЖ $m_{\tau_{\text{par}}}^{\text{ан}}$ и СКО $\sigma_{\tau_{\text{par}}}^{\text{ан}}$ распределения Парето определяются выражениями

$$m_{\tau_{\text{par}}}^{\text{ан}} = \frac{\alpha \cdot k}{\alpha - 1}, \forall \alpha > 1; \quad (3)$$

$$\sigma_{\tau_{\text{par}}}^{\text{ан}} = \sqrt{D_{\tau_{\text{par}}}}; D_{\tau_{\text{par}}} = \left(\frac{k}{\alpha - 1} \right)^2 \cdot \frac{\alpha}{\alpha - 2}, \forall \alpha > 2. \quad (4)$$

Также в работах [10-14] указывается, что показателем наличия у трафика свойства самоподобия, которое, в том числе, указывает на наличие у трафика структурной сложности, является коэффициент Херста. Также в работах [10-14] указывается, что существует зависимость между коэффициентом Херста H , и параметром формы α распределения Парето:

$$\alpha = 3 - 2H. \quad (5)$$

В работах [2, 15] проводился анализ снижения качества обслуживания трафика со сложной структурой по показателю своевременности обработки такого трафика при различных значениях коэффициента вариации c_{τ} . Оценка снижения качества обслуживания при наличии у трафика свойств самоподобия для различных значений коэффициента Херста H проводилась в работах [2, 9, 16] с использованием аналитических и численных методов. При этом, в связи с однозначной зависимостью, определяемой выражением (5), можно сделать вывод о факте снижения показателей качества обслуживания при наличии у трафика структурной сложности, определяемой как коэффициентом вариации c_{τ} , так и коэффициентом Херста H . Вместе с тем, исследования по снижению качества обслуживания с использованием имитационного моделирования, проведенные в широком диапазоне изменений входных параметров трафика, отсутствуют. При этом выводы такого исследования позволили бы проверить и обосновать достоверность результатов ранее опубликованных работ [2, 9, 15, 16], а также установить границы применимости аналитических методов для расчета обслуживания такого трафика в узлах СС.

Таким образом, целью данной работы является проведение оценки уровня снижения своевременности обслуживания трафика со сложной структурой в узлах СС по показателю времени задержки $T_{\text{зад}}$ на основе имитационного моделирования. В качестве моделей трафика со сложной структурой ($c_{\tau} > 1$) при

проведении имитационного моделирования обслуживания такого трафика использовались потоки заявок с Парето- и гиперэкспоненциальным распределениями. Оценивание показателей качества обслуживания этих потоков проводилось путем нормировки их по отношению к показателям качества обслуживания потока с пуассоновским распределением. В качестве программного средства для проведения имитационного моделирования использовалась среда GPSS World (General Purpose Simulation System).

Постановка задачи

Для формализации задачи по оценке уровня снижения своевременности обслуживания трафика в узлах СС по показателю времени задержки $T_{\text{зад}}$ за счет разработки и исследования имитационных моделей трафика со сложной структурой в виде потоков с Парето- и гиперэкспоненциальным распределениями интервала времени между поступлением очередных заявок введем следующие обозначения:

τ_{par} – интервал времени между поступлением очередных заявок потока с распределением Парето;

α – параметр формы потока с распределением Парето;

k – коэффициент масштаба потока с распределением Парето;

ε – шаг дискретизации случайной величины τ_{par} при реализации распределения Парето в системе имитационного моделирования GPSS World;

m_{τ} – МОЖ значений интервала времени между поступлением очередных пакетов трафика;

$m_{\tau_{\text{par}}}^{\text{ан}}$ – МОЖ значений интервала времени между поступлением очередных заявок потока с распределением Парето, рассчитанное аналитически;

$m_{\tau_{\text{par}}}^{\text{им}}$ – МОЖ значений интервала времени между поступлением очередных заявок потока с распределением Парето, полученное на основе имитационного моделирования;

σ_{τ} – СКО значений интервала времени между поступлением очередных пакетов трафика;

$\sigma_{\tau_{\text{par}}}^{\text{ан}}$ – СКО значений интервала времени между поступлением очередных заявок потока с распределением Парето, рассчитанное аналитически;

$\sigma_{\tau_{\text{par}}}^{\text{им}}$ – СКО значений интервала времени τ_{par} между поступлением очередных заявок потока с распределением Парето, полученное на основе имитационного моделирования;

c_{τ} – коэффициент вариации интервала времени между поступлением очередных пакетов трафика;

$c_{\tau_{\text{par}}}$ – коэффициент вариации интервала времени между поступлением очередных заявок потока с распределением Парето;

$c_{\tau_{\text{анпр}}}(\alpha)$ – аппроксимация зависимости коэффициента вариации $c_{\tau_{\text{par}}}$ от параметра формы α распределения Парето;

$\delta_{\text{анпр}}$ – средняя ошибка аппроксимации;

H – коэффициент Херста;

Q – объем буфера, $Q=\infty$;

$T_{\text{зад}}$ – время задержки заявки в системе массового обслуживания, состоящее из времени ожидания заявкой своего обслуживания и времени ее обслуживания;

$T_{\text{зад пар}}$ – время задержки заявки в модели $Pa/M/1$;

$T_{\text{зад exp}}$ – время задержки заявки в модели $M/M/1$;

$T_{\text{зад H2}}$ – время задержки заявки в модели $H_2/M/1$;

$T_{\text{ож}}$ – время ожидания заявкой в буфере Q своего обслуживания;

μ – интенсивность обслуживания заявок в устройстве обслуживания;

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

$H_2(\lambda_1, \lambda_2, p_1, p_2)$ – гиперэкспоненциальное распределение потока 2-го порядка с интервалом времени τ_{H2} между поступлением очередных заявок;

λ_1 – интенсивность поступления заявок первой экспоненциальной фазы потока с гиперэкспоненциальным распределением;

λ_2 – интенсивность поступления заявок второй экспоненциальной фазы потока с гиперэкспоненциальным распределением;

p_1 – вероятность поступления заявок первой экспоненциальной фазы потока с гиперэкспоненциальным распределением;

p_2 – вероятность поступления заявок второй экспоненциальной фазы потока с гиперэкспоненциальным распределением;

τ_{H2} – интервал времени между поступлением очередных заявок потока с гиперэкспоненциальным распределением;

$m_{\tau_{H2}}^{\text{им}}$ – значение МОЖ интервала времени между поступлением очередных заявок потока с гиперэкспоненциальным распределением, полученное при проведении имитационного моделирования;

$m_{\tau_{H2}}^{\text{треб}}$ – требуемое значение МОЖ интервала времени между поступлением очередных заявок потока с гиперэкспоненциальным распределением, используемое для расчета входных параметров для модели гиперэкспоненциального трафика;

$\sigma_{\tau_{H2}}^{\text{им}}$ – значение СКО интервала времени между поступлением очередных заявок потока с гиперэкспоненциальным распределением, полученное при проведении имитационного моделирования;

$c_{\tau_{H2}}$ – коэффициент вариации интервала времени между поступлением очередных заявок потока с гиперэкспоненциальным распределением;

$c_{\tau_{H2}}^{\text{треб}}$ – требуемое значение коэффициента вариации интервала времени между поступлением очередных заявок потока с гиперэкспоненциальным распределением, используемое для расчета входных параметров модели гиперэкспоненциального трафика;

K – параметр, определяющий значения вероятностей поступления заявок как первой p_1 так и второй p_2 экспоненциальных фаз для модели гиперэкспоненциального трафика;

$T_{\text{ON-OFF } 1}$ – время, в течение которого ключ первой экспоненциальной фазы потока с гиперэкспоненциальным распределением находится в положение «ON» (включено);

$T_{\text{ON-OFF } 2}$ – время, в течение которого ключ второй экспоненциальной фазы потока с гиперэкспоненциальным распределением находится в положение «ON» (включено);

ρ – загрузка устройства обслуживания.

При проведении моделирования основным показателем структурной сложности потока выбран коэффициент вариации c_τ . За единицу модельного времени принят один такт обслуживания одной заявки исследуемого потока.

В качестве первой модели трафика со сложной структурой используется поток с Парето-распределением значений интервала времени между поступлением очередных заявок. Варьируемыми параметрами являются значения параметра формы α , коэффициента масштаба k распределения Парето, а также загрузка устройства обслуживания ρ . В качестве второй модели трафика со сложной структурой используется поток с гиперэкспоненциальным распределением значений интервала времени между поступлением очередных заявок. Варьируемыми параметрами являются значения интенсивностей поступления заявок первой λ_1 и второй λ_2 экспоненциальных фаз, вероятностей поступления заявок первой p_1 и второй p_2 экспоненциальных фаз, а также загрузка устройства обслуживания ρ , коэффициент вариации c_τ .

Целевая функция оценки качества обслуживания по показателю своевременности обслуживания трафика $T_{\text{зад}}$ будет иметь вид:

– для моделирования обслуживания трафика с распределением Парето

$$T_{\text{зад пар}} = \varphi_{\text{пар}}(\alpha, k, \rho, c_\tau);$$

– для моделирования обслуживания трафика с гиперэкспоненциальным распределением

$$T_{\text{зад exp}} = \varphi_{\text{н2}}(\lambda_1, \lambda_2, p_1, p_2, \rho, c_\tau).$$

На формальном уровне постановка задачи исследования имеет следующий вид.

$$F: \{\tau_{\text{вх}}\} \rightarrow \{T_{\text{зад}}\}.$$

Результаты, которые будут получены при проведении моделирования позволят обосновать перспективные требования к узловому оборудованию СС, что в дальнейшем позволит повысить своевременность обслуживания трафика со сложной структурой, циркулирующего в реальных СС.

Оценка адекватности использования потока с распределением Парето в качестве модели трафика со сложной структурой

В программной среде GPSS World при проведении имитационного моделирования трафика со сложной структурой вместо встроенного генератора заявок с Парето-распределением был использован генератор заявок, предложенный в работе [10], для получения более точных значений характеристик МОЖ $m_{\tau \text{ пар}}^{\text{им}}$ и СКО $\sigma_{\tau \text{ пар}}^{\text{им}}$ потока с распределением Парето, используемого в качестве модели (рис. 1, приложение 2). Генератор был

дополнен значением коэффициента масштаба k и позволил уменьшить шаг дискретизации ε генерируемой случайной величины τ_{par} со значения $\varepsilon=10^{-6}$ до значения $\varepsilon=10^{-12}$:

GENERATE ($k \# (\text{Uniform}(1, 0, 1) + 1\text{E}-6 \# \text{Uniform}(1, 0, 1))^{(-1/\text{Alpha})}$).

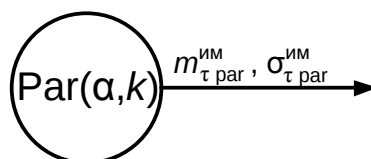


Рис. 1. Генератор трафика с распределением Парето

Значения статистических характеристик МОЖ $m_{\tau_{\text{par}}}^{\text{им}}$ и СКО $\sigma_{\tau_{\text{par}}}^{\text{им}}$ потока с распределением Парето, полученные в результате работы имитационной модели, а также значения статистических характеристик МОЖ $m_{\tau_{\text{par}}}^{\text{ан}}$ и СКО $\sigma_{\tau_{\text{par}}}^{\text{ан}}$, рассчитанные с помощью выражений (3, 4), в зависимости от изменения значений параметра формы $\alpha \in (1; 2]$ при фиксированном значении коэффициента масштаба $k=1$, представлены в табл. 1 и на рис. 2, 3.

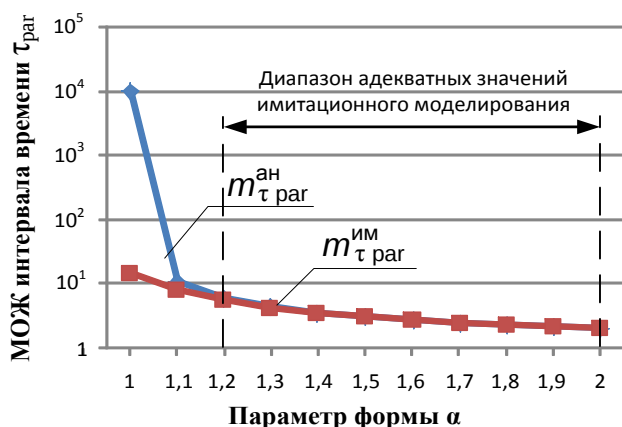


Рис. 2. Зависимость значений МОЖ, полученных при проведении имитационного моделирования $m_{\tau_{\text{par}}}^{\text{им}}$ и аналитически $m_{\tau_{\text{par}}}^{\text{ан}}$, от значений параметра формы α

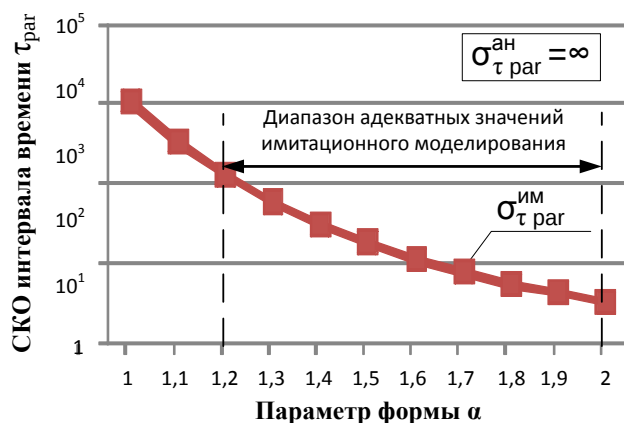


Рис. 3. Зависимость значений СКО, полученных при проведении имитационного моделирования $\sigma_{\tau_{\text{par}}}^{\text{им}}$, от значений параметра формы α

Согласно выражению (4), СКО случайной величины τ_{par} потока с распределением Парето имеет значение $\sigma_{\tau_{\text{par}}}^{\text{ан}} = \infty$ при значении параметра формы $\alpha \in (1; 2]$ [11, 13]. Точность реализации на имитационной модели СКО $\sigma_{\tau_{\text{par}}}^{\text{им}}$ интервалов времени между поступлением очередных заявок потока с распределением Парето при увеличении значения параметра α снижается и достигает минимума $\sigma_{\tau_{\text{par}}}^{\text{им}} = 3,23$ при $\alpha=2$. Это означает, что погрешность между значениями СКО, полученными аналитически $\sigma_{\tau_{\text{par}}}^{\text{ан}}$ и с помощью

имитационной модели $\sigma_{\tau \text{ пар}}^{\text{им}}$, увеличивается при росте значения параметра формы α (табл. 1, рис. 3).

Таблица 1 – Сравнение значений статистических характеристик МОЖ и СКО распределения Парето, полученных аналитически и на основе имитационного моделирования

Значения характеристик	Значения параметра формы α (при $k=1$)										
	1,0001	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
МОЖ, полученное аналитически $m_{\tau \text{ пар}}^{\text{ан}}$	10001	11,0	6,0	4,33	3,5	3,0	2,67	2,43	2,25	2,11	2,0
МОЖ, полученное на основе имитационного моделирования $m_{\tau \text{ пар}}^{\text{им}}$	14,442	8,08	5,48	4,19	3,45	2,98	2,66	2,43	2,25	2,11	2,0
Погрешность имитационного моделирования относительно аналитического, %	99,8	26,5	8,6	3,2	1,43	0,6	0,37	0	0	0	0
СКО, полученное аналитически $\sigma_{\tau \text{ пар}}^{\text{ан}}$	Равно ∞ , так как имеет конечные значения только при $\alpha > 2$										
СКО, полученное на основе имитационного моделирования $\sigma_{\tau \text{ пар}}^{\text{им}}$	1051,2	332,88	129,72	59,44	30,99	17,93	11,30	7,64	5,48	4,12	3,23
Погрешность имитационного моделирования относительно аналитического, %	Увеличивается при росте значения параметра формы α										

Таким образом, можно сделать вывод, что использование распределения Парето при проведении имитационного моделирования трафика со сложной структурой ограничено адекватностью полученных при моделировании оценок МОЖ и СКО аналитическим расчетам. В связи с вышеуказанным, использование в имитационном моделировании трафика со сложной структурой распределения Парето предлагается ограничить диапазон параметра $\alpha \in [1,2; 2]$.

Также в ходе проведения имитационного моделирования трафика со сложной структурой модель потока с распределением Парето, представленная в приложении 2, была проверена на масштабируемость путем изменения значений коэффициента масштаба k в диапазоне $k \in [10^{-3}; 10^3]$. Результаты представлены в табл. 2. Были получены значения коэффициента вариации $c_{\tau \text{ пар}}$, вычисленные по выражению (1) в соответствии со значениями МОЖ $m_{\tau \text{ пар}}^{\text{им}}$ и СКО $\sigma_{\tau \text{ пар}}^{\text{им}}$ из табл. 1, а также получены значения коэффициента Херста H , рассчитанного в соответствии с выражением (5).

Таблица 2 – Значения параметра α и соответствующих ему значений коэффициентов вариации $c_{\tau \text{ par}}$ и Херста H

Значения коэффициентов	Значение параметра формы α распределения Парето при $k \in [10^{-3}; 10^3]$, $\alpha \in [1,2; 2]$								
	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2
вариации $c_{\tau \text{ par}}$ (согласно выражению (1))	23,67	14,18	8,98	6,01	4,25	3,14	2,44	1,95	1,62
Херста H (согласно выражению (5))	0,9	0,85	0,8	0,75	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5

В табл. 2 и на рис. 4 вместе со значениями коэффициента вариации $c_{\tau \text{ par}}$, рассчитанного с помощью выражения (1), согласно полученным в результате моделирования значениям статистических характеристик МОЖ $m_{\tau \text{ par}}^{\text{им}}$ и СКО $\sigma_{\tau \text{ par}}^{\text{им}}$ (табл. 1), представлены значения коэффициента Херста H , рассчитанного в соответствии с выражением (5), при различных значениях $\alpha \in [1,2; 2]$.

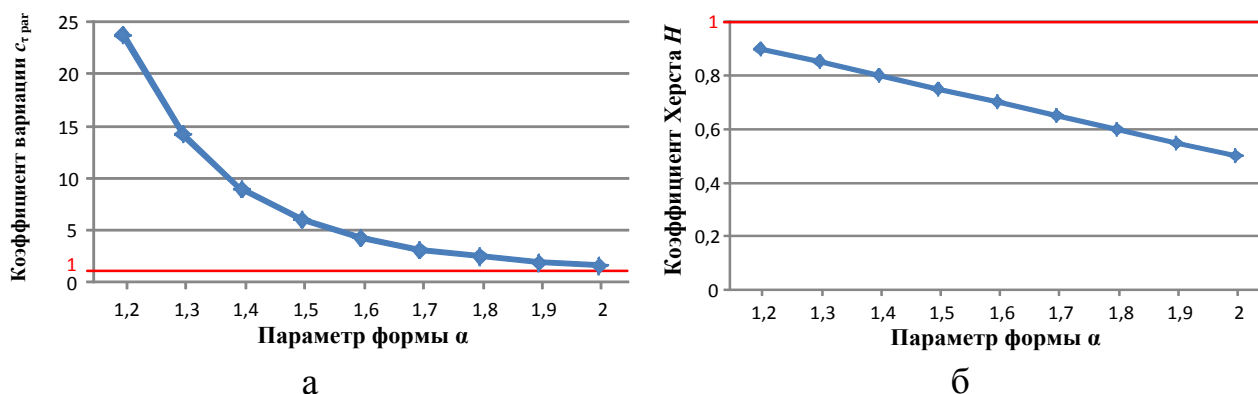


Рис. 4. Зависимость значений коэффициента вариации $c_{\tau \text{ par}}$ (а) и коэффициента Херста H (б) от параметра формы α распределения Парето при $k \in [10^{-3}; 10^3]$, $\alpha \in [1,2; 2]$

На основе полученных результатов моделирования трафика со сложной структурой, представленных в табл. 2 и на рис. 4 было выявлено, что коэффициент вариации $c_{\tau \text{ par}}$ снижается при увеличении значения параметра α и не зависит от значений коэффициента k , что было проверено для диапазона значений $k \in [10^{-3}; 10^3]$. Таким образом, оба показателя $c_{\tau \text{ par}}$ и H можно использовать в качестве показателя структурной сложности трафика.

Также при анализе результатов моделирования было выявлено, что полученные значения коэффициента вариации $c_{\tau \text{ par}}$ имеют экспоненциальную зависимость относительно значений параметра формы α при $\alpha \in [1,2; 2]$ (рис. 4а). Для аналитического обобщения результатов имитационного моделирования

потока с распределением Парето (табл. 3, рис. 4а) была предложена аппроксимация зависимости коэффициента вариации $c_{\tau \text{ par}}$ от параметра α

$$c_{\tau \text{ аппр}}(\alpha) = 1,41 \cdot 10^4 \cdot e^{-5,384 \cdot \alpha} + 1,52, \text{ где } \alpha \in [1,2; 2]. \quad (6)$$

Средняя ошибка аппроксимации $\delta_{\text{аппр}}$ определяется выражением

$$\delta_{\text{аппр}} = \frac{1}{n} \cdot \sum \frac{|c_{\tau \text{ аппр}}(\alpha) - c_{\tau \text{ пар}}|}{c_{\tau \text{ аппр}}(\alpha)} \cdot 100\%, \quad (7)$$

где значения $c_{\tau \text{ аппр}}(\alpha)$ определяются согласно выражению (6); $c_{\tau \text{ пар}}$ – согласно выражению (1); n – число значений параметра α (здесь $n=9$).

Оценки значений коэффициента вариации, полученные в результате имитационного моделирования $c_{\tau \text{ пар}}$, а также значения $c_{\tau \text{ аппр}}(\alpha)$, полученные в соответствии с функцией аппроксимации (6), представлены в табл. 3.

Таблица 3 – Результаты оценки значений коэффициентов вариации, полученные в результате имитационного моделирования $c_{\tau \text{ пар}}$ и в соответствии с функцией аппроксимации $c_{\tau \text{ аппр}}(\alpha)$

Значения коэффициентов вариации	Параметр формы α распределения Парето								
	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2
в результате имитационного моделирования $c_{\tau \text{ пар}}$	23,67	14,18	8,98	6,01	4,25	3,14	2,44	1,95	1,62
по функции аппроксимации $c_{\tau \text{ аппр}}(\alpha)$	23,566	14,388	9,03	5,904	4,08	3,014	2,392	2,03	1,817
Ошибка аппроксимации $\delta_{\text{аппр}}$, %	3,27								

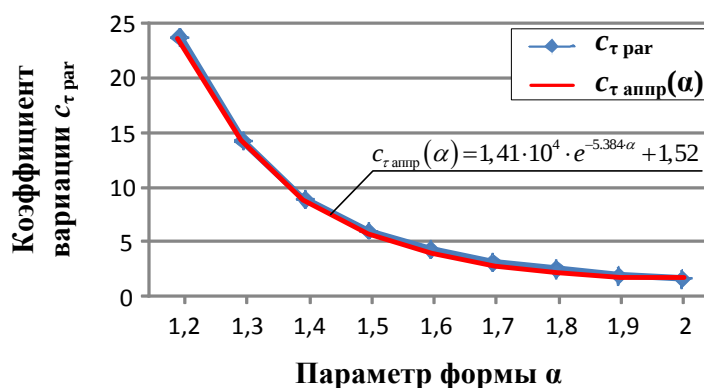


Рис. 5. Зависимость значений коэффициентов вариации, полученных в результате моделирования $c_{\tau \text{ пар}}$ и по функции аппроксимации $c_{\tau \text{ аппр}}(\alpha)$, от значений параметра формы $\alpha \in [1,2; 2]$ распределения Парето

В работе [9], было определено, что коэффициент Херста для мультисервисного трафика, циркулирующего в реальных СС, находится в диапазоне значений $H \in [0,75; 0,95]$. Это подтверждается результатами исследования, проведенного в работе [17], где рассчитано, что среднее значение

коэффициента Херста мультисервисного трафика имеет значение $H=0,8$. Таким образом, можно утверждать, что диапазон значений параметра $\alpha \in [1,2; 2]$ распределения Парето, который удовлетворяет условию адекватности моделируемых значений МОЖ $m_{\tau \text{ пар}}^{\text{им}}$ и СКО $\sigma_{\tau \text{ пар}}^{\text{им}}$, является адекватным для решения задачи проведения имитационного моделирования работы узлового оборудования СС в условиях передачи трафика со сложной структурой ($c_{\tau} > 1$).

Исследование имитационной модели обслуживания потока с распределением Парето $Pa/M/1$

Для исследования времени задержки $T_{\text{зад пар}}$ при обслуживании потока заявок с распределением Парето (моделирующего трафик со сложной структурой ($c_{\tau} > 1$)) узловым оборудованием СС с экспоненциальным временем обслуживания была разработана имитационная модель типа $Pa/M/1$ (рис. 6). Текст модели, составленный в среде GPSS World, представлен в приложении 3).

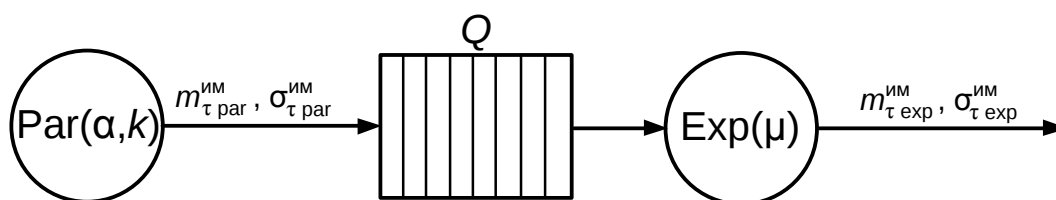


Рис. 6. Имитационная модель $Pa/M/1$ обслуживания трафика с распределением Парето

При проведении имитационного моделирования были введены следующие ограничения:

- 1) объем буфера $Q = \infty$;
- 2) время обработки заявки в устройстве обслуживания $T_{\text{обсл}} = 1/\mu = 1$;
- 3) значение коэффициента масштаба распределения Парето $k \in [0,1; 1]$;
- 4) значение параметра формы распределения Парето $\alpha \in [1,2; 2]$.

При проведении моделирования было замечено, что в среде GPSS World практически 90% полученных значений интервала времени между заявками были равны $\tau_{\text{пар}} \approx 1 \dots 10k$. При этом максимальное число заявок, ожидавших обслуживания в буфере Q было равно 12. Это связано с тем, что минимальное значение интервала времени между заявками $\tau_{\text{пар}}$ определяются коэффициентом $k = \min(\tau_{\text{пар}}) = 1$.

Для оценки уровня снижения своевременности обслуживания трафика в узлах СС по показателю времени задержки $T_{\text{зад пар}}$ разработанная имитационная модель $Pa/M/1$ (рис. 6, приложение 3) была исследована на масштабируемость при различных значениях параметров $\alpha \in [1,2; 2]$ и $k \in [0,1; 1]$. Результаты исследования представлены в табл. 4.

Таблица 4 – Результаты исследования на масштабируемость имитационной модели $Pa/M/1$ при различных значениях параметров $\alpha \in [1,2; 2]$, $k \in [0,1; 1]$

Входные параметры		$T_{обсл}=1$																						
		Коэффициент вариации c_{τ}	23,6	14,17	8,97	6	4,25	3,15	2,44	1,95	1,62													
		Коэффициент Херста H	0,9	0,85	0,8	0,75	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5													
		Параметр формы α	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2													
Выходные характеристики		Коэффициент масштаба k																						
														1	$m_{\tau}^{им}$	6	4,33	3,5	3	2,67	2,43	2,25	2,11	2
															$T_{зад\ exp}$	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2
															$T_{зад\ par}$	1,31	1,34	1,37	1,4	1,43	1,47	1,5	1,53	1,57
														0,9	$m_{\tau}^{им}$	5,4	3,9	3,15	2,7	2,4	2,185	2,025	1,9	1,8
															$T_{зад\ exp}$	1,225	1,34	1,46	1,59	1,71	1,84	1,975	2,111	2,25
															$T_{зад\ par}$	1,4	1,44	1,48	1,53	1,57	1,62	1,68	1,73	1,78
														0,8	$m_{\tau}^{им}$	4,8	3,467	2,8	2,4	2,13	1,94	1,8	1,69	1,6
															$T_{зад\ exp}$	1,26	1,4	1,55	1,71	1,88	2,06	2,25	2,45	2,67
															$T_{зад\ par}$	1,52	1,59	1,65	1,72	1,8	1,88	1,97	2,1	2,2
														0,7	$m_{\tau}^{им}$	4,2	3	2,45	2,1	1,867	1,7	1,575	1,48	1,4
															$T_{зад\ exp}$	1,31	1,5	1,69	1,91	2,153	2,43	2,74	3,08	3,5
															$T_{зад\ par}$	1,72	1,82	1,94	2,06	2,2	2,36	2,54	2,74	2,98
														0,6	$m_{\tau}^{им}$	3,6	2,6	2,1	1,8	1,6	1,48	1,35	1,267	1,2
															$T_{зад\ exp}$	1,38	1,62	1,91	2,25	2,67	3,085	3,85	4,73	5,96
															$T_{зад\ par}$	2,06	2,25	2,47	2,74	3,06	3,47	3,74	4,7	5,68
														0,5	$m_{\tau}^{им}$	3	2,17	1,75	1,5	1,33	1,21	1,125	1,055	1
															$T_{зад\ exp}$	1,5	1,85	2,33	3	4,02	5,73	8,94	18,7	724
															$T_{зад\ par}$	2,8	3,2	3,77	4,6	5,9	8	12,5	26,2	419,2
														0,4	$m_{\tau}^{им}$	2,4	1,73	1,4	1,2	1,067	0,97	0,9	0,84	0,8
															$T_{зад\ exp}$	1,71	2,37	3,5	5,96	15,8	14700	49700	79700	99700
															$T_{зад\ par}$	4,58	6,2	9,2	17	55	13600	49000	76700	99000
														0,3	$m_{\tau}^{им}$	1,8	1,3	1,05	0,9	0,8	0,728	0,675	0,63	0,6
															$T_{зад\ exp}$	2,25	1,74	19	49700	99700	135600	162100	184600	199600
															$T_{зад\ par}$	14,1	37	499	51200	99000	135000	161600	182400	199000
														0,2	$m_{\tau}^{им}$	1,2	0,86	0,7	0,6	0,53	0,48	0,485	0,45	0,4
															$T_{зад\ exp}$	5,7	69700	149600	199600	234600	259600	257000	274600	299500
															$T_{зад\ par}$	967	78700	153000	200600	233000	256500	274000	288000	299000
0,1	$m_{\tau}^{им}$	0,6	0,43	0,35	0,3	0,267	0,243	0,225	0,21	0,2														
	$T_{зад\ exp}$	199600	284600	324600	349500	366000	378000	387000	395000	399500														
	$T_{зад\ par}$	224000	290000	326000	350000	366000	378000	387000	395000	400000														

В табл. 5 значения времени задержки заявок потока с распределением Парето $T_{зад\ par}$, представлены в нормированном виде по отношению к значениям времени задержки заявок потока с экспоненциальным распределением $T_{зад\ exp}/T_{зад\ exp}$ (значения $T_{зад\ par}$ и $T_{зад\ exp}$ берутся из табл. 4), при одинаковом времени обслуживания $T_{обсл}=1$ заявок для этих потоков.

Таблица 5 – Количественная оценка уровня снижения своевременности обслуживания трафика со сложной структурой по отношению к трафику с экспоненциальным распределением по показателю времени задержки $T_{\text{зад}}$ (имитационная модель $Pa/M/1$)

Входные параметры	T _{обсл} = 1											
	Коэффициент вариации c _τ		23,6	14,17	8,97	6	4,25	3,15	2,44	1,95	1,62	
	Коэффициент Херста H		0,9	0,85	0,8	0,75	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5	
	Параметр формы α		1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	
Выходные характеристики	Коэффициент масштаба k	1	m _τ ^{им}	6	4,33	3,5	3	2,67	2,43	2,25	2,11	2
			T _{зад пар} / T _{зад exp}	1,091667	1,030769	0,978571	0,933333	0,89375	0,864706	0,833333	0,805263	0,785
		0,9	m _τ ^{им}	5,4	3,9	3,15	2,7	2,4	2,185	2,025	1,9	1,8
			T _{зад пар} / T _{зад exp}	1,142857	1,074627	1,013699	0,962264	0,918129	0,880435	0,850633	0,819517	0,791111
		0,8	m _τ ^{им}	4,8	3,467	2,8	2,4	2,13	1,94	1,8	1,69	1,6
			T _{зад пар} / T _{зад exp}	1,206349	1,135714	1,064516	1,005848	0,957447	0,912621	0,875556	0,857143	0,82397
		0,7	m _τ ^{им}	4,2	3	2,45	2,1	1,867	1,7	1,575	1,48	1,4
			T _{зад пар} / T _{зад exp}	1,312977	1,213333	1,147929	1,078534	1,02183	0,971193	0,927007	0,88961	0,851429
		0,6	m _τ ^{им}	3,6	2,6	2,1	1,8	1,6	1,48	1,35	1,267	1,2
			T _{зад пар} / T _{зад exp}	1,492754	1,388889	1,293194	1,217778	1,146067	1,124797	0,971429	0,993658	0,95302
		0,5	m _τ ^{им}	3	2,17	1,75	1,5	1,33	1,21	1,125	1,055	1
			T _{зад пар} / T _{зад exp}	1,866667	1,72973	1,618026	1,533333	1,467662	1,396161	1,39821	1,40107	0,579006
		0,4	m _τ ^{им}	2,4	1,73	1,4	1,2	1,067	0,97	0,9	0,84	0,8
			T _{зад пар} / T _{зад exp}	2,678363	2,616034	2,628571	2,852349	3,481013	0,92517	0,985915	0,962359	0,992979
		0,3	m _τ ^{им}	1,8	1,3	1,05	0,9	0,8	0,728	0,675	0,63	0,6
			T _{зад пар} / T _{зад exp}	6,266667	21,26437	26,26316	1,030181	0,992979	0,995575	0,996915	0,988082	0,996994
		0,2	m _τ ^{им}	1,2	0,86	0,7	0,6	0,53	0,48	0,485	0,45	0,4
			T _{зад пар} / T _{зад exp}	169,6491	1,129125	1,022727	1,00501	0,99318	0,988059	1,066148	1,048798	0,998331
		0,1	m _τ ^{им}	0,6	0,43	0,35	0,3	0,267	0,243	0,225	0,21	0,2
			T _{зад пар} / T _{зад exp}	1,122244	1,018974	1,004313	1,001431	1	1	1	1	1,001252

Значения времени задержки $T_{\text{зад exp}}$ для потока с экспоненциальным распределением получены при исследовании имитационной модели $M/M/1$ (текст имитационной модели, составленный в среде GPSS World, представлен в приложении 1). При проведении моделирования были введены ограничения:

- 1) объем буфера $Q=\infty$;
- 2) время обработки заявки в устройстве обслуживания $T_{\text{обсл}}=1/\mu=1$;
- 3) значения МОЖ интервала времени между поступлением заявок потока с экспоненциальным распределением равны соответствующим значениям МОЖ интервала времени между поступлением заявок потока с распределением Парето $m_{\text{т exp}}^{\text{им}} = m_{\text{т пар}}^{\text{им}} = m_{\text{т}}^{\text{им}}$, определены в соответствии с выражением (3) и записаны в табл. 4 в ячейках, выделенных синим цветом.

Проанализировав результаты, полученные в ходе исследования модели $Ra/M/1$, которые представлены в табл. 5, было выявлено, что нескольким парам значений (α, k) соответствует одно и то же значение МОЖ интервала времени между поступлением заявок потока с распределением Парето $m_{\text{т пар}}^{\text{им}}$ (пример таких пар значений (α, k) приведен в табл. 5 для МОЖ $m_{\text{т пар}}^{\text{им}}$, имеющих значения 0,6, 1,8 и 3). Однако чем меньше значения параметра формы α и коэффициента масштаба k , тем больше значение времени задержки $T_{\text{зад пар}}$ (значение отношения $T_{\text{зад пар}}/T_{\text{зад exp}}$).

Анализ результатов моделирования в части соотношения времен задержек $T_{\text{зад пар}}/T_{\text{зад exp}}$ позволил определить три субобласти $D_1 \in D$, $D_2 \in D$, $D_3 \in D$ с различными значениями параметра α и коэффициента k (табл. 5, рис. 7):

- 1) область $D_1 = \{\alpha \in [1,4; 2], k \in [0,6; 1]\}$ – область, в которой отношение времен задержек заявок потоков с Парето- и экспоненциальным распределениями (значения времени задержки для потоков рассчитаны в моделях $Ra/M/1$ и $M/M/1$ соответственно) всегда имеет значения $(T_{\text{зад пар}}/T_{\text{зад exp}}) < 1$. В области D_1 время задержки заявок потока с Парето-распределением имеет значения $T_{\text{зад пар}} \in [1,37; 5,68]$, которые всегда меньше значений времени задержки заявок потока с экспоненциальным распределением $T_{\text{зад exp}} \in [1,4; 5,96]$. Это говорит о том, что при любых значениях $(\alpha, k) \in D_1$ трафик с распределением Парето обслуживается с более высокой степенью своевременности, чем экспоненциальный. Область D_1 выделена в табл. 5 и на рис. 7 зеленым цветом.
- 2) область $D_2 = \{\alpha \in [1,2; 1,9], k \in [0,2; 1]\}$ – область, в которой отношение времен задержек заявок потоков с Парето- и экспоненциальным распределениями (значения времени задержки для потоков рассчитаны в моделях $Ra/M/1$ и $M/M/1$ соответственно), всегда имеет значения $(T_{\text{зад пар}}/T_{\text{зад exp}}) > 1$. В данной области D_2 время задержки заявок потока с Парето-распределением имеет значения $T_{\text{зад пар}} \in [1,31; 967]$, которые всегда больше значений времени задержки заявок потока

с экспоненциальным распределением $T_{\text{зад exp}} \in [1, 2; 19]$.
Причем $\forall \alpha \in D_2 \mid k < 0,5, k \in D_2$ отношение времен задержек заявок потоков имеет значения $(T_{\text{зад пар}}/T_{\text{зад exp}}) > 2$, что говорит о более чем двукратном снижении времени обработки потока с распределением Парето по сравнению с обслуживанием экспоненциального потока. Область D_2 выделена на рис. 7 фиолетовым цветом.

- 3) область $D_3 = \{\alpha \in [1, 2; 1, 9], k \in [0, 2; 1]\}$ – область, в которой отношение времен задержек заявок потоков с Парето- и экспоненциальным распределениями в моделях $Pa/M/1$ и $M/M/1$ соответственно, имеет значения $0,55 < (T_{\text{зад пар}}/T_{\text{зад exp}}) < 1,2$. Анализ значений отношений времен задержек потоков $T_{\text{зад пар}}/T_{\text{зад exp}}$ в областях D_1 и D_3 показал, что они имеют практически равные значения. Однако в области D_3 по сравнению с областью D_1 время задержки заявок потоков с экспоненциальным и Парето-распределением имеет большие на несколько порядков значения $T_{\text{зад exp}} \in [724; 4 \cdot 10^5]$ и $T_{\text{зад пар}} \in (419; 4 \cdot 10^5]$. Область D_3 соответствует перегрузке устройства обслуживания и выделена в табл. 5 и на рис. 7 красным цветом.

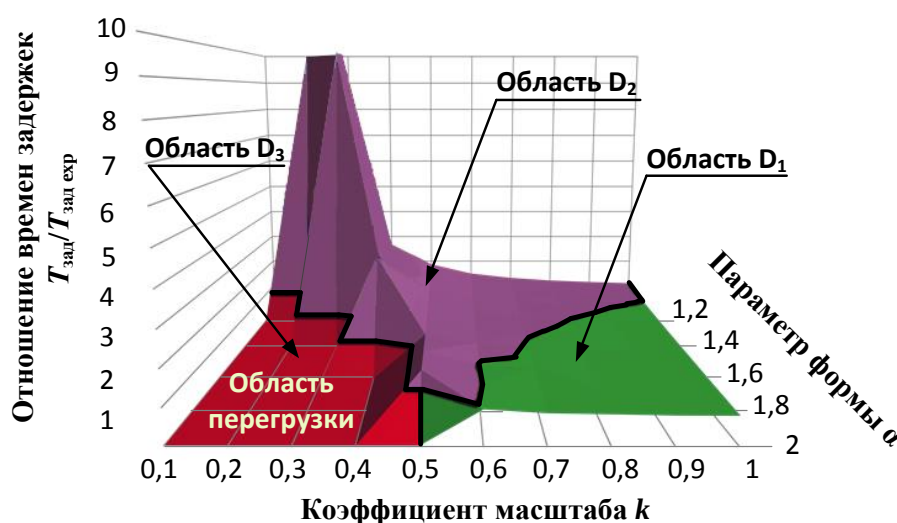


Рис. 7. Количественная оценка уровня снижения своевременности обслуживания трафика со сложной структурой по отношению к трафику с экспоненциальным распределением по показателю времени задержки $T_{\text{зад пар}}$ (имитационная модель $Pa/M/1$)

Комплексным критерием дифференцирования области D является система

$$D = \begin{cases} D_1, \text{ если } (T_{\text{зад пар}}/T_{\text{зад exp}}) < 1, m_{\tau \text{ пар}}^{\text{им}} > T_{\text{обсл}}; \\ D_2, \text{ если } (T_{\text{зад пар}}/T_{\text{зад exp}}) > 1, m_{\tau \text{ пар}}^{\text{им}} > T_{\text{обсл}}; \\ D_3, \text{ если } 0,55 < (T_{\text{зад пар}}/T_{\text{зад exp}}) < 1,2, m_{\tau \text{ пар}}^{\text{им}} \leq T_{\text{обсл}}. \end{cases} \quad (8)$$

Также по результатам проведенного моделирования можно сделать вывод о том, что на значение времени задержки $T_{\text{зад}}$ влияет загрузка ρ устройства обслуживания, которая при выбранном ограничении на время обслуживания в устройстве $T_{\text{обсл}}=1/\mu=1$, зависит от значений МОЖ интервала времени между поступлением заявок m_{τ} . В свою очередь, согласно выражению (3), на значение МОЖ $m_{\tau}^{\text{ан}}$ потока с Парето-распределением влияют значения параметра формы α и коэффициента масштаба k . Тогда выражение для вычисления значения загрузки устройства обслуживания имеет вид

$$\rho = \frac{T_{\text{обсл}}}{m_{\tau}^{\text{ан}}} = \frac{T_{\text{обсл}} \cdot (\alpha - 1)}{\alpha \cdot k}. \quad (9)$$

Из выражения (9) можно определить предельные условия, когда загрузка ρ устройства обслуживания имитационной модели $Pa/M/1$ будет иметь предельное значение $\rho=1$. Подставив данное значение загрузки $\rho=1$ в выражение (9) при фиксированном значении времени обработки заявки в устройстве обслуживания $T_{\text{обсл}}=1/\mu=1$ и заданных значениях параметра формы из диапазона $\alpha \in [1,2; 2]$, получаем выражение для области предельных значений коэффициента k , которые приводят к полной загрузке устройства обслуживания (рис. 8)

$$k = \frac{T_{\text{обсл}} \cdot (\alpha - 1)}{\alpha}. \quad (10)$$

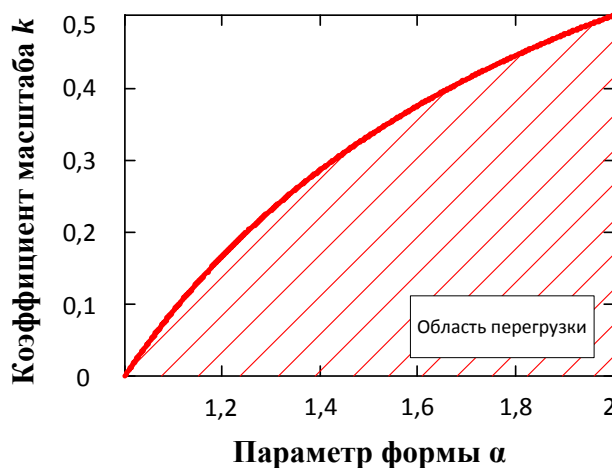


Рис. 8. Предельные значения коэффициента масштаба k при различных значениях параметра формы $\alpha \in [1,2; 2]$, которые приводят к перегрузке устройства обслуживания

Таблица 6 – Предельные значения коэффициента масштаба k при различных значениях параметра формы $\alpha \in [1,2; 2]$, которые приводят к перегрузке устройства обслуживания

Параметр формы α	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2
Предельные значения коэффициента k	0,167	0,231	0,286	0,333	0,375	0,412	0,444	0,474	0,5

Результаты, представленные на рис. 8 и в табл. 6, подтверждают результаты проведенного исследования модели $Ra/M/1$ по оценке уровня снижения своевременности обслуживания трафика со сложной структурой в узлах СС по показателю времени задержки $T_{\text{зад пар}}$, представленные в табл. 4.

Полученные результаты имеют качественную сходимость результатов имитационного моделирования с результатами работ [1-6, 9, 15-17].

Мультисервисному трафику свойственна, так называемая, «пачечность», что подтверждается результатами анализа трафика реальных СС, представленными в работах [18-20].

Исследование имитационной модели обслуживания потока с гиперэкспоненциальным распределением $H_2/M/1$

Использование потока с распределением Парето не позволяет смоделировать указанное свойство реального трафика, в связи с чем, предлагается перейти к моделированию трафика на основе «ON-OFF» моделей. Данный способ моделирования, апробированный в работах [21-23], позволяет не только обеспечить формирование потока со сложной структурой ($c_\tau > 1$), но и воспроизвести наличие свойств «пачечности» трафика.

В качестве «ON-OFF» модели трафика со сложной структурой предлагается использовать ранее разработанную автором имитационную модель [24], которая представлена на рис. 9 (текст модели в среде GPSS представлен в приложении 5). Эта модель позволяет моделировать трафик со сложной структурой ($c_\tau > 1$) в виде потока с гиперэкспоненциальным распределением интервала времени τ_{H2} между очередными пакетами и заданным коэффициентом вариации $c_{\tau H2}$. В данной модели поток заявок с гиперэкспоненциальным распределением H_2 формируется с помощью двух экспоненциальных фаз $\text{Exp}(\lambda_1)$ и $\text{Exp}(\lambda_2)$ (потоков с экспоненциальными распределениями интервалов времени между очередными заявками, имеющие различные интенсивности поступления заявок).

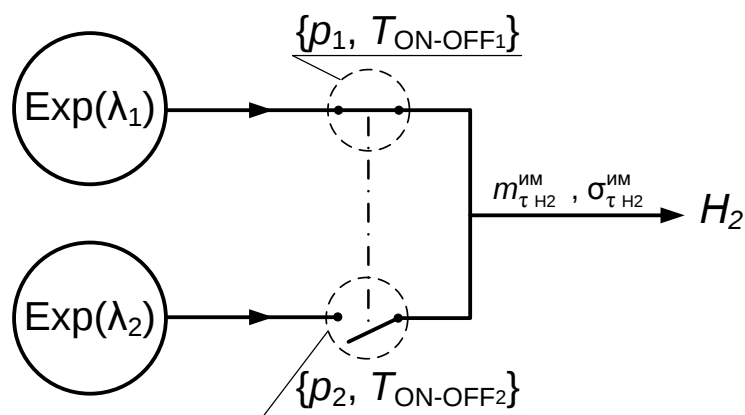


Рис. 9. Имитационная модель трафика со сложной структурой с гиперэкспоненциальным распределением H_2 [24]

Включение ключей первой и второй экспоненциальных фаз $\text{Exp}(\lambda_1)$ и $\text{Exp}(\lambda_2)$ (рис. 9) происходит на разное время $T_{\text{ON-OFF}_1}$ и $T_{\text{ON-OFF}_2}$, определяемое в соответствии с системой [24]

$$\begin{cases} T_{\text{ON-OFF}_i} = 50/\lambda_i; \\ i = 1, 2; \\ \lambda_1 < \lambda_2. \end{cases} \quad (11)$$

Коэффициент, равный 50, в первом выражении системы (11) был подобран эмпирически с учетом заданного уровня адекватности имитационной модели.

Имитационная модель $H_2/M/1$ обслуживания трафика с гиперэкспоненциальным распределением представлена на рис. 10. Текст имитационной модели, составленный в среде GPSS World, представлен в приложении 6.

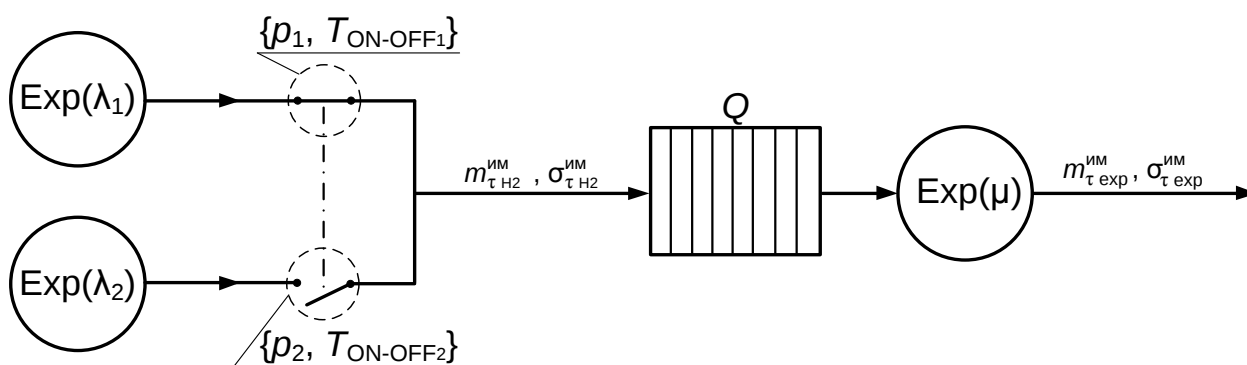


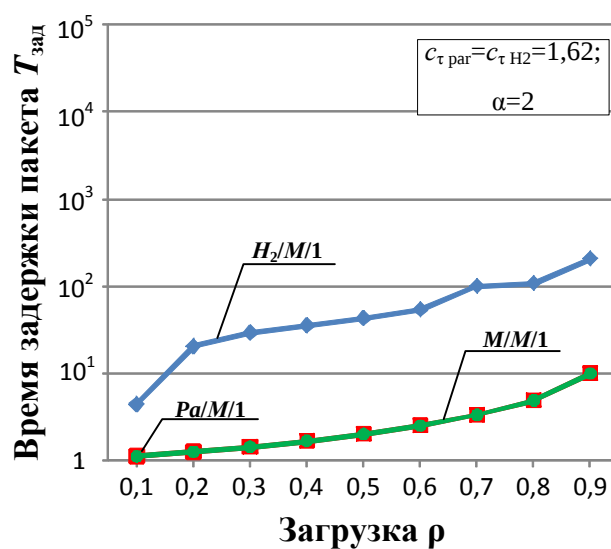
Рис. 10. Имитационная модель $H_2/M/1$ обслуживания трафика с гиперэкспоненциальным распределением

Результаты оценки уровня снижения своевременности обслуживания трафика со сложной структурой в узлах СС по показателю времени задержки $T_{\text{зад}}$ в зависимости от уровня загрузки ρ устройства обслуживания, полученные при исследовании модели $H_2/M/1$, а также их сравнение с результатами, полученными для моделей обслуживания трафика с Парето $Pa/M/1$ и экспоненциальным $M/M/1$ распределениями, представлены в табл. 7, рис. 11 и табл. 8, рис. 12.

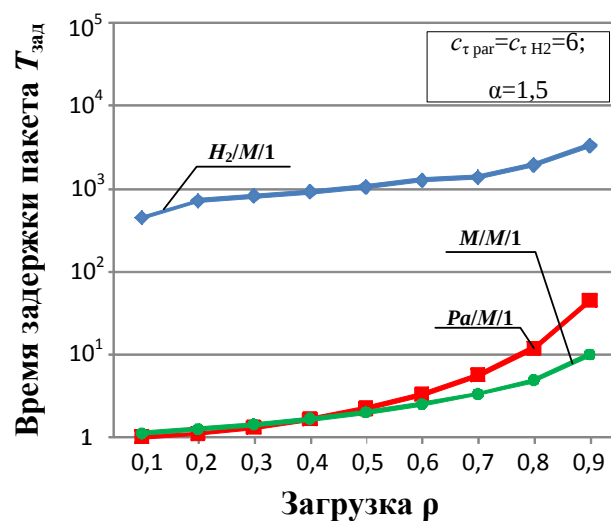
Таблица 7 – Результаты оценки уровня снижения своевременности обслуживания трафика со сложной структурой по отношению к трафику с экспоненциальным распределением по показателю времени задержки $T_{\text{зад}}$ в зависимости от уровня загрузки ρ устройства обслуживания

Входные параметры	$T_{\text{обсл}}$		1										
	Загрузка ρ		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9		
	МОЖ m_{τ} , соответствующее значению загрузки ρ при $T_{\text{обсл}}=1$		10	5	3,333	2,5	2	1,667	1,427	1,25	1,111		
Выходные характеристики	Экспон.		$T_{\text{зад эксп}}(\rho)$	1,11	1,25	1,43	1,67	2,0	2,5	3,33	4,87	9,95	
	Парето	$c_{\tau \text{ пар}}=1,62$ $\alpha=2$	k^*	5,0	2,5	1,667	1,25	1,0	0,834	0,714	0,625	0,556	
			$T_{\text{зад пар}}(\rho)$	1,0	1,04	1,13	1,3	1,57	2,01	2,81	4,56	10,5	
		$c_{\tau \text{ пар}}=1,95$ $\alpha=1,9$	k^*	4,737	2,368	1,579	1,184	0,947	0,79	0,677	0,592	0,526	
			$T_{\text{зад пар}}(\rho)$	1,001	1,042	1,148	1,33	1,624	2,109	3,0	5,015	12,03	
		$c_{\tau \text{ пар}}=2,44$ $\alpha=1,8$	k^*	4,444	2,222	1,48	1,11	0,889	0,741	0,635	0,556	0,494	
			$T_{\text{зад пар}}(\rho)$	1,002	1,05	1,169	1,372	1,7	2,25	3,286	5,646	14,36	
		$c_{\tau \text{ пар}}=3,15$ $\alpha=1,7$	k^*	4,117	2,059	1,372	1,029	0,823	0,686	0,588	0,515	0,457	
			$T_{\text{зад пар}}(\rho)$	1,003	1,061	1,2	1,43	1,81	2,46	3,71	6,67	18,92	
		$c_{\tau \text{ пар}}=4,2$ $\alpha=1,6$	k^*	3,75	1,875	1,25	0,938	0,75	0,625	0,536	0,468	0,417	
			$T_{\text{зад пар}}(\rho)$	1,005	1,077	1,24	1,513	1,968	2,771	4,367	8,54	26,23	
		$c_{\tau \text{ пар}}=6$ $\alpha=1,5$	k^*	3,333	1,667	1,111	4	0,667	0,556	0,476	0,417	0,37	
			$T_{\text{зад пар}}(\rho)$	1,01	1,1	1,31	1,65	2,23	3,3	5,61	11,9	44,85	
		$c_{\tau \text{ пар}}=8,97$ $\alpha=1,4$	k^*	2,857	1,429	0,952	0,714	0,571	0,476	0,408	0,357	0,317	
			$T_{\text{зад пар}}(\rho)$	1,016	1,15	1,42	1,88	2,73	4,38	8,29	21,09	103	
		$c_{\tau \text{ пар}}=14,2$ $\alpha=1,3$	k^*	2,308	1,154	0,769	0,577	0,462	0,385	0,33	0,288	0,256	
			$T_{\text{зад пар}}(\rho)$	1,033	1,24	1,65	2,4	3,88	7,22	16,74	57,52	449,4	
		$c_{\tau \text{ пар}}=23,6$ $\alpha=1,2$	k^*	1,667	0,834	0,556	0,417	0,333	0,278	0,238	0,208	0,185	
			$T_{\text{зад пар}}(\rho)$	1,08	1,48	2,31	4,1	8,6	22,2	78,5	463,6	5360	
		Гиперэксп.	$c_{\tau \text{ H2}}=1,62$	$T_{\text{зад H2}}(\rho)$	4,4	20,37	28,9	34,9	42,6	53,3	69,9	104,6	210
			$c_{\tau \text{ H2}}=6$		448,1	712,9	814,4	909,7	1050	1265	1371	1934	3304
			$c_{\tau \text{ H2}}=23,6$		6878	11283	14722	18640	15356	20322	19866	34153	87013

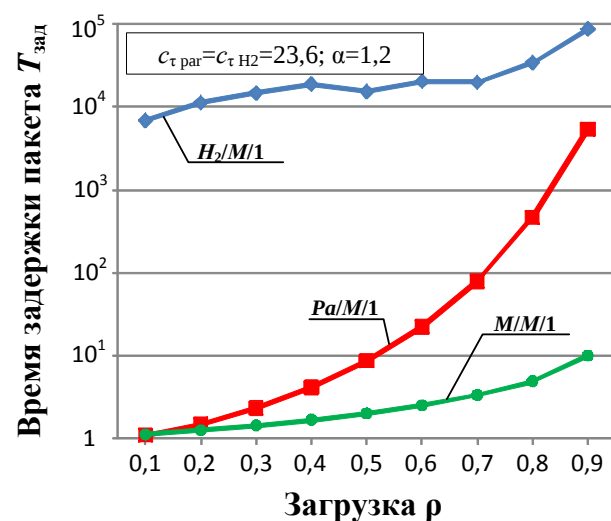
Примечание: значение k^* приведено справочно и соответствует указанному в таблице уровню загрузки ρ устройства обслуживания в соответствии с выражением (9).



а.



б.



в.

Рис. 11. Зависимость времени задержки пакета $T_{\text{зад}}$ от загрузки ρ для моделей $M/M/1$, $Pa/M/1$, $H_2/M/1$ при различных значениях коэффициента вариации:
а. – $c_{\tau} = 1,62$; б. – $c_{\tau} = 6$; в. – $c_{\tau} = 23,6$

Таблица 8 – Количественная оценка уровня снижения своевременности обслуживания трафика со сложной структурой по отношению к трафику с экспоненциальным распределением по показателю времени задержки $T_{\text{зад}}$ в зависимости от уровня загрузки ρ устройства обслуживания

Входные параметры	$T_{\text{обсл}}$		1									
	Загрузка ρ		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	
	МОЖ m_t , соответствующее значению загрузки ρ при $T_{\text{обсл}}=1$		10	5	3,333	2,5	2	1,667	1,427	1,25	1,111	
Выходные характеристики	Парето	$c_{\tau \text{ пар}}=1,62$ $\alpha=2$	$T_{\text{зад пар}}/T_{\text{зад exp}}$	0,9	0,832	0,79	0,78	0,785	0,8	0,84	0,94	1,05
		$c_{\tau \text{ пар}}=1,95$ $\alpha=1,9$	$T_{\text{зад пар}}/T_{\text{зад exp}}$	0,9	0,83	0,8	0,8	0,81	0,84	0,9	1,03	1,21
		$c_{\tau \text{ пар}}=2,44$ $\alpha=1,8$	$T_{\text{зад пар}}/T_{\text{зад exp}}$	0,9	0,84	0,82	0,82	0,85	0,9	0,99	1,16	1,44
		$c_{\tau \text{ пар}}=3,15$ $\alpha=1,7$	$T_{\text{зад пар}}/T_{\text{зад exp}}$	0,9	0,85	0,84	0,86	0,91	0,98	1,11	1,37	1,9
		$c_{\tau \text{ пар}}=4,2$ $\alpha=1,6$	$T_{\text{зад пар}}/T_{\text{зад exp}}$	0,9	0,86	0,87	0,91	0,98	1,11	1,31	1,75	2,64
		$c_{\tau \text{ пар}}=6$ $\alpha=1,5$	$T_{\text{зад пар}}/T_{\text{зад exp}}$	0,91	0,88	0,92	0,99	1,12	1,32	1,68	2,44	4,51
		$c_{\tau \text{ пар}}=8,97$ $\alpha=1,4$	$T_{\text{зад пар}}/T_{\text{зад exp}}$	0,92	0,92	0,99	1,13	1,37	1,75	2,49	4,33	10,4
		$c_{\tau \text{ пар}}=14,2$ $\alpha=1,3$	$T_{\text{зад пар}}/T_{\text{зад exp}}$	0,93	0,99	1,15	1,44	1,94	2,89	5,0	11,8	45,17
		$c_{\tau \text{ пар}}=23,6$ $\alpha=1,2$	$T_{\text{зад пар}}/T_{\text{зад exp}}$	0,97	1,18	1,62	2,46	4,3	8,9	23,6	95,2	538,7
	Гиперэсп.	$c_{\tau \text{ H2}}=1,62$	$T_{\text{зад H2}}/T_{\text{зад exp}}$	3,97	16,3	20,2	20,9	21,3	21,3	21	21,5	21,1
		$c_{\tau \text{ H2}}=6$		403,7	570,3	569,5	544,7	525	506	411,7	397,1	332
		$c_{\tau \text{ H2}}=23,6$		6196,4	9026,4	10295,1	11161,7	7678	8128,8	5965,8	7013	8745

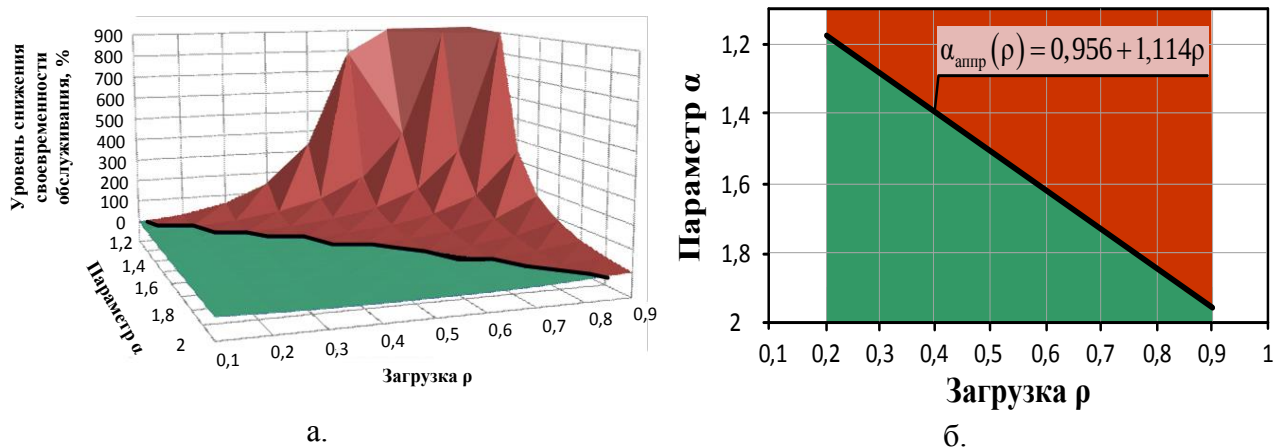


Рис. 12. а. – Уровень снижения своевременности обслуживания трафика со сложной структурой по отношению к трафику с экспоненциальным распределением в зависимости от уровня загрузки ρ устройства обслуживания и значения параметра формы α ; б. – функция аппроксимации $\alpha_{\text{аппр}}(\rho)$ значений параметра формы α при различной загрузке ρ устройства обслуживания, в которых происходит резкое снижение своевременности обслуживания трафика со сложной структурой

Загрузка ρ устройства обслуживания рассчитывается по выражению

$$\rho = \frac{T_{\text{обсл}}}{m_{\tau_{\text{H2}}}^{\text{треб}}} = \frac{T_{\text{обсл}}}{m_{\tau_{\text{пар}}}^{\text{ан}}} = \frac{T_{\text{обсл}} \cdot (\alpha - 1)}{\alpha \cdot k}, \quad (12)$$

где $m_{\tau_{\text{H2}}}^{\text{треб}} = m_{\tau_{\text{пар}}}^{\text{ан}}$ – требуемое значение МОЖ интервала времени τ_{H2} между заявками генерируемого гиперэкспоненциального потока.

В качестве ограничений при исследовании модели $H_2/M/1$ использовались:

- 1) коэффициент вариации $c_{\tau_{\text{H2}}}$, равный значениям коэффициента вариации потока с Парето-распределением $c_{\tau_{\text{пар}}}$ при определенных значениях параметра $\alpha \in [1,2; 2]$. При этом диапазон выбранных значений параметра α соответствует значениям коэффициентов вариации $c_{\tau} > 1$ и Херста $H \in [0,75; 0,95]$, которые, как показано в работах [9, 17], соответствуют мультисервисному трафику в реальных СС;
- 2) время обработки в устройстве обслуживания $T_{\text{обсл}} = 1/\mu = 1$;
- 3) загрузка устройства обслуживания $\rho \in [0,1; 0,9]$.

Значения входных и полученных результатов нормированы ко времени $T_{\text{обсл}}$, которое принято за единицу.

Расчет входных параметров модели потока с гиперэкспоненциальным распределением проводится в соответствии с выражениями [7]:

- 1) для интенсивностей поступления заявок первой λ_1 и второй λ_2 экспоненциальных фаз гиперэкспоненциального потока

$$\lambda_1 = \frac{1}{m_{\tau_{\text{H2}}}^{\text{треб}} \cdot \left[1 + \sqrt{\frac{p_2}{2p_1} (c_{\tau_{\text{H2}}}^{\text{треб}})^2 - 1} \right]}, \quad (13)$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{m_{\tau H2}^{\text{треб}} \cdot \left[1 - \sqrt{\frac{p_1}{2p_2} (c_{\tau H2}^{\text{треб}})^2 - 1} \right]}, \quad (14)$$

где $c_{\tau H2}^{\text{треб}}$ – требуемое значение коэффициента вариации потока с гиперэкспоненциальным распределением

- 2) для вероятностей p_1 и p_2 поступления заявок первой второй экспоненциальных фаз гиперэкспоненциального потока

$$p_1 \leq \frac{2K}{1 + (c_{\tau H2}^{\text{треб}})^2}, \quad (15)$$

$$p_2 = 1 - p_1, \quad (16)$$

где $K \in (0; 1)$ – параметр, определяющий значения вероятностей поступления заявок первой p_1 и второй p_2 экспоненциальных фаз. При проведении моделирования параметр K был выбран равным $K=0,9$;

- 3) значение МОЖ интервала времени между поступлением заявок потока с гиперэкспоненциальным распределением равно значению МОЖ интервала времени между поступлением заявок потока с Парето-распределением $m_{\tau H2}^{\text{треб}} = m_{\tau \text{ пар}}^{\text{ан}}$, где $m_{\tau \text{ пар}}^{\text{ан}}$ вычисляется согласно выражению (3).

Пример расчета входных параметров $\lambda_1, \lambda_2, p_1, p_2$ (по выражениям 13, 14, 15, 16) для проведения имитационного моделирования обслуживания трафика $H_2/M/1$ со значениями коэффициента вариации $c_{\tau H2}^{\text{треб}}=23,6$ и МОЖ интервала времени между поступлением заявок потока с гиперэкспоненциальным распределением $m_{\tau H2}^{\text{треб}}=1,111$, который выполнен в программной среде MathCAD, представлен в приложении 4.

Выводы

В результате проведенного имитационного моделирования обслуживания трафика со сложной структурой с использованием моделей систем массового обслуживания с входными потоками с Парето - $Pa/M/1$ и гиперэкспоненциальным $H_2/M/1$ распределениями были получены оценки качества обслуживания такого трафика по показателю времени задержки заявки в системе, нормированные к значениям времени задержки потока с экспоненциальным распределением $T_{\text{зад пар}}/T_{\text{зад exp}}$. В качестве критерия структурной сложности моделей трафика использовался коэффициент вариации c_{τ} интервала времени между очередными заявками. При проведении моделирования трафика со сложной структурой коэффициент вариации потоков принимал значения $c_{\tau} \in [1,62; 23,6]$, рассматриваемый диапазон загрузки узлового оборудования $\rho \in [0,1; 0,9]$.

Чтобы получить адекватные количественные оценки по показателю времени задержки $T_{\text{зад}}$ пакета в системе для моделей $Pa/M/1, H_2/M/1$ необходимо, чтобы выполнялись несколько условий:

- 1) значения МОЖ и коэффициентов вариации интервалов времени между поступлением очередных заявок потоков с Парето- и гиперэкспоненциальным распределениями должны иметь равные значения $m_{\tau \text{ пар}}^{\text{им}} = m_{\tau \text{ H2}}^{\text{им}}$, $c_{\tau \text{ пар}}^{\text{им}} = c_{\tau \text{ H2}}^{\text{им}}$. При этом для потока с распределением Парето значение МОЖ $m_{\tau \text{ пар}}^{\text{им}}$ определяется значениями параметра α и коэффициента k . Для потока с гиперэкспоненциальным распределением значения МОЖ $m_{\tau \text{ H2}}^{\text{им}}$ и коэффициента вариации $c_{\tau \text{ H2}}$ рассчитываются в программе (приложение 4). Однако в исследуемом диапазоне значений параметров $\alpha \in [1,2; 2]$, $k \in [0,1; 1]$ потока с Парето-распределением возникают такие моменты, что при некоторых комбинациях $\{\alpha; k\}$ значения МОЖ $m_{\tau \text{ пар}}^{\text{им}}$ потока с распределением Парето имеют одинаковые значения. Значения коэффициента вариации $c_{\tau \text{ пар}}$ при этом различны;
- 2) время обработки заявки в устройстве обслуживания $T_{\text{обсл}} = 1/\mu = 1$;
- 3) объем буфера $Q = \infty$.

В процессе исследования модели $Pa/M/1$ было определено, что:

- 1) своевременность обслуживания трафика со сложной структурой в узлах СС по показателю времени задержки $T_{\text{зад}}$ в большей степени зависит от загрузки ρ узлового оборудования (табл. 7);
- 2) получена функция аппроксимации значений параметра формы $\alpha \in [1,2; 2]$ при различной загрузке $\rho \in [0,1; 0,9]$ устройства обслуживания, в которых происходит резкое снижение своевременности обслуживания трафика со сложной структурой $\alpha_{\text{аппр}}(\rho) = 0,956 + 1,114\rho$ (рис. 12);
- 3) для каждого значения параметра $\alpha \in [1,2; 2]$ существуют такие предельные значения коэффициента масштаба k распределения Парето, при которых происходит перегрузка устройства обслуживания $\rho \rightarrow \infty$ (рис. 8);
- 4) определены три области (рис. 7):
 - область нормального функционирования устройства обслуживания D_1 ;
 - область загрузки устройства обслуживания D_2 ;
 - область перегрузки D_3 устройства обслуживания, в которых отношение времен задержек $T_{\text{зад пар}}/T_{\text{зад exp}}$ заявок потоков с Парето- и экспоненциальным распределениями имеет значения $T_{\text{зад пар}}/T_{\text{зад exp}} \in (0,55; 1,2)$. Определение данных областей реализовано в более общей работе автора о возможном преобразовании распределения трафика для снижения его структурной сложности [25].

При исследовании имитационной модели $H_2/M/1$ обслуживания потока с гиперэкспоненциальным распределением получена количественная оценка уровня снижения своевременности обслуживания относительно потоков

с Парето- и с экспоненциальным распределениями. Получены оценки уровня снижения своевременности обслуживания по показателю времени задержки $T_{\text{зад}}$ в зависимости от уровня загрузки ρ устройства обслуживания и от значения коэффициента вариации c_t (табл. 8).

На основе полученных данных имитационного моделирования можно сделать вывод о том, что своевременность обслуживания в узлах СС трафика с распределением Парето по показателю времени задержки $T_{\text{зад}}$ при повышении загрузки узлового оборудования сети связи от 0,1 до 0,9 и значении коэффициента вариации интервала времени между пакетами трафика, равному 6 – снижается в 4,5 раза, а при значении коэффициента вариации, равному 23,6 – снижается в 539 раз по сравнению с обслуживанием экспоненциального трафика. Для гиперэкспоненциального распределения при тех же значениях загрузки сети связи от 0,1 до 0,9 и значении коэффициента вариации интервала времени между пакетами трафика, равному 6 – своевременность обслуживания снижается в 332 раза, а при значении коэффициента вариации, равному 23,6 – снижается более чем в 8000 раз по сравнению с обслуживанием экспоненциального трафика (табл. 8).

Таким образом, результаты, которые были получены при проведении моделирования позволяют обосновать перспективные требования к узловому оборудованию СС для повышения своевременности обслуживания трафика со сложной структурой, циркулирующего в реальных СС.

Приложение 1.

Программа имитационной модели обслуживания экспоненциального трафика в узле СС

; 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
VrObsl   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.

Программа имитационной модели трафика с распределением Парето

; 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
Alpha    EQU      1.0001        ; Параметр формы распределения Парето
k        EQU      1             ; Коэффициент масштаба распределения Парето
Moj      EQU      (Alpha#k)/(Alpha-1) ; МОЖ распределения Парето
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 трафика Парето

```

GENERATE (k#(Uniform(1,0,1)+1E-6#Uniform(1,0,1)) ^ (-1/Alpha)) ; Генера-
                                         ; тор пакетов трафика с Парето-распределением
                                         ; 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
TERMINATE 1           ; Вывести из системы обслуженный пакет
START 1000000        ; Генерация 1 млн. пакетов

```

Приложение 3.

Программа имитационной модели обслуживания трафика с распределением Парето в узле СС

; 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

```

Приложение 4.

Расчет исходных данных для моделирования трафика сложной структуры

Задание требуемого значения коэффициента вариации интервалов времени между поступлением пакетов трафика сложной структуры

МОЖ трафика H2	Коэффициент вариации	Параметр K
$\lambda_{obsh} := 0.9$		
$t_{obsh_1} := \frac{1}{\lambda_{obsh}} = 1.111$	$c := 23.6$	$K := 0.9$
Вероятность поступления пакетов первой экспоненциальной фазы		Вероятность поступления пакетов второй экспоненциальной фазы
$p_1(c) := \frac{2 \cdot K}{1 + c^2}$		$p_2(c) := 1 - p_1(c)$
МОЖ первой экспоненциальной фазы		МОЖ второй экспоненциальной фазы
$t_1(c) := t_{obsh_1} \cdot \left[1 + \sqrt{\frac{p_2(c) \cdot (c^2 - 1)}{2 \cdot p_1(c)}} \right]$		$t_2(c) := t_{obsh_1} \cdot \left[1 - \sqrt{\frac{p_1(c) \cdot (c^2 - 1)}{2 \cdot p_2(c)}} \right]$
$\lambda_1(c) := \frac{1}{t_1(c)}$		$\lambda_2(c) := \frac{1}{t_2(c)}$
МОЖ трафика сложной структуры		
$t_{moj_1}(c) := (p_1(c) \cdot t_1(c) + p_2(c) \cdot t_2(c))$		
$t_{moj_1}(c) \rightarrow 1.11111111111111119999958$		
Значения исходных данных для моделирования трафика сложной структуры		
$p_1(c) \rightarrow 0.003226037708796329486$	$p_2(c) \rightarrow 0.996773962291203670514$	
$t_1(c) \rightarrow 326.7437198663979019908$	$t_2(c) \rightarrow 0.05720810521439762220534$	

Приложение 5.

Программа имитационной модели гиперэкспоненциального трафика

; Блок описания используемых переменных

```
VrDelta  TABLE  X$Delta,0,1,60 ; Гистограмма распределения значений интервалов
                                         ; времени между пакетами входного трафика
      INITIAL  X$Time,0          ; Установить начальное значение "Time",
                                         ; равным нулю
Ver1      EQU      0.396          ; Значение вероятности p1 1-й экспоненциальной
                                         ; фазы гиперэкспоненциального трафика
Ver2      EQU      (1-Ver1)       ; Значение вероятности p2 2-й экспоненциальной
                                         ; фазы гиперэкспоненциального трафика
T1        EQU      2.79           ; МОЖ интервала времени между очередными
                                         ; пакетами 1-й экспоненциальной фазы
T2        EQU      0.009          ; МОЖ интервалов времени между очередными
                                         ; пакетами 2-й экспоненциальной фазы
Fun       VARIABLE (AC1-X$Time)   ; Функция вычисления значений интервала
                                         ; времени "Delta" между очередными пакетами
                                         ; (разность абсолютного модельного времени
                                         ; и сохраненного значения ячейки "Time")
```

; Имитация работы ключей, формирующих гиперэкспоненциальное распределение

```
      GENERATE , , , 1          ; Генерация одного транзакта, управляющего
                                         ; переключением ключей выбора экспоненц. фазы
Variator  TRANSFER Ver1, Met2, Met1 ; Включение 1-го ключа с вероятностью "Ver1",
                                         ; а второго - с вероятностью "Ver2"
Met1      TRANSFER , Klu1        ; Отправить транзакт на 1-й ключ "Klu1"
Met2      TRANSFER , Klu2        ; Отправить транзакт на 2-й ключ "Klu2"
Klu1      LOGIC S Kluch1         ; Включить ключ 1-й экспоненциальной фазы
      ADVANCE (T1#50)           ; Время нахождения ключа
                                         ; в состоянии «ON» равно (T1#50)
      LOGIC R Kluch1            ; Выключить ключ 1-й экспоненциальной фазы
      TRANSFER , Variator        ; Отправить транзакт на цикл выбора рабочего
                                         ; ключа "Variator"
Klu2      LOGIC S Kluch2         ; Включить ключ 2-й экспоненциальной фазы
      ADVANCE (T2#50)           ; Время нахождения ключа
                                         ; в состоянии «ON» равно (T2#50)
      LOGIC R Kluch2            ; Выключить ключ 2-й экспоненциальной фазы
      TRANSFER , Variator        ; Отправить транзакт на цикл выбора рабочего
                                         ; ключа "Variator"
```

; Имитация работы экспоненциальных фаз

```
      GENERATE (Exponential(1,0,T1)) ; Трафик 1-й экспоненциальной фазы
                                         ; с МОЖ интервала времени между поступлением
                                         ; пакетов, равным T1
      GATE LS Kluch1, Met10       ; Проверка на предмет определения состояния
                                         ; 1-го ключа (если "ON" - переход к следующей
                                         ; строчке программы, "OFF" -переход на Met10)
      TRANSFER , Met20           ; Отправка пакета на Met20
      GENERATE (Exponential(29,0,T2)) ; Трафик 2-й экспоненциальной фазы
                                         ; с МОЖ интервалов времени между поступлением
                                         ; пакетов, равным T2
      GATE LS Kluch2, Met10       ; Проверка на предмет определения состояния
                                         ; 2-го ключа (если "ON" - переход к следующей
                                         ; строчке программы, "OFF" -переход на Met10)
      TRANSFER , Met20           ; Отправка пакета на Met20
```

; Накопление статистики

```
Met20     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
Met10     TERMINATE 1            ; Вывести из системы обслуженный пакет
      TERMINATE                 ; Вывести из системы необслуженный пакет
      START 1000000             ; Генерация 1 млн. пакетов
```

Приложение 6.

Программа имитационной модели обслуживания гиперэкспоненциального трафика в узле СС

; Блок описания используемых переменных

```
VrDelta  TABLE  X$Delta,0,1,60 ; Гистограмма распределения значений интервалов
                                           ; времени между пакетами входного трафика
                                           ; Установить начальное значение "Time",
                                           ; равным нулю
VrObs1   TABLE  MP2,0,20,35 ; Гистограмма распределения значений интервалов
                                           ; времени обслуживания пакетов входного трафика
Ver1      EQU     0.396 ; Значение вероятности p1 1-й экспоненциальной
                                           ; фазы гиперэкспоненциального трафика
Ver2      EQU     (1-Ver1) ; Значение вероятности p2 2-й экспоненциальной
                                           ; фазы гиперэкспоненциального трафика
T1        EQU     2.79 ; МОЖ интервала времени между очередными
                                           ; пакетами 1-й экспоненциальной фазы
T2        EQU     0.009 ; МОЖ интервалов времени между очередными
                                           ; пакетами 2-й экспоненциальной фазы
T_obs1    EQU     1 ; Среднее время обслуживания пакета
                                           ; в устройстве "OKU"
Fun       VARIABLE (AC1-X$Time) ; Функция вычисления значений интервала
                                           ; времени "Delta" между очередными пакетами
                                           ; (разность абсолютного модельного времени
                                           ; и сохраненного значения ячейки "Time")
```

; Имитация работы ключей, формирующих гиперэкспоненциальное распределение

```
GENERATE , , , 1 ; Генерация одного транзакта, управляющего
                                           ; переключением ключей выбора экспоненц. фазы
Variator  TRANSFER Ver1, Met2, Met1 ; Включение 1-го ключа с вероятностью "Ver1",
                                           ; а второго - с вероятностью "Ver2"
Met1      TRANSFER, Klu1 ; Отправить транзакт на 1-й ключ "Klu1"
Met2      TRANSFER, Klu2 ; Отправить транзакт на 2-й ключ "Klu2"
Klu1      LOGIC S Kluch1 ; Включить ключ 1-й экспоненциальной фазы
ADVANCE (T1#50) ; Время нахождения ключа
                                           ; в состоянии «ON» равно (T1#50)
LOGIC R Kluch1 ; Выключить ключ 1-й экспоненциальной фазы
TRANSFER, Variator ; Отправить транзакт на цикл выбора рабочего
                                           ; ключа "Variator"
Klu2      LOGIC S Kluch2 ; Включить ключ 2-й экспоненциальной фазы
ADVANCE (T2#50) ; Время нахождения ключа
                                           ; в состоянии «ON» равно (T2#50)
LOGIC R Kluch2 ; Выключить ключ 2-й экспоненциальной фазы
TRANSFER, Variator ; Отправить транзакт на цикл выбора рабочего
                                           ; ключа "Variator"
```

; Имитация работы экспоненциальных фаз

```
GENERATE (Exponential(1,0,T1)) ; Трафик 1-й экспоненциальной фазы
                                           ; с МОЖ интервала времени между поступлением
                                           ; пакетов, равным T1
GATE LS Kluch1, Met10 ; Проверка на предмет определения состояния
                                           ; 1-го ключа (если "ON" - переход к следующей
                                           ; строчке программы, "OFF" - переход на Met10)
TRANSFER, Met20 ; Отправка пакета на Met20
GENERATE (Exponential(29,0,T2)) ; Трафик 2-й экспоненциальной фазы
                                           ; с МОЖ интервалов времени между поступлением
                                           ; пакетов, равным T2
GATE LS Kluch2, Met10 ; Проверка на предмет определения состояния
                                           ; 2-го ключа (если "ON" - переход к следующей
                                           ; строчке программы, "OFF" - переход на Met10)
TRANSFER, Met20 ; Отправка пакета на Met20
```

; Накопление статистики

```
Met20     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
Met10     TERMINATE    ; Вывести из системы необслуженный пакет
START 1000000         ; Обслужить 1 млн. пакетов

```

Литература

1. 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.
2. 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.
3. Бахарева Н. Ф., Ушаков Ю. А. Управление нагрузкой на сети ЭВМ распознаванием и моделированием трафика // Инфокоммуникационные технологии. 2008. Т. 6. № 3. С. 56-62.
4. 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.
5. Макаренко С. И. Анализ математических моделей информационных потоков общего вида и степени их соответствия трафику сетей интегрального обслуживания // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 8. С. 28-35.
6. Макаренко С. И. Преднамеренное формирование информационного потока сложной структуры за счет внедрения в систему связи дополнительного имитационного трафика // Вопросы кибербезопасности. 2014. № 3 (4). С. 7-13.
7. Алиев Т. И. Основы моделирования дискретных систем. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 363 с.
8. 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.
9. 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.
10. 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.

11. 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: 30.10.2015).
12. Будко П. А., Рисман О. В. Многоуровневый синтез информационно-телекоммуникационных систем. Математические модели и методы оптимизации: Монография. – СПб.: ВАС, 2011. – 476 с.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. Маколкина М. А. Разработка и исследование моделей оценки качества передачи видео в IP-сетях: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.13. – СПб., 2014. – 187 с.
17. Петров В. В. Структура телетрафика и алгоритм обеспечения качества обслуживания при влиянии эффекта самоподобия: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.13. — М.: Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», 2004. — 199 с.
18. Нейман В. И. Самоподобные процессы и их применение в теории телетрафика // Труды Международной академии связи. 1999. № 1 (9). С. 11-15.
19. Шелухин О. И., Тенякишев А. М., Осин А. В. Фрактальные процессы в телекоммуникациях. Монография / Под ред. О. И. Шелухина. – М.: Радиотехника, 2003. – 480 с.
20. Шелухин О. И., Осин А. В., Смольский С. М. Самоподобие и фракталы. Телекоммуникационные приложения / Под ред. О. И. Шелухина. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 368 с.
21. Шелухин О. И., Лукьянцев Д. А. Многоуровневая ON/OFF модель интернет-трафика корпоративной сети спутниковой связи // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2006. Т. 2. № 2. С. 59-64.
22. Кучук Г. А., Можаяев А. А. Прогнозирование трафика для управления перегрузками интегрированной телекоммуникационной сети // Радиоэлектронные и компьютерные системы. 2007. № 8 (27). С. 261-271.
23. Благоев А. В., Привалов А. Ю. Модификации моделей типа «входная $M/G/\infty$ » и «On-Off источники» для имитационного моделирования самоподобного телекоммуникационного трафика // Труды МАИ. 2010. № 39. С. 1-15. URL: <https://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=14802> (дата обращения: 30.10.2015).
24. Ушанев К. В. Имитационная модель формирования трафика сложной структуры // Информационные технологии моделирования и управления. 2014. № 3 (87). С. 263-272.

25. Ушанев К. В., Макаренко С. И. Преобразование структуры трафика с учетом требований по качеству его обслуживания // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2015. № 2. С. 74-84.

References

1. Bakhareva N. F., Kartashevskii I. V., Tarasov V. N. Analiz i raschet nepuassonovskikh modelei trafika v setiakh EVM [The Analysis and Calculation of Not-Poisson Traffic Models in Computer Networks]. *Infokommunikacionnye Tehnologii*, 2009, vol. 7, no. 4, pp. 61-66 (in Russian).
2. Bakhareva N. F., Tarasov V. N., Ushakov U. A. Obobshchennaia dvumernaia diffuzionnaia model' massovogo obsluzhivaniia tipa $GI/G/1$ [The Generalized Two-Dimensional Diffusion Waiting Line Model of Type $GI/G/1$]. *Telecommunications*, 2009, no. 7, pp. 2-8 (in Russian).
3. Bakhareva N. F., Ushakov U. A. Upravlenie nagruzkoj na seti EVM raspoznavaniem i modelirovaniem trafika [Load Control of the Computer Network with Recognition and Simulation of Traffic]. *Infokommunikacionnye Tehnologii*, 2008, vol. 6, no. 3, pp. 56-62 (in Russian).
4. Tarasov V. N., Bakhareva N. F., Gorelov G. A. Matematicheskaja model' trafika s tiazhelokhlostnym raspredeleniem na osnove sistemy massovogo obsluzhivaniia $N_2/M/1$ [The Mathematical Model of Traffic with Heavy Tail Distribution on the Basis of Queuing System Type of $N_2/M/1$]. *Infokommunikacionnye Tehnologii*, 2014, vol. 12, no. 3, pp. 36-41 (in Russian).
5. Makarenko S. I. Analyzing of Mathematical Models of General Type Data Streams and Degree of Their Conformity to Integral Service Net Traffic. *Voronezh State Technical University*, 2012, vol. 8, no. 8, pp. 28-35 (in Russian).
6. Makarenko S. I. Premeditated Formation of the Traffic of Difficult Structure Due to Implementation in the Communication System of Additional Imitative Traffic. *Voprosy kiberbezopasnosti*, 2014, vol. 4, no. 3, pp. 7-13 (in Russian).
7. 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).
8. 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*, 2013, no. 8, pp. 54-60 (in Russian).
9. 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, State Academy of Consumer Services, 2005. 164 p. (in Russian).
10. 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).

11. Kuchuk G. A. Uchet fraktal'nykh svoistv 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 1st International Scientific and Technical Conference "Infotelecommunication Technologies in a Science, Manufacture and Formation"]. Available at: <http://www.selfsimilar.narod.ru/kuchuk1.pdf> (accessed 30 October 2015) (in Russian).

12. Budko P. A., Risman O. V. *Mnogourovnevij sintez informacionno-telekommunikacionnykh sistem. Matematicheskie modeli i metody optimizatsii* [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).

13. Ageev D. V., Ignatenko A. A., Kopylev A. V. Metodika opredeleniia parametrov potokov na raznykh uchastkakh mul'tiservisnoi telekommunikatsionnoi seti s uchetom effekta samopodobiia [Technique of Determination of Parameters of Streams on Different Sites of a Multiservice Telecommunication Network taking into Account Effect of Self-Similarity]. *Problems of telecommunications*, 2011, vol. 5, no. 3, pp. 18-37 (in Russian).

14. Fedorova M. L., Ledeneva T. M. Ob issledovanii svoistva samopodobiia trafika mul'tiservisnoi seti [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).

15. 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).

16. 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).

17. Petrov V. V. *Struktura teletrafika i algoritm obespecheniia kachestva obsluzhivaniia pri vliianii effekta 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).

18. Neiman V. I. Samopodobnye protsessy i ikh primenenie v teorii teletrafika [Self-Similar Processes and their Application in the Teletraffic Theory]. *Trudi Mezhdunarodnoj akademii svyazi*, 1999, vol. 9, no. 1, pp. 11-15 (in Russian).

19. Sheluhin O. I., Tenyakishev A. M., Osin A. V. *Fraktal'nye protsessy v telekommunikatsiiakh. Monografija* [Fractal Processes in Telecommunications. Treatise]. Moscow, Radioengineering Publ., 2003. 480 p. (in Russian).

20. Sheluhin O. I., Osin A. V., Smolskij S. M. *Samopodobie i fraktaly. Telekommunikatsionnye prilozheniia* [Self-Similarity and Fractals. Telecommunication Applications]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2008. 368 p. (in Russian).
21. Sheluhin O. I., Lukyantsev D. A. *Mnogourovnevaia ON/OFF model' internet-trafika korporativnoi seti sputnikovoi sviazi* [Multi-Level ON/OFF Model of Internet Traffic of Corporate Satellite Network]. *Electrical and data processing facilities and systems*, 2006, vol. 2, no. 2, pp. 59-64 (in Russian).
22. Kuchuk G. A., Mozhaev A. A. *Prognozirovaniie trafika dlia upravleniia peregruzkami integrirovannoi telekommunikatsionnoi seti* [Predicting traffic congestion management integrated telecommunications network]. *Electronic and computer systems*, 2007, vol. 27, no. 8, pp. 261-271 (in Russian).
23. Blagov A. V., Privalov A. U. *Modifikatsii modelei tipa "vkhodnaia M/G/∞" i "On-Off istochniki" dlia imitatsionnogo modelirovaniia samopodobnogo telekommunikatsionnogo trafika* [Modification of the model of the "input M/G/∞" and "On-Off sources" for the simulation of self-similar telecommunication traffic]. *Trudy MAI*, 2010, no. 39, pp. 1-15. Available at: <https://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=14802> (accessed 30 October 2015) (in Russian).
24. Ushanev K. V. *Imitatsionnaia model' formirovaniia trafika slozhnoi struktury* [Imitating Model of Formation of a Traffic with Structural Complicatedity]. *Informatsionnye tekhnologii modelirovaniia i upravleniia*, 2014, vol. 87, no. 3, pp. 263-272 (in Russian).
25. Ushanev K. V., Makarenko S. I. *Preobrazovanie struktury trafika s uchetom trebovaniia po kachestvu ego obsluzhivaniia* [Transformation of the Traffic Structure Considering Requirements on Quality of its Service]. *Radio and telecommunication systems*, 2015, no. 2, pp. 74-84 (in Russian).

Статья поступила 19 ноября 2015 г.

Информация об авторе

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

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

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

K. V. Ushanev

Problem statement: currently share growth of multimedia traffic in communication networks, as well as the need to ensure the requirements of consumers of telecommunications services, makes the question of quality of service traffic at the nodes of the complicated structure of networks. **The purpose** is to estimate the delay of packets at the nodes of the communications network serving the complicated structure of the traffic based on the developed simulation model. As a criterion of the complicatedity of the traffic using the coefficient of variation interval between successive packets. As a model of a complicated structure traffic streams are used having Hyperexponential Pareto distribution and a wide range of variation of the input parameters and load level nodal network equipment. **The methods used:** model node equipment formalized on the basis of scientific-methodological apparatus of queuing theory and implemented in a software environment simulation GPSS World. **The novelty** of this work is to measure the quality of service traffic complicated structure in terms of delay in servicing equipment units in the network, resulting study developed simulation models of traffic service and Pareto hyperexponential distribution in a wide range of variation of the input parameters. **The results:** Based on data obtained from studies of simulation models of traffic service type $Pa/M/1$, $H_2/M/1$, it is determined that timely traffic service with a complicated structure in communication nodes in terms of time delay depends essentially on the load node equipment. In the study of the simulation model of service traffic distribution Pareto $Pa/M/1$, it was found that the coefficient of variation interval between successive applications of such traffic has an exponential dependence on the values of the shape parameter Pareto distribution. Also, for a given range of flow parameters with a Pareto distribution, determining the load control devices (at a fixed time of service), characterized by three areas in which the delay time of the flow of applications to the Pareto distribution of matter: more than the delay time for the flow to an exponential distribution; less than the delay time for the stream with an exponential distribution; practically equal to the values of time delay for a flow with an exponential distribution. It is also defined the criteria for selecting each of the areas. The limiting values of the scale for the flow of a Pareto distribution, which lead to an overload device maintenance. In the study of the simulation model of $H_2/M/1$ to quantify the level of reduction of timeliness flow hyperexponential distribution with respect to the flow Pareto distribution and exponential distribution. Estimations of reducing the level of service in terms of the timeliness of the delay time depending on the download service and the device on the value of the coefficient of variation. Based on the simulation data concluded that the timeliness of service nodes in communication networks with complicated structure Traffic Pareto distribution in terms of the delay time is reduced. At higher loading equipment nodal network to 0.9 and increase the coefficient of variation of the interval time between packets to 23.6 timely maintenance reduced to 539 times as compared with the exponential service traffic. Hyperexponential distribution for the same values of load network and the coefficient of variation is reduced to timely servicing of 8000 times in comparison with the exponential service traffic. **Practical significance:** A simulation model and obtained during the simulation results allow to justify the long-term requirements for the speed of communication networks equipment units, which later will ensure timely service complicated structure traffic.

Keywords: communication network, simulation, quality of service, Hurst coefficient, the coefficient of variation, the property of self-similarity properties of fractal.

Information about Author

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

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