

---

---

**ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ  
И ИДЕНТИФИКАЦИЯ**

---

---

УДК 519.872

**О ВЫБОРЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
ПОТОКАМИ ЗАЯВОК С ПОМОЩЬЮ ВЕРОЯТНОСТНОГО  
ВЫТАЛКИВАЮЩЕГО МЕХАНИЗМА**

© 2021 г. В. С. Заборовский<sup>а,\*</sup>, О. И. Заяц<sup>а,\*\*</sup>, А. С. Ильяшенко<sup>а</sup>, В. А. Мулюха<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

\*e-mail: vlad@neva.ru

\*\*e-mail: zayoleg@gmail.com

Поступила в редакцию 24.04.2020 г.

После доработки 01.07.2020 г.

Принята к публикации 28.09.2020 г.

Телематическое устройство моделируется в виде двухпоточковой марковской одноканальной приоритетной системы массового обслуживания конечной емкости, снабженной вероятностным выталкивающим механизмом. Его вероятность выталкивания  $0 \leq \alpha \leq 1$  является параметром управления системы массового обслуживания. Экспериментально и теоретически доказывается, что на плоскости коэффициентов загрузки по высокоприоритетному и низкоприоритетному трафику существуют такие области, внутри которых каждая из вероятностей потери зависит от параметра  $\alpha$  линейным образом. Форма этих областей линейности детально изучается для случая абсолютного и относительного приоритета, для каждого из которых построены границы применимости линейного закона потерь. Получено оптимальное значение вероятности выталкивания  $\alpha$  по критерию минимума вероятности потери высокоприоритетных требований при условии ограничения на вероятность потери низкоприоритетных заявок. Описанным методом осуществлялось удаленное управление робототехническими устройствами в условиях космического эксперимента “Контур” на борту Международной космической станции.

DOI: 10.31857/S0002338821010133

**Введение.** Под телематическим устройством далее будет пониматься любое устройство, работающее в сетевой среде, пропускающее через себя потоки сетевых пакетов и осуществляющее ту или иную их обработку (например, коммутацию или фильтрацию). Типичными примерами универсальных устройств такого рода могут служить межсетевые экраны или маршрутизаторы, причем как магистральные, так и периферийные. Между тем во многих прикладных задачах сетевой инженерии возникает необходимость изучения и более специальных образцов устройств телематики. Излагаемые в настоящей статье методы и алгоритмы первоначально предназначались для расчета телематических устройств, задействованных в серии космических экспериментов “Контур”, которые посвящены управлению робототехническими комплексами на борту Международной космической станции (МКС) [1]. Тем не менее, методы эти могут быть полезны и в более широком классе сетевых задач, которые хотя и отличаются по своему физическому содержанию от задач космической робототехники, но имеют сходное математическое описание. Речь идет, например, об обработке информационных потоков, возникающих при управлении движением летательных аппаратов, при автоматическом беспилотном вождении автотранспорта и других аналогичных упомянутым выше задачам.

Применяемые в инженерной практике сетевые технологии чрезвычайно разнообразны [2], причем они заметно опережают в своем развитии и практическом внедрении разработку соответствующих аналитических моделей и их теоретическое обоснование.

Хорошо известно, что основной аналитический метод исследования телематических устройств в настоящее время базируется на их трактовке как специфических систем массового обслуживания (СМО) [3, 4]. Требуемые для адекватного описания реального процесса обработки сетевых пакетов в таких системах модели СМО достаточно сложны и должны удовлетворять ряду общих ограничений.

Важнейшее из них состоит в том, что используемые при описании телематических устройств модели СМО должны быть многопоточными [5]. Дело в том, что суммарный поток на входе реально существующих телематических устройств, как правило, формируется несколькими независимыми источниками информации. Составляющие этого потока могут различаться по многим признакам: по скорости передачи через каналы связи, пропускной способности используемых виртуальных соединений, алгоритмам обработки в узлах коммутации, доступному объему буферной памяти, допустимому уровню потерь, способам защиты информации и целому ряду других свойств, подобных перечисленным выше.

Число таких маргинальных потоков в суммарном входящем информационном потоке телематического устройства, вообще говоря, может быть произвольным и зависит как от конкретного физического содержания решаемой сетевой задачи, так и от точности выбранной математической модели. В настоящей статье мы ограничимся простейшей моделью, включающей два потока. Так, например, в упомянутой выше задаче управления роботами на борту МКС [1] роль высокоприоритетного потока играл поток пакетов команд управления роботом и данных телеметрии, а роль низкоприоритетного потока – поток пакетов, фоновое видеопотка, обеспечивающего саму возможность визуального наблюдения за происходящим на борту МКС.

Введение приоритетов между маргинальными потоками здесь является принципиально важным моментом при постановке задачи и моделирует реально применяемые алгоритмы диспетчеризации телематических устройств. Приоритет определенного вида запросов означает их предпочтение при обслуживании. Существует множество разновидностей приоритетов, основными из которых являются абсолютный и относительный [6, 7]. При абсолютном приоритете вновь поступившие высокоприоритетные требования прерывают обслуживание низкоприоритетных и вытесняют их с канала обслуживания. Относительный приоритет всего лишь ставит высокоприоритетные требования первыми в очередь на обслуживание, не прерывая при этом обработку низкоприоритетных запросов.

Приоритет в обслуживании часто дополняют введением выталкивающего механизма. Подробнее всего изучен детерминированный выталкивающий механизм [8]. Он означает, что вновь подошедшее высокоприоритетное требование всегда будет выталкивать низкоприоритетное из буфера, когда тот переполнен. Такой механизм порождает дилемму: если включить, то в буфере начнут преобладать высокоприоритетные требования, а если выключить, то там станут превалировать низкоприоритетные запросы. Между тем для эффективной работы телематического устройства необходим надлежащий баланс тех и других [5].

Для его достижения был предложен вероятностный (или рандомизированный) выталкивающий механизм, при котором выталкивание низкоприоритетных требований из накопителя происходит по случайному закону с некоторой заданной вероятностью  $\alpha \in [0, 1]$ . Последняя играет роль параметра управления и служит для тонкой настройки телематического устройства.

Впервые такой выталкивающий механизм был предложен в [9, 10]. В указанных работах он был реализован применительно к двухпоточковой марковской одноканальной СМО с относительным приоритетом. Авторы настоящей статьи ранее решили аналогичную задачу для случая абсолютного приоритета, характерного именно для задач управления сложными техническими системами, передающими информацию о своем состоянии через сетевую среду [11, 12]. Здесь следует отметить, что теория приоритетных СМО с вероятностным выталкивающим механизмом в последние годы существенно продвинулась вперед в плане усложнения моделей рассматриваемых систем. Были изучены более сложные разновидности приоритета, например чередующийся [13] и рандомизированный [14], учтен фактор повторных требований [15–18], а также возможность наличия отрицательных требований [19]. Все это позволяет при необходимости строго и корректно описать именно те алгоритмы диспетчеризации телематических устройств, которые требуются по самому смыслу решаемой сетевой задачи.

В задачах телематики особый интерес представляет расчет вероятностей потерь. В работах [9–12] был открыт интересный и практически значимый эффект. При некоторых значениях коэффициентов загрузки СМО по высокоприоритетному и низкоприоритетному трафику зависимость вероятностей потери от параметра выталкивания  $\alpha$  оказалась близка к линейной. Это явление получило наименование “линейного закона потерь” и нашло экспериментальное подтверждение. Знание областей линейности позволяет рационально выбрать благоприятные режимы загрузки, в которых управление пакетными коммутациями существенно упрощается и ускоряется, причем в реальном времени.

Настоящая статья посвящена построению границ применимости линейного закона потерь для двухпоточковой марковской одноканальной СМО с абсолютным приоритетом [11, 12], имею-

щей, согласно классификации [8], сокращенное обозначение  $\overline{M}_2/M/1/k/f_2^1$ . Именно эта модель послужила в качестве исходной и базовой для всего цикла работ, посвященных управлению роботами на МКС. Она же представляет наибольший интерес в тех задачах, где требуется обеспечить максимальные преимущества высокоприоритетному потоку информации.

**1. Описание модели системы массового обслуживания.** Рассмотрим двухпотокую СМО конечной емкости  $k$  следующего вида. Пусть  $\mu$  обозначает интенсивность обслуживания,  $\lambda_i$  – интенсивность  $i$ -го маргинального потока, а  $\rho_i = \lambda_i/\mu$  – коэффициент загрузки по этому потоку при  $i = 1, 2$ . Состояние СМО будем характеризовать фазовым вектором  $\overline{N} = \{N_1, N_2\}$ , причем  $N_1$  – число требований первого типа, а  $N_2$  – число требований второго типа в системе. Финальные вероятности  $P(N_1 = i, N_2 = j)$  будем обозначать через  $P_{i,j}$  при  $i = \overline{0, k}, j = \overline{0, k - i}$ , так что суммарное число требований в системе  $N_1 + N_2$  не превосходит ее емкости  $k$ . Вероятность потери требования  $l$ -го типа запишем как  $P_{\text{пот}}^{(l)}$ , где  $l = \overline{1, 2}$ . Приоритетным будем считать первый поток. Задача заключается в том, чтобы на плоскости загрузочных коэффициентов  $(\rho_1, \rho_2)$  найти те области, в пределах которых зависимость  $P_{\text{пот}}^{(1)}$  и  $P_{\text{пот}}^{(2)}$  от параметра  $\alpha$  будет близка к линейной. Авторы работ [4, 5] высказали гипотезу, что это возможно только в слабозагруженной сети, когда значения  $\rho_i$  невелики. В действительности картина областей линейности оказывается гораздо более сложной.

При построении границ действия линейного закона потерь воспользуемся методом [11, 12]. Результаты применения указанного метода представим в наиболее общем и универсальном виде, изложив их в форме соответствующих теорем.

**Т е о р е м а 1.** Вероятности  $P_{i,j}$  удовлетворяют системе линейных уравнений

$$\begin{aligned}
 & -\{(\rho_1 + \rho_2)(1 - \delta_{j,k-i}) + [\alpha(1 - \delta_{j,k}) + (1 - \alpha)\delta_{i,0}]\delta_{j,k-i} + (1 - \delta_{i,0})(1 - \delta_{j,0})\} P_{i,j} + \\
 & + \rho_1 P_{i-1,j} + P_{i+1,j} + \rho_2 P_{i,j-1} + \delta_{i,0} P_{i,j+1} + \rho_1 \delta_{j,k-i} [\alpha + (1 - \alpha)\delta_{i,1}] P_{i-1,j+1} = 0, \\
 & i = \overline{0, k}, \quad j = \overline{0, k - i},
 \end{aligned} \tag{1.1}$$

где  $\delta_{i,j}$  – дельта-символ Кронекера, а  $k$  – емкость накопителя системы.

Для реальных значений  $k$  найти  $P_{i,j}$  непосредственно из системы (1.1) затруднительно. С ростом  $k$  быстро растет ее порядок, равный  $(k + 1)(k + 2)/2$ , а также погрешность вычислений. Последняя максимальна для вероятностей  $P_{i,j}$  с наибольшим суммарным индексом  $i + j = k$ , которые как раз и определяют вероятности потери.

**2. Метод производящих функций.** Удобнее решать задачу методом производящих функций [5, 9–12]. Используя уравнения (1.1), производящая функция вероятностей  $P_{i,j}$

$$G_k(u, v) = \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^{k-i} P_{i,j} u^i v^j \tag{2.1}$$

может быть преобразована к некоторому специальному дробно-полиномиальному виду, задаваемому следующей теоремой.

**Т е о р е м а 2.** Производящая функция (2.1) представима в виде дроби

$$G_k(u, v) = \frac{R_{k+2}(u, v)}{R_2(u, v)}, \tag{2.2}$$

числитель и знаменатель которой таковы:

$$\begin{aligned}
 R_{k+2}(u, v) = & (u - v)[G_k(0, v) - \alpha \rho_1 u^{k+1} P_{k,0} + (1 - \alpha) \rho_1 v^k u P_{0,k}] + u(v - 1)G_k(0, 0) + \\
 & + [\alpha \rho_1(u - v) + \rho_1(1 - u)v + \rho_2(1 - v)v] u \sum_{i=0}^k P_{i,k-i} u^i v^{k-i},
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

$$R_2(u, v) = v[\rho_1 u(1 - u) + \rho_2 u(1 - v) + (u - 1)], \tag{2.4}$$

причем индексы полиномов указывают на их порядок по аргументу  $u$ .

Знаменатель (2.4) имеет относительно  $u$  два корня, однако они не могут быть полюсами  $G$ . Точно такие же корни должны иметь и числитель дроби (2.3), иначе функция (2.2) не являлась

бы полиномом, как того требует ее определение (2.1). Устраняя полюса так, как это описано в [6, 7], получим

$$G_k(u, v) = R_k(u, v), \quad (2.5)$$

причем полином  $R_k$  содержит только так называемые “опорные” вероятности  $p_i = P_{k-i,i}$ , суммарный индекс которых  $i + j = k$ . Приравнивая коэффициенты при комбинациях степеней вида  $u^{k-i}v^i$  в обеих частях равенства (2.5), получим “укороченную” систему уравнений относительно только опорных вероятностей  $p_i$ , имеющую порядок всего лишь  $k + 1$ . Конкретный вид укороченной системы задается следующим утверждением.

**Т е о р е м а 3.** Вероятности  $p_i$  подчиняются системе линейных уравнений вида

$$\sum_{j=0}^i a_{i,j} p_j - \alpha \sum_{j=1}^{i+1} b_{i,j} p_j - (1 - \alpha) \delta_{i,k-i} p_k = (1 - \rho)(1 - \rho^{k+1})^{-1} \rho^i, \quad i = \overline{0, k}. \quad (2.6)$$

При  $i = k$  коэффициенты (2.6) постоянны, а именно  $a_{k,j} \equiv 1$ ,  $b_{k,j} \equiv 0$ , а при всех остальных значениях индексов  $0 \leq i \leq k - 1$  они выражаются в виде

$$a_{i,j} = \sum_{s=j}^i \rho_1^{\frac{i-k+j-s-1}{2}} \left( c_{k-i-1}^{s-j+1} - \rho_1^2 c_{k-i-2}^{s-j+1} \right) \beta^{s-j}, \quad j = \overline{0, i},$$

$$b_{i,j} = \rho^{\frac{j-k}{2}} c_{k-i-1}^{i-j+2} \beta^{i-j+1}, \quad j = \overline{1, i+1}, \quad (2.7)$$

где  $\beta = -\rho_2 \rho_1^{-1/2}$ ,  $c_i^s = C_i^s(t_0)$ ,  $t_0 = (1 + \rho) \rho_1^{-1/2} / 2$ ,  $\rho = \rho_1 + \rho_2$ , причем  $C_i^s(x)$  обозначает полином Генбауэра порядка  $i$  от аргумента  $x$  с индексом  $s$ .

Искомые вероятности потери выражаются через опорные вероятности  $p_i$ , удовлетворяющие системе (2.8)–(2.9), линейным образом. Эти выражения имеют вид некоторой линейной комбинации опорных вероятностей, коэффициенты которой даются следующей теоремой.

**Т е о р е м а 4.** Вероятности потери требований обоих типов даются выражениями

$$P_{\text{пот}}^{(1)} = p_0 + (1 - \alpha) \sum_{i=1}^{k-1} p_i, \quad (2.8)$$

$$P_{\text{пот}}^{(2)} = (1 - \rho)(1 - \rho^{k+1})^{-1} \rho^k + \alpha \rho_1 \rho_2^{-1} \sum_{i=1}^{k-1} p_i + p_k \rho_1 \rho_2^{-1}. \quad (2.9)$$

**3. Численные результаты.** В процессе исследования рассматриваемой модели СМО были выявлены два практически интересных режима загрузки, при которых ее поведение оказалось качественно различным. Указанные режимы представлены на рис. 1. Эти режимы проявляют себя только при достаточно сильной загрузке системы, которая превышает ее номинальную пропускную способность, т.е. когда суммарная загрузка  $\rho_1 + \rho_2 > 1$ .

Исходя из выражений (2.8), (2.9) видно, что вероятности потери  $Q_{\text{пот}}^{(i)}(\alpha, \rho_1, \rho_2)$  при любом  $k$  зависят от трех параметров. Построим их линейную аппроксимацию по первому параметру  $\alpha$  в следующем виде:

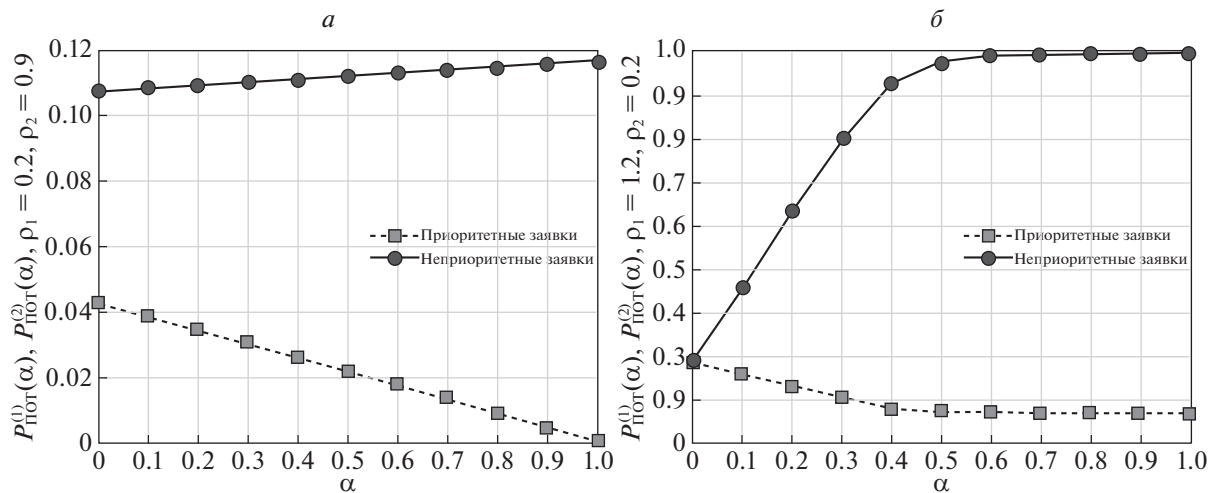
$$Q_{\text{пот}}^{(i)}(\alpha, \rho_1, \rho_2) P = P_{\text{пот}}^{(i)}(0, \rho_1, \rho_2) + \alpha [P_{\text{пот}}^{(i)}(1, \rho_1, \rho_2) - P_{\text{пот}}^{(i)}(0, \rho_1, \rho_2)], \quad i = 1, 2. \quad (3.1)$$

Ее точность будем характеризовать максимумом относительной погрешности по всем допустимым значениям вероятности выталкивания:

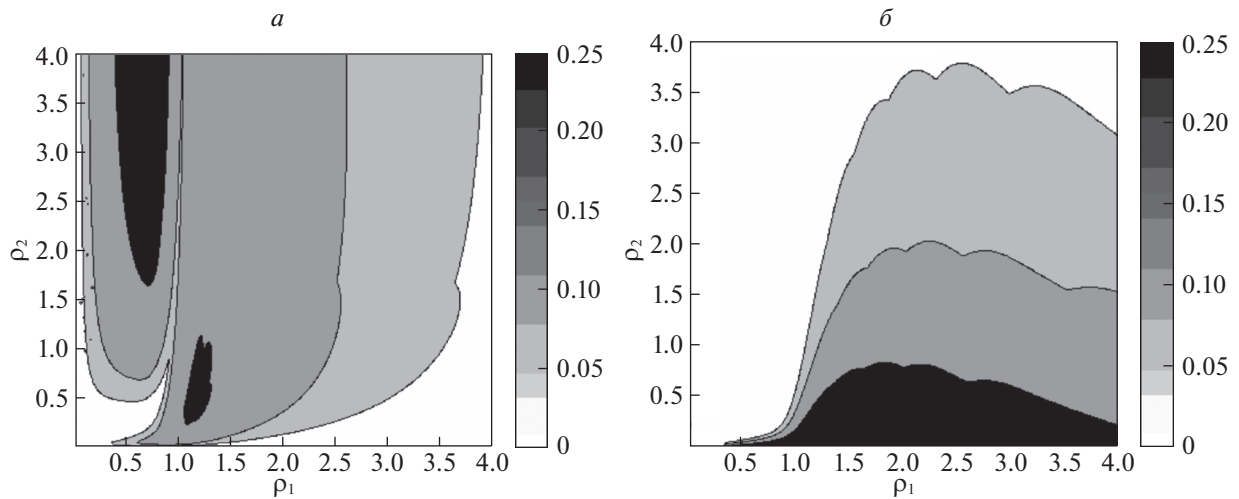
$$\Delta_i(\rho_1, \rho_2) = \max_{0 \leq \alpha \leq 1} |1 - Q_{\text{пот}}^{(i)}(\alpha, \rho_1, \rho_2) / P_{\text{пот}}^{(i)}(0, \rho_1, \rho_2)|, \quad i = 1, 2. \quad (3.2)$$

Тогда проверка линейности закона потерь сведется к построению линий уровня функций  $\Delta_i$  и выявлению тех областей, где погрешность  $\Delta_i < \varepsilon$  (далее примем  $\varepsilon = 0.01$ ).

Линии уровня  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  для системы с абсолютным приоритетом при  $k = 31$  приведены на рис. 2 (области линейности закрашены белым цветом). Для сравнения на рис. 3 построены аналогичные области в случае относительного приоритета [4, 5]. Области линейности не оказываются локализованными вблизи начала координат, как это предполагалось первоначально в



**Рис. 1.** Вероятность потери заявок для системы с абсолютным приоритетом: *a* – при загрузке  $\rho_1 = 0.2, \rho_2 = 0.9$ ; *б* – при загрузке  $\rho_1 = 1.2, \rho_2 = 0.2$



**Рис. 2.** Линии уровня функции  $\Delta_i$  для системы с абсолютным приоритетом: *a* –  $i = 1$ ; *б* –  $i = 2$

работах [5, 9, 10], а вытянуты вдоль координатных осей  $\rho_1$  и  $\rho_2$ . Усиление приоритета с относительного до абсолютного приводит к некоторому их сужению.

Коэффициенты линейной аппроксимации (3.2) можно вычислить аналитически, поскольку как при нулевой, так и при единичной вероятности выталкивания рассматриваемая СМО превращается в классические системы, обладающие известным точным решением. Поэтому в пределах областей линейности анализ потерь пакетов сведется к тривиальным алгебраическим вычислениям. Это кардинально упрощает управление пакетными коммутациями и резко повышает оперативность управления. Описанный метод был применен при решении задач удаленного управления робототехническими комплексами на борту МКС в рамках космического эксперимента “Контур” [1, 5, 11, 12]. В этом эксперименте приоритетный поток был образован пакетами управления и телеметрии, которые передавались с помощью транспортного протокола TCP (transmission control protocol). Фоновый видеопоток составили пакеты по протоколу UDP (user datagram protocol). Был сконструирован специальный прибор, на панель управления которого был выведен регулятор, позволяющий плавно менять вероятность выталкивания. С его помощью оператор стремился достичь надлежащего компромисса между устойчивостью управления роботом, с одной стороны, и качественным, хорошо читаемым видеоизображением, с другой стороны. На основе последнего оператор и принимал свои управленческие решения.

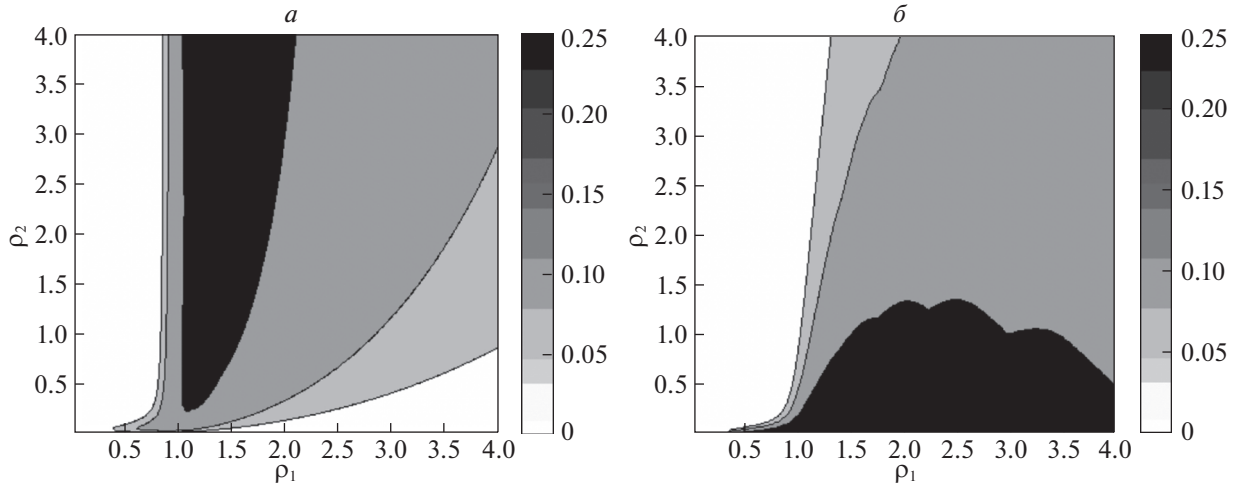


Рис. 3. Линии уровня функции  $\Delta_i$  для системы с относительным приоритетом:  $a - i = 1$ ;  $b - i = 2$

**4. Оптимальная настройка вероятностного выталкивающего механизма.** Введение вероятностного выталкивающего механизма в контур управления телематическим устройством приводит к появлению еще одного дополнительного параметра задачи – вероятности выталкивания  $\alpha$ , которую здесь удобно использовать в качестве параметра управления системой. Процесс принятия оператором решения, касающегося выбора конкретного числового значения  $\alpha$ , можно автоматизировать. Для этого предлагается поставить и решить задачу оптимальной настройки вероятностного выталкивающего механизма. Задача эта заключается в подборе оптимального значения вероятности выталкивания  $\alpha$  при заданных коэффициентах загрузки  $\rho_1$  и  $\rho_2$ , а также заданной емкости системы  $k$ . При этом необходимо ограничить сверху вероятность потерь для низкоприоритетных требований соответствующим критическим значением  $P_{кр}$ . В результате приходим к следующей оптимизационной задаче на условный экстремум:

$$P_{пот}^{(1)}(\alpha; \rho_1, \rho_2) \rightarrow \min_{\alpha}, \quad (4.1)$$

$$P_{пот}^{(2)}(\alpha; \rho_1, \rho_2) \leq P_{кр}. \quad (4.2)$$

Выбор конкретного числового значения вероятности  $P_{кр}$  определяется физическим содержанием решаемой задачи, а также теми инженерными и техническими ограничениями, которые накладываются на функционирование системы. Например, в упоминавшейся выше задаче об управлении роботами на борту МКС [1] появление ограничения (4.2) проистекало из необходимости иметь устойчивую визуальную картину всего происходящего на борту космической станции.

По смыслу решаемой задачи параметр  $P_{кр}$  может принимать произвольные значения из интервала  $(0, 1)$ . Пусть вначале он удовлетворяет неравенству

$$P_{пот}^{(2)}(0; \rho_1, \rho_2) \leq P_{кр} < P_{пот}^{(2)}(1; \rho_1, \rho_2). \quad (4.3)$$

Очевидно, в задаче (4.1), (4.2) целевая функция, а также функция, задающая ограничение (4.2), являются монотонными относительно аргумента  $\alpha$ . Это может быть подтверждено как логически по самому физическому смыслу понятия вероятности выталкивания, так и численно приведенными результатами вычислений (см. рис. 1). Поэтому решение поставленной задачи оптимизации  $\alpha = \alpha_{opt}$ , когда  $P_{кр}$  удовлетворяет (4.3), будет определяться из решения нелинейного уравнения вида

$$P_{пот}^{(2)}(\alpha_{opt}; \rho_1, \rho_2) = P_{кр}. \quad (4.4)$$

Теперь допустим, что заданное по условию критическое значение выходит за пределы интервала (4.3). Если оно превышает его верхнюю границу, т.е.

$$P_{кр} \geq P_{пот}^{(2)}(1; \rho_1, \rho_2), \quad (4.5)$$

то тогда вся кривая потерь низкоприоритетных требований будет лежать ниже уровня  $P_{кр}$  и условие (4.2) будет выполняться автоматически при всех  $\alpha$ . Следовательно, оптимальное значение  $\alpha_{opt} = 1$  и оптимальным будет детерминированный выталкивающий механизм, предложенный Г.П. Башариным [8]. В противном случае, когда  $P_{кр}$  лежит ниже левой границы интервала (4.3) и выполняется условие

$$P_{кр} \leq P_{пот}^{(2)}(0; \rho_1, \rho_2), \quad (4.6)$$

кривая потерь низкоприоритетных требований целиком лежит выше критического уровня и задача (4.1), (4.2), строго говоря, не имеет решения. Здесь нужно либо изменить коэффициенты загрузки, либо, если это допустимо, подкорректировать критический уровень  $P_{кр}$ , увеличив его до левой границы интервала (4.3). При этом  $\alpha_{opt} = 0$ , а оптимальным становится полное отсутствие выталкивания, которое также разбиралось в [8].

В разд. 3 были построены области действия линейного закона потерь. Если выбирать коэффициенты загрузки  $(\rho_1, \rho_2)$  только из этих областей, то решение задачи оптимизации существенно упрощается, так как уравнение (4.4) превращается в линейное алгебраическое уравнение и решается тривиально в явном виде. Допустим, что критический уровень потерь низкоприоритетных требований удовлетворяет неравенству (4.3). Тогда, используя линейную аппроксимацию кривой потерь вида (3.1), получаем следующее оптимальное значение вероятности выталкивания:

$$\alpha_{opt} = \frac{P_{кр} - P_{пот}^{(2)}(0; \rho_1, \rho_2)}{P_{пот}^{(2)}(1; \rho_1, \rho_2) - P_{пот}^{(2)}(0; \rho_1, \rho_2)}. \quad (4.7)$$

Входящие в это выражение вероятности потери при граничных значениях параметра выталкивания  $\alpha = 0$  и  $\alpha = 1$ , разумеется, могут быть подсчитаны методом, изложенным в настоящей статье, однако гораздо проще взять готовые аналитические выражения, имеющиеся в литературе. Для системы с абсолютным приоритетом и детерминированным выталкивающим механизмом ( $\alpha = 1$ ) они приведены в [5], а для такой же системы без выталкивания можно воспользоваться классическими результатами из [20, 21].

Следует отметить, что полученные в настоящей статье формулы оптимальной настройки вероятностного выталкивающего механизма полностью сохраняют свою силу и для других видов приоритета, если только система работает в условиях действия линейного закона потерь. Границы действия линейного закона потерь были ранее построены авторами для целого ряда разновидностей приоритетов, которые выходят за рамки настоящей статьи: для чередующегося приоритета [13], рандомизированного приоритета [14], а также для абсолютного и относительного приоритетов при наличии повторных [15–18] и отрицательных [19] требований.

**Заключение.** В статье рассмотрен метод расчета характеристик телематического устройства, моделируемого с помощью двухпоточковой системы массового обслуживания конечной емкости. Первый поток считается высокоприоритетным и обладает абсолютным приоритетом по обслуживанию, а также приоритетом по постановке в очередь в форме так называемого вероятностного выталкивающего механизма. Последний означает, что вновь подошедшее высокоприоритетное требование, заставшее накопитель полностью заполненным, имеет право вытеснить оттуда одно из низкоприоритетных требований с заданной вероятностью  $\alpha$ . Эта вероятность может служить весьма эффективным параметром управления информационными потоками на входе телематического устройства. Надлежащий выбор  $\alpha$  позволяет рационально управлять высокоприоритетным трафиком, не ущемляя при этом низкоприоритетный трафик. Как показывают расчеты, чувствительность сети к выбору вероятности вытеснения оказывается существенно более высокой, чем к выбору типа приоритета по обслуживанию. Важно заметить, что в предлагаемом способе управления телематическое устройство удается плавно настроить на желаемый режим его функционирования. Для случая марковской модели системы в статье предложен эффективный вычислительный алгоритм, позволяющий сетевым инженерам и проектировщикам без особых усилий оценивать возможные варианты эксплуатации разнообразных устройств телематики. Он основан на построении областей действия линейного закона потерь, в которых вероятность потери обоих типов запросов линейным образом зависит от параметра  $\alpha$ . Для рассмотренной системы поставлена и аналитически решена задача управления вероятностью потери высокоприоритетных требований при наличии ограничения на потери низкоприоритетных заявок.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Zaborovsky V., Muliukha V., Ilyashenko A.* Cyber-physical Approach in a Series Space Experiments “Kontur” // Lecture notes in computer science. 2015. V. 9247. P. 745–758.
2. *Tanenbaum A.S., Wetherall D.J.* Network Computers. Boston: Prentice Hall, 2011.
3. *Сущенко С.П.* Математические модели компьютерных сетей. Томск: Изд-во ТГУ, 2017. 272 с.
4. *Вишневецкий В.М.* Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. М.: Техносфера, 2003. 512 с.
5. *Заяц О.И., Заборовский В.С., Мулюха В.А., Вербенко А.С.* Управление пакетными коммутациями в телематических устройствах с ограниченным буфером при использовании абсолютного приоритета и вероятностного выталкивающего механизма. Ч. 1 // Программная инженерия. 2012. № 2. С. 22–27.
6. *Джейсуол Н.* Очереди с приоритетами. М.: Мир, 1973. 280 с.
7. *Гнеденко Б.В., Даниелян Э.А., Димитров Б.Н., Климов Г.П., Матвеев В.Ф.* Приоритетные системы обслуживания. М.: Изд-во МГУ, 1973. 448 с.
8. *Баширин Г.П.* Некоторые результаты для систем с приоритетом // Массовое обслуживание в системах передачи информации. М.: Наука, 1969. С. 39–53.
9. *Avrachenkov K.E., Shevlyakov G.L., Vilchevsky N.O.* Randomized Push-out Disciplines in Priority Queueing // Mathematical Science. 2004. V. 122. № 4. P. 3336–3342.
10. *Avrachenkov K.E., Vilchevsky N.O., Shevlyakov G.L.* Priority Queueing with Finite Buffer Size and Randomized Push-out Mechanism // Performance Evaluation. 2005. V. 61. № 1. P. 1–16.
11. *Ilyashenko A., Zayats O., Muliukha V., Laboshin L.* Further Investigations of the Priority Queueing System with Preemptive Priority and Randomized Push-out Mechanism // Lecture Notes in Computer Science. 2014. V. 8638. P. 433–443.
12. *Muliukha V., Ilyashenko A., Zayats O., Zaborovsky V.* Preemptive Queueing System with Randomized Push-out Mechanism // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. 2015. V. 21. № 1/3. P. 147–158.
13. *Ilyashenko A., Zayats O., Muliukha V., Lukashin A.* Alternating Priorities Queing System with Randomized Push-out Mechanism // Lecture Notes in Computer Science. 2015. V. 9247. P. 436–445.
14. *Ilyashenko A., Zayats O., Muliukha V.* Randomized Priorities in Queueing System with Randomized Push-out Mechanism // Lecture Notes in Computer Science. 2016. V. 9870. P. 230–237.
15. *Zayats O., Korenevskaya M., Ilyashenko A., Lukashin A.* Retrial Queueing System in Series of Space Experiments “Kontur” // Procedia Computer Science. 2017. V. 103. P. 562–568.
16. *Ilyashenko A., Zayats O., Korenevskaya M., Muliukha V.* A Retrial Queueing System with Preemptive Priority and Randomized Push-out Mechanism // Lecture Notes in Computer Science. 2017. V. 10531. P. 432–440.
17. *Korenevskaya M., Zayats O., Ilyashenko A., Muliukha V.* The Phenomenon of Secondary Flow Explosion in Retrial Priority Queueing System with Randomized Push-out Mechanism // Lecture Notes in Computer Science. 2018. V. 11118. P. 236–246.
18. *Korenevskaya M., Zayats O., Ilyashenko A., Muliukha V.* Retrial Queueing System with Randomized Push-out Mechanism and Non-preemptive Priority // Procedia Computer Science. 2019. V. 150. P. 716–725.
19. *Shorenko P., Zayats O., Ilyashenko A., Muliukha V.* Preemptive Queueing System with Randomized Push-out Mechanism and Negative Customers // Lecture Notes in Computer Science. 2019. V. 11660. P. 305–317.
20. *White H., Christie L.S.* Queueing with Preemptive Priorities or with Breakdown // Operation Research. 1958. V. 6. № 1. P. 79–95.
21. *Stephan F.F.* Two Queues Under Preemptive Priority with Poisson Arrival and Service Rates // Operations Research. 1958. V. 6. № 3. P. 399–418.