

ИНФОРМАТИКА

УДК 004.72, 004.942
MSC 37N35, 03C98

Моделирование сети передачи данных полимодальной системы контроля критически важных объектов государства

С. И. Саитов¹, В. Ю. Будков², Д. К. Левоневский², А. В. Денисов²

¹ Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Российская Федерация, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

² Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Российская Федерация, 199178, Санкт-Петербург, 14-я линия В. О., 39

Для цитирования: Саитов С. И., Будков В. Ю., Левоневский Д. К., Денисов А. В. Моделирование сети передачи данных полимодальной системы контроля критически важных объектов государства // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2021. Т. 17. Вып. 1. С. 59–71.

<https://doi.org/10.21638/11701/spbu10.2021.106>

Рассмотрены подходы к моделированию сети передачи данных в системе удаленного контроля территориально распределенных критически важных объектов государства. Для решения задачи повышения эффективности затрат канального ресурса предложена новая аналитическая модель системы распределения информации с позиции теории телетрафика. Рассматриваются два потока заявок: ресурсоемкие блоки данных традиционных услуг связи обслуживаются с повышенным приоритетом относительно блоков данных с характеристиками состояния оператора. При этом известную дисциплину обслуживания с абсолютным приоритетом и прерыванием предлагается дополнить возможностью резервирования канального ресурса для информации о состоянии оператора. Для таких целей используется градиентная функция внутренней блокировки, которая задает вероятность отказа в обслуживании заявкам высокоприоритетного потока в зависимости от занятого объема канального ресурса. Представленный инструмент перераспределения объема пропускной способности позволяет решить задачу оптимизации, учитывая требования к качеству обслуживания заявок разных категорий и дисциплину обслуживания с приоритетами, прерыванием и резервированием канального ресурса.

Ключевые слова: затраты канального ресурса, сеть передачи данных, многомодальное представление информации, система приоритетного обслуживания вызовов с явными потерями, резервирование канального ресурса.

1. Введение. Современные геополитические условия заставляют пересмотреть отношение к контролю состояния инфокоммуникационных, авто- и железнодорожных

сетей, водоохраных узлов, газотранспортных, нефтепроводных и энергетических систем и др. [1]. Такие структурно-сложные и распределенные системы часто относят к критически важным объектам (КВО) государства. Для них в настоящее время разрабатываются и внедряются специализированные системы мониторинга, устройства контроля доступа к автоматизированным рабочим местам (АРМ) операторов и другие аппаратно-программные средства обеспечения защищенности [2]. Информация о событиях в КВО передается через сеть передачи данных (СПД) на удаленные АРМ должностных лиц органов управления (ОУ).

В последнее время часто наблюдаются ситуации, когда именно характеристики СПД ограничивают возможность обеспечения заданных показателей непрерывности, устойчивости и достоверности дистанционного мониторинга элементов КВО и контроля легитимности операторов. Эти ситуации являются следствием постоянно возрождающегося противоречия между потребностью в расширении перечня субъектов и параметров контроля для формирования более полного представления о состоянии КВО и текущем состоянии СПД. Объемы требуемого канального ресурса СПД в ходе среднесрочного и перспективного планирования деятельности организации должностные лица ОУ определяют, исходя из своего опыта, часто интуитивно, так как формальные средства описания процессов передачи протокольных блоков данных через СПД, реализующих как предоставление традиционных услуг [3], так и передачу контрольной информации от КВО в многомодальном представлении, до сих пор отсутствуют. Ниже предложен подход к моделированию таких сложных технических систем на основе применения апробированного научно-методического инструментария теории массового обслуживания.

2. Общие положения. В общем случае система контроля состояния КВО включает идентификацию технического состояния элементов, работоспособности средств управления и легитимности действий персонала [4]. В последние годы системы дистанционного контроля КВО в срочном порядке дополняются подсистемами контроля поведения легитимных операторов АРМ с целью выявления их девиантности [5]. Последнее обусловлено существенно возросшими психоэмоциональными нагрузками на персонал и повысившейся опасностью терактов на КВО путем воздействий на легитимных операторов [6]. Исследования в предметной области показали [7], что наиболее эффективно обеспечить определение психоэмоционального состояния операторов АРМ КВО можно путем реализации многомодального представления информации об их поведении. Следовательно, через СПД в информационно-аналитическую систему должны передаваться не только протокольные блоки данных (ПБД) систем контроля состояния элементов КВО и традиционных услуг связи, но и блоки данных (БД), сформированных многомодальными агентами контроля состояния оператора (АКСО).

Было установлено [8], что объемно-временные свойства и статистические характеристики передачи многомодальной информации отличаются от известных на уровне соединения и кадров. Кроме того, экономические аспекты внедрения АКСО диктуют необходимость минимизации расходов ресурсов СПД для передачи нового типа сведений. Таким образом, для совершенствования инфокоммуникационного обеспечения действующих систем контроля КВО и предотвращения перегрузки СПД целесообразно обеспечить переход от экстенсивного способа организации загрузки каналов и трактов к интенсивному. Следовательно, рациональным путем текущего этапа развития инфокоммуникационного обеспечения систем контроля КВО является построение СПД, в которых встраивание трактов передачи сообщений основных

модальностей в каналы существующих СПД реализуется в цифровом виде на основе статистического современного мультиплексирования [9]. Для этого требуются аналитические исследования процессов совместной передачи традиционной информации и многомодальных сообщений через СПД.

3. Постановка задачи моделирования. В первом приближении решение задачи повышения эффективности использования ресурсов СПД, применяемых в системах контроля КВО (рис. 1), может быть получено на основе хорошо апробированного инструментария теории массового обслуживания [10–14]. Общая цель моделиро-

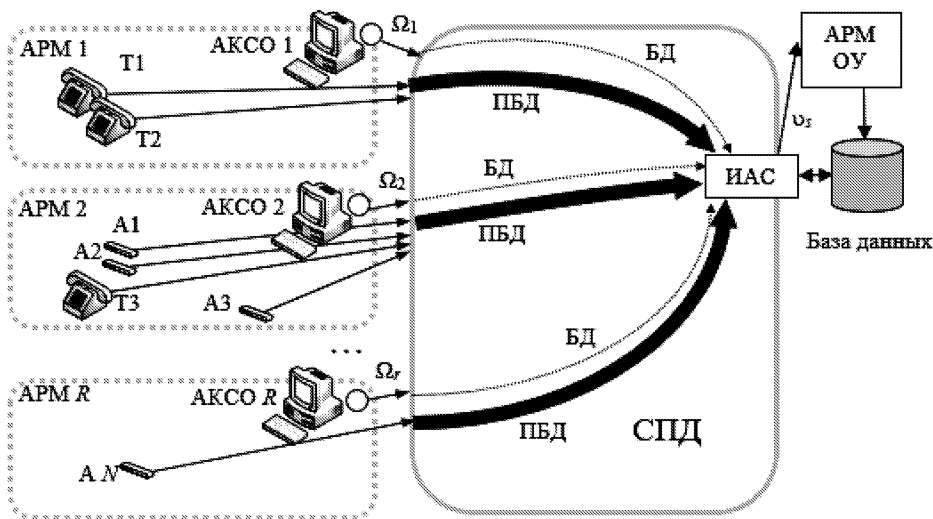


Рис. 1. Функциональный состав иерархической системы контроля состояния КВО
 А — агенты контроля состояния элементов КВО; Т — терминалы традиционных услуг связи;
 Ω_r — модальности; v_s — суждение о состоянии оператора.

вания — формальное представление зависимости системных свойств СПД (своевременность доставки ПБД и БД, вероятность потерь ПБД и БД и т. д.) от управляемых параметров системы: пропускной способности каналов связи, емкости буферных устройств узлов коммутации и др. При этом важнейшим шагом моделирования будет определение дисциплины обслуживания в такой СПД, так как это существенным образом приведет к оценке «взаимоотношения» ПБД (с разными требованиями к ресурсу) и БД (с малыми требованиями к ресурсу) при передаче по каналам связи. Наиболее близкой в предметной области является приоритетная дисциплина обслуживания с явными потерями, которая предполагает реализацию начала процесса обслуживания в момент появления заявки от абонента в интерфейсе «пользователь—сеть» [15] и прием такой заявки только в том случае, если в звене имеется необходимый канальный ресурс для данного типа потока, иначе заявка считается потерянной.

Выявлено, что система обслуживания вызовов с приоритетом и явными потерями позволяет избежать основной проблемы распределения ресурсов в сетях связи с разнородным трафиком, а именно вытеснение из обслуживания заявок с большими требованиями к ресурсам передачи информации заявками с меньшими требованиями [14]. В рассматриваемой СПД качество предоставления традиционных услуг связи необходимо обеспечить на заданном уровне, что потребует обеспечения приоритета ПБД относительно БД. Но и БД, хотя и относится формально к услугам связи

с малыми требованиями к ресурсу и допускают отложенную доставку, имеют особую природу дисконтирования, после которого передача сведений о состоянии оператора становится бессмысленной. Следовательно, существующие модели ТМО не в полной мере подходят для формального представления описываемой СПД, так как обладают важным с точки зрения проводимого исследования недостатком, состоящим в наличии высокой вероятности прерывания заявки от АКСО.

Предварительный анализ инструментария предметной области [10–14] дал возможность сделать вывод о необходимости разработки модели приоритетного обслуживания вызовов с градиентным резервированием канального ресурса (РКР) для низкоприоритетных заявок, к которым будут отнесены БД сообщений модальностей с характеристиками операторов АРМ КВО. Под заявками с высоким приоритетом будем понимать сообщения традиционных услуг связи, которые следует передавать с заданным качеством функционирования согласно руководящим документам. Соответственно новая модель в формализованном виде может быть представлена следующим образом.

Дано: $\mathbf{Z}_k = [b_k, N_k, \alpha_k, \mu_k]^T$ — вектор параметров входной нагрузки; n — число потоков заявок, $k = \overline{1, n}$; b_k — число единиц ресурса линии, необходимого для обслуживания k -го потока; N_k — общее число источников, формирующих k -й поток нагрузки; α_k — интенсивность потока заявок от одного источника k -го потока в свободном состоянии; μ_k — интенсивность обслуживания заявок k -го потока; φ_k — функция внутренней блокировки для заявок k -го потока; V — объем канального ресурса.

Ограничения и допущения: 1) процесс обслуживания заявок рассматривается на уровне соединения; 2) поступающие входные информационные потоки описываются моделью примитивного потока с параметром α_k ($N_k < 100$); 3) длительность обслуживания заявок потоков имеет экспоненциальное распределение с параметром μ_k ; 4) функция внутренней блокировки $\varphi_k \neq 1$; 5) функция внутренней блокировки φ_k убывающая.

Необходимо: разработать математическую модель системы передачи данных, которая учитывает дисциплину обслуживания заявок с приоритетами, прерыванием и резервированием канального ресурса, определяющую зависимость

$$\pi_k = F(\mathbf{Z}_k, V, n, \varphi_k),$$

где π_k — вероятность потерь заявок k -го потока. Разработанная модель системы массового обслуживания (СМО) в символике Кендалла—Башарина [5] может быть записана как $\mathbf{M}i_n/\mathbf{M}_l/V/L/PRA$.

Исследования показали, что записать общие выражения для расчета характеристик СМО типа $\mathbf{M}i_n/\mathbf{M}_l/V/L/PRA$ в силу громоздкости и сложности аналитических соотношений затруднительно. В связи с изложенным для наглядности далее рассматривается частный случай моделирования, который позволит перейти к анализу более сложных вариантов исходных данных.

4. Моделирование звена СПД системы контроля КВО. Пусть на звено СПД со скоростью передачи информации V , выраженной через единицу канального ресурса (ЕКР), поступают два потока заявок ($n = 2$), выраженных в сообщениях модальностей оператора АРМ КВО (БД) и сообщениях традиционных услуг связи (ПБД). Каждый информационный поток аппроксимируется моделью примитивного потока. Реализуемая в звене дисциплина обслуживания с потерями, абсолютным приоритетом и резервированием канального ресурса определяет тип характеристик

качества обслуживания заявок, в частности, долю потерянных заявок (вероятность потерь заявок) k -го потока ($k = 1, 2$), обозначенную через π_k . Заявки второго потока ($k = 2$) обладают абсолютным приоритетом по отношению к заявкам первого потока ($k = 1$), за исключением случаев, предусмотренных резервированием канального ресурса для низкоприоритетных заявок с характеристиками субъекта контроля.

При взаимодействии примитивного потока с СМО в отличие от простейшего потока вероятности потерь по времени, по вызовам и по нагрузке не равны. Наибольший интерес, с практической точки зрения, представляет вероятность потерь по вызовам. Потому в работе основное внимание уделено именно этой характеристике (далее — вероятность потерь).

Входными данными разработанной модели СМО являются: \mathbf{Z}_k — вектор параметров входной нагрузки, определяемый как $\mathbf{Z}_k = [b_k, N_k, \alpha_k, \mu_k]^T$.

Выходные данные модели: π_1, π_2 .

Выразим число заявок первого и второго потоков, находящихся на обслуживании, $i_1 \in \left\{0, 1, \dots, \left\lfloor \frac{V}{b_1} \right\rfloor\right\}$ и $i_2 \in \left\{0, 1, \dots, \left\lfloor \frac{V}{b_2} \right\rfloor\right\}$ соответственно, где $\lfloor \cdot \rfloor$ является целой частью от соответствующего выражения. Общее число занятых в этот момент ЕКР определяется соотношением $i = i_1 \cdot b_1 + i_2 \cdot b_2$. Тогда вектор (i_1, i_2) отражает состояние СМО. Опишем алгоритм взаимодействия потока заявок (вызовов) с системой.

При поступлении вызова с высоким приоритетом возможны следующие исходы:

1) вызов будет принят на обслуживание с вероятностью $1 - \varphi_2(i)$ при $\varphi_2(i) \in [0; 1)$, не влияя на число установленных низкоприоритетных соединений. Ситуация возможна, когда число свободных ресурсов звена больше или равно b_2 ЕКР, т. е. при $V - i \geq b_2$;

2) вызов будет принят на обслуживание с вероятностью $1 - \varphi_2(i)$ при $\varphi_2(i) \in [0; 1)$ за счет прерывания $\left\lfloor \frac{b_2 - (V - i)}{b_1} \right\rfloor$ установленных низкоприоритетных соединений, где $\lfloor \cdot \rfloor$ — округление к большему целому; ситуация возможна, когда число свободных ресурсов звена меньше числа ЕКР b_2 , требуемых для установления высокоприоритетного соединения, т. е. при $V - i < b_2$;

3) вызов будет потерян, когда число ресурсов звена, не занятых обслуживанием высокоприоритетных соединений, меньше числа ЕКР b_2 , т. е. при $V - i_2 \cdot b_2 < b_2$.

При поступлении вызова с низким приоритетом возможны такие исходы:

1) вызов будет принят на обслуживание. Ситуация возможна, когда число свободных ресурсов звена больше или равно b_1 ЕКР, т. е. при $V - i \geq b_1$;

2) вызов будет потерян во всех остальных случаях.

Описанные правила приема и обслуживания вызовов показаны на рис. 2 для случая, когда $V = 5$, $b_1 = 1$, $b_2 = 2$.

В соответствии с общими положениями теории телетрафика [13, 14] качество обслуживания поступающих заявок в СМО оценивается вероятностью потерь вызовов. Сформулированная постановка задачи определяет вид пространства состояний исследуемой модели СПД полимодальной системы контроля КВО и структуру случайного процесса, описывающего динамику их изменения.

Обозначим через $i_1(t)$ число заявок первого ($k = 1$) и $i_2(t)$ — второго ($k = 2$) потоков, находящихся в момент времени t на обслуживании. Двумерный случайный процесс $r(t) = (i_1(t), i_2(t))$, определенный на конечном пространстве состояний $\Omega = \{(i_1, i_2) : i \leq V\}$, характеризует динамику изменения с течением времени чис-

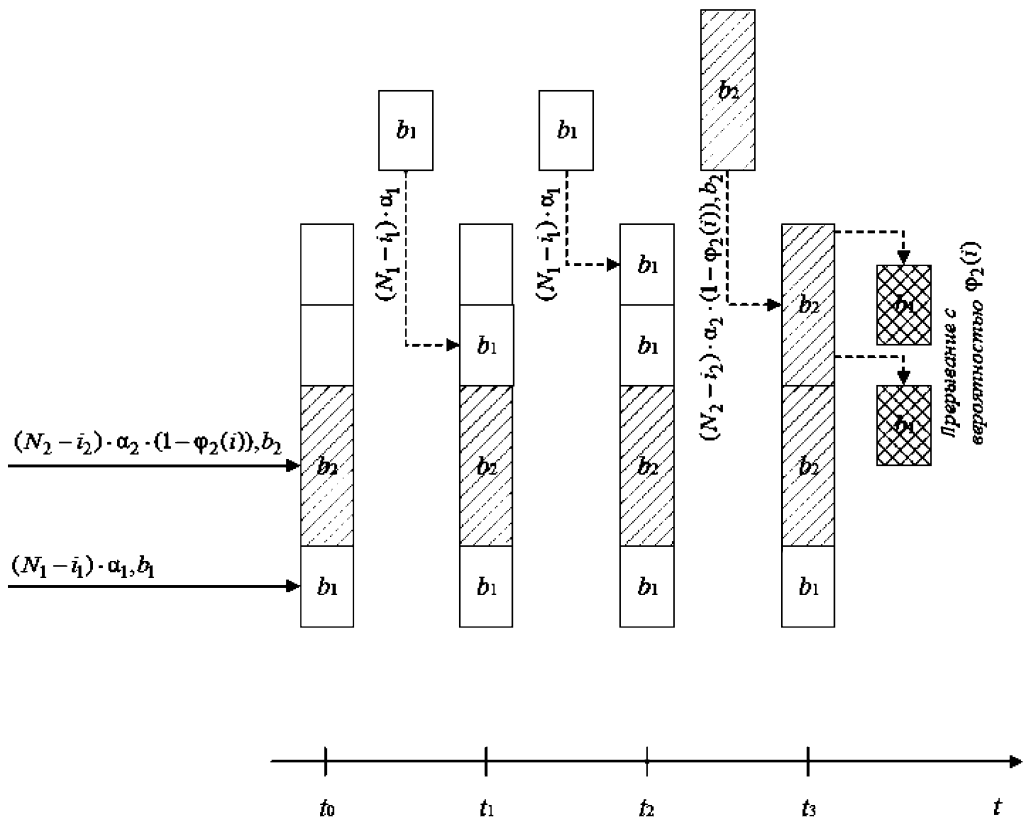


Рис. 2. Реализация механизма прерывания установленных низкоприоритетных соединений при использовании функции внутренней блокировки

ла обслуживаемых заявок каждого из имеющихся потоков. Пространство состояний и соответствующая диаграмма переходов СМО рассматриваемого типа показаны на рис. 3.

5. Характеристики качества обслуживания вызовов. Постановка задачи и математическое описание модели позволяют утверждать, что процесс $r(t)$ является марковским и может быть изучен в стационарном режиме. Пусть $P(i_1, i_2)$ — стационарная вероятность того, что на обслуживании находятся i_1 заявок на передачу низкоприоритетного трафика и i_2 заявок высокоприоритетного трафика. В соответствии с интерпретацией стационарных вероятностей марковского процесса $r(t)$ значение вероятности $P(i_1, i_2)$ представляет собой долю времени пребывания звена в состоянии (i_1, i_2) .

Приведенная интерпретация дает возможность установить искомые характеристики качества обслуживания поступающих потоков заявок. К ним относятся вероятности потери заявок на передачу низкоприоритетного трафика π_1 и высокоприоритетного трафика π_2 . Приведем общие выражения и порядок оценивания данных показателей:

$$\pi_1 = \pi_{пт} + \pi_{пр}, \quad (1)$$

здесь $\pi_{пт}$ — вероятность потерь низкоприоритетного трафика из-за занятости всего

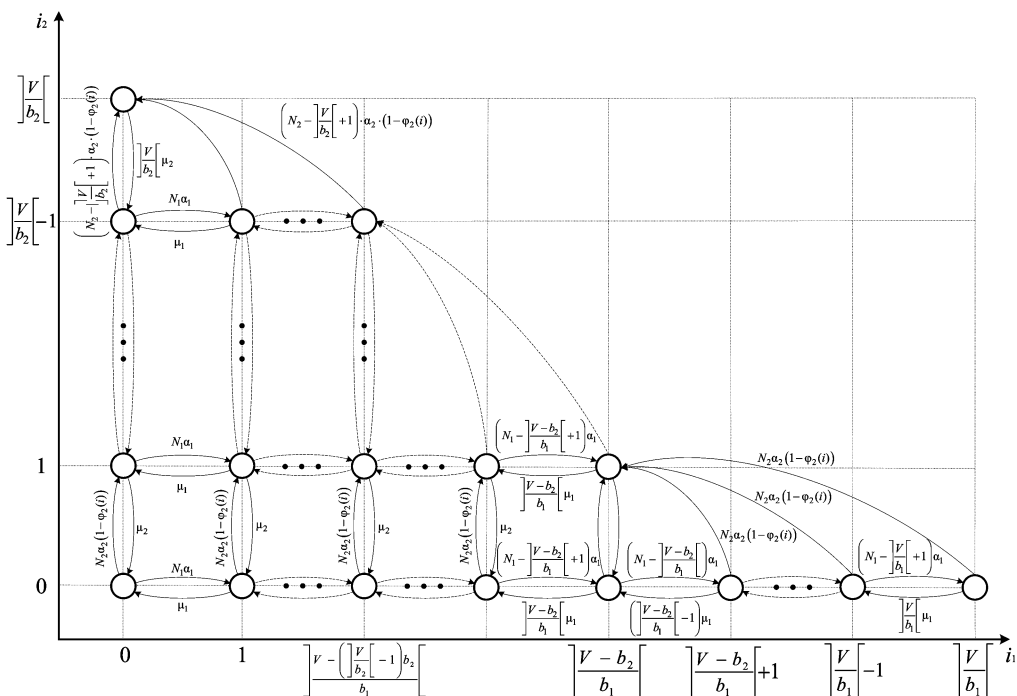


Рис. 3. Диаграмма переходов для случайного процесса $r(t)$

канального ресурса обслуживанием заявок обоих потоков, определяемая как отношение интенсивности потерянных заявок к интенсивности поступивших заявок:

$$\pi_{\text{пт}} = \frac{\sum_{(i_1, i_2) \in B_1} P(i_1, i_2) \cdot (N_1 - i_1) \cdot \alpha_1}{\sum_{(i_1, i_2) \in \Omega} P(i_1, i_2) \cdot (N_1 - i_1) \cdot \alpha_1}, \quad (2)$$

где $B_1 = \{(i_1, i_2) \in \Omega : i + b_1 > V\}$; $\pi_{\text{пр}}$ — вероятность потерь низкоприоритетного трафика из-за прерывания установленного соединения заявкой более высокого приоритета, определяемая как отношение интенсивностей соответствующих событий. Высокоприоритетная заявка будет принята к обслуживанию с вероятностью $1 - \varphi_2(i)$, если компоненты состояния СМО удовлетворяют условию $i_2 \cdot b_2 + b_2 \leq V$.

Прерывание низкоприоритетных заявок для компонент рассматриваемого состояния (i_1, i_2) происходит при выполнении неравенства $i + b_2 > V$. В этом случае число прерываемых заявок рассчитаем из выражения $\left\lceil \frac{b_2 - (V - i)}{b_1} \right\rceil$:

$$\pi_{\text{пр}} = \frac{\sum_{(i_1, i_2) \in B_2} \left(\left\lceil \frac{b_2 - (V - i)}{b_1} \right\rceil \right) \cdot (P(i_1, i_2) \cdot (N_2 - i_2) \cdot \alpha_2 \cdot (1 - \varphi_2(i)))}{\sum_{(i_1, i_2) \in \Omega} P(i_1, i_2) \cdot (N_1 - i_1) \cdot \alpha_1}, \quad (3)$$

в котором $B_2 = \{(i_1, i_2) \in \Omega : V - i_1 \cdot b_1 < i_2 \cdot b_2 + b_2 \leq V\}$, π_2 — вероятность потерь высокоприоритетного трафика из-за занятости всего канального ресурса и с учетом РКР находится следующим образом:

$$\pi_2 = \pi_{\text{пт2}} + \pi_{\text{фб}}, \quad (4)$$

где $\pi_{\text{пт2}}$ — вероятность потерь высокоприоритетного трафика из-за занятости всего канального ресурса обслуживанием заявок приоритетного потока, определяемая как отношение интенсивности потерянных заявок к интенсивности поступивших заявок:

$$\pi_{\text{пт2}} = \frac{\sum_{(i_1, i_2) \in B_3} P(i_1, i_2) \cdot (N_2 - i_2) \cdot \alpha_2 \cdot (1 - \varphi_2(i))}{\sum_{(i_1, i_2) \in \Omega} P(i_1, i_2) \cdot (N_2 - i_2) \cdot \alpha_2 \cdot (1 - \varphi_2(i))}, \quad (5)$$

здесь $B_3 = \{(i_1, i_2) \in \Omega : i_2 \cdot b_2 + b_2 > V\}$, $\pi_{\text{фб}}$ — вероятность потерь высокоприоритетного трафика из-за функции внутренней блокировки:

$$\pi_{\text{фб}} = \sum_{(i_1, i_2) \in \Omega} P(i_1, i_2) \cdot \varphi_2(i). \quad (6)$$

Приведенные определения показателей качества обслуживания заявок и заданная функция внутренней блокировки для высокоприоритетного трафика дают возможность произвести оценку предложенной модели с РКР относительно известной модели с отказами и абсолютным приоритетом.

6. Система уравнений равновесия. Для оценивания характеристик предложенной модели СМО $M_i/n/M_i/V/L/PRA$ в соответствии с введенными определениями (1)–(6) необходимо составить и решить систему уравнений равновесия (СУР), связывающую значения стационарных вероятностей $P(i_1, i_2)$.

При формировании системы уравнений, согласно правилу статистического равновесия, необходимо определить и просуммировать интенсивности поступления всех событий, которые выводят процесс $r(t)$ из произвольного состояния (i_1, i_2) , взвешенные вероятностью данного состояния (левая часть СУР), и приравнять их к суммарным интенсивностям перехода процесса $r(t)$ в состояние (i_1, i_2) , взвешенным соответствующими вероятностями состояний, из которых этот переход происходит (правая часть СУР) [13, 14].

В соответствии с ранее принятой дисциплиной обслуживания потоков заявок и приравняв левую и правую части уравнения равновесия, получим общий вид СУР:

$$\begin{aligned} & P(i_1, i_2) \cdot \left[(N_1 - i_1) \cdot \alpha_1 \cdot I(i + b_1 \leq V) + (N_2 - i_2) \cdot \alpha_2 \cdot (1 - \varphi_2(i)) \cdot I(i + b_2 \leq V) + \right. \\ & \left. + (N_2 - i_2) \cdot \alpha_2 \cdot (1 - \varphi_2(i)) \cdot I(i + b_2 > V, i_2 \cdot b_2 + b_2 \leq V) + \sum_{k=1}^2 i_k \cdot \mu_k \cdot I(i_k > 0) \right] = \\ & = P(i_1 - 1, i_2) \cdot (N_1 - i_1 + 1) \cdot \alpha_1 \cdot I\left(0 < i_1 \leq \left\lfloor \frac{V - i_2 \cdot b_2}{b_1} \right\rfloor\right) + \\ & + P(i_1, i_2 - 1) \cdot (N_2 - i_2 + 1) \cdot \alpha_2 \cdot (1 - \varphi_2(i - b_2)) \cdot I\left(0 < i_2 \leq \left\lfloor \frac{V - i_1 \cdot b_1}{b_2} \right\rfloor\right) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + P(i_1 + 1, i_2) \cdot (i_1 + 1) \cdot \mu_1 \cdot I(i + b_1 \leq V) + P(i_1, i_2 + 1) \cdot (i_2 + 1) \cdot \mu_2 \cdot I(i + b_2 \leq V) + \\
& + \left[\frac{V - (i_2 - 1) \cdot b_2}{b_1} \right]_{-i_1} \\
& + \sum_{k=1} P(i_1 + k, i_2 - 1) \cdot (N_2 - i_2 + 1) \cdot \alpha_2 \cdot (1 - \varphi_2(i - b_2)) \times \\
& \times I(i_2 > 0, i_2 \cdot b_2 \leq V, i + b_1 > V), (i_1, i_2) \in \Omega,
\end{aligned} \tag{7}$$

где $I(\cdot)$ — индикаторная функция, определяемая соотношением

$$I(\cdot) = \begin{cases} 1, & \text{если выполняется условие, сформированное в скобках;} \\ 0, & \text{если это условие не выполняется.} \end{cases}$$

Решение системы уравнений равновесия (7) удовлетворяет условию нормировки

$$\sum_{(i_1, i_2) \in \Omega} P(i_1, i_2) = 1.$$

В связи с реализацией механизма прерывания для данной модели не выполняется критерий Колмогорова, следовательно, процесс $r(t)$ не обладает свойством обратимости, поэтому распределение вероятностей состояний системы не может быть представлено в мультипликативном виде [14]. Потому для решения СУР (7) необходимо использовать численные методы. В этом случае рекомендуется применять итерационный метод Гаусса—Зейделя, общая схема реализации которого при решении СУР представлена в [14]. В связи с предложенной концепцией предлагается, варьируя значения вероятностей отказа в обслуживании высокоприоритетного трафика в зависимости от общего числа занятых канальных единиц, исследовать алгоритмы резервирования канального ресурса СПД. На рис. 4, *a* и *b* представлено сравнение характеристик качества обслуживания разрабатываемой модели с учетом РКР и известной модели с абсолютным приоритетом и прерыванием [16] при исходных данных $n = 2$, $N_1 = N_2 = 7$, $b_1 = 1$, $b_2 = 4$, $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.5$, $V = 20$, $\varphi_2(0 - 10) = 0$, $\varphi_2(11) = \varphi_2(12) = 0.2$, $\varphi_2(13) = \varphi_2(14) = 0.4$, $\varphi_2(15) = \varphi_2(16) = 0.6$, $\varphi_2(17) = \varphi_2(18) = 0.8$, $\varphi_2(19) = \varphi_2(20) = 1$.

Наблюдаемое локальное уменьшение вероятности потерь низкоприоритетных заявок объясняется вытеснением с обслуживания ресурсоемких заявок в соответствии с правилом, заданным функцией внутренней блокировки. Представленный механизм позволяет устранить негативные последствия неконтролируемого распределения канального ресурса СПД и обеспечить как необходимый объем сообщений с характеристиками оператора КВО для оценки его текущего психофизиологического состояния, так и соответствующее качество традиционной услуги инфокоммуникационной сети в зависимости от актуальной оперативной обстановки. На основе предложенного научно-методического инструментария возможно разработать алгоритм для определения оптимальных значений управляемых характеристик математической модели и решить задачу, заключающуюся в поиске таких функций блокировок, при которых вероятность потерь низкоприоритетных заявок перспективных услуг связи будет минимальной, а показатели качества обслуживания традиционных услуг связи останутся в рамках, установленных требованиями нормативных документов.

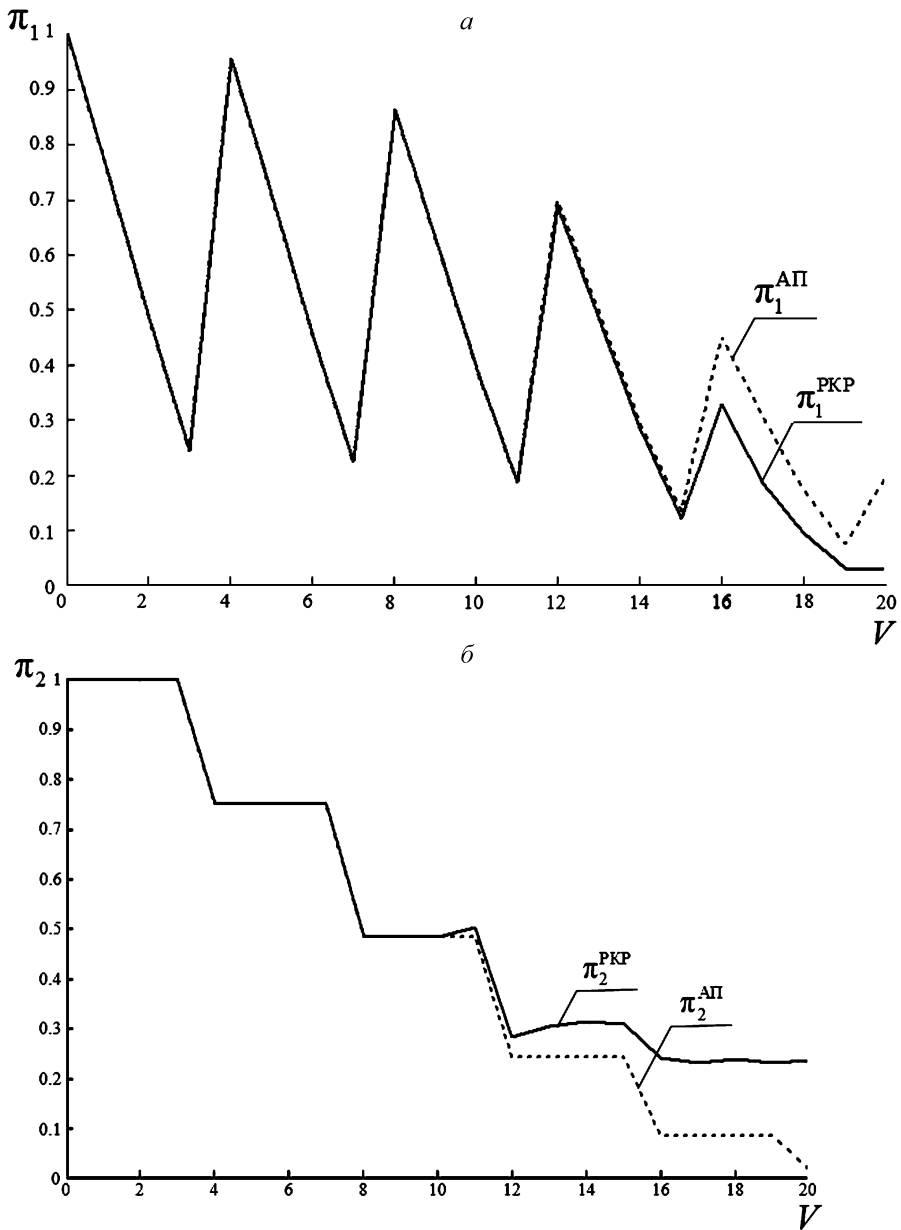


Рис. 4. Зависимость вероятности потерь низкоприоритетных заявок π_1 (а) и высокоприоритетных заявок π_2 (б) от канального ресурса известной и предлагаемой моделей

7. Заключение. Была предложена новая модель СМО $Mi_n/M_l/V/L/PRA$, в которой учитывается зависимость поступающих потоков заявок от приоритетов, числа источников нагрузки и с учетом градиентного резервирования канального ресурса:

$$\pi_k = F(\mathbf{Z}_k, V, n, \varphi_k).$$

Для данной модели получены выражения для расчета основных показателей качества обслуживания поступающих заявок различных приоритетов (1)–(6). Разработанная модель может быть использована для численного исследования в широком диапазоне исходных данных. В комплексе с известными моделями систем распределения информации [10–14] она позволит решать оптимизационные задачи, связанные с определением наиболее предпочтительных стратегий (схем) доступа и значений управляемых параметров при моделировании сети передачи данных в системе удаленного контроля распределенных КВО государства.

Литература

1. Шнейс-Шнейпе М. А. Телекоммуникации Пентагона: цифровая трансформация и киберзащита. М.: Горячая линия–Телеком, 2017. 272 с.
2. Об одобрении Концепции федеральной системы мониторинга критически важных объектов и (или) потенциально опасных объектов инфраструктуры Российской Федерации и опасных грузов: Распоряжение Правительства РФ от 27 августа 2005 г. № 1314-р. М.: Собрание законодательства РФ, 2015.
3. Саитов И. А., Трегубов Р. Б. Теоретические основы анализа и оптимизации иерархических многоуровневых маршрутизирующих систем. Орел: Академия ФСО России, 2017. 587 с.
4. Гончаров С. М., Боршевников А. Е. Использование технологий высоконадежной биометрической аутентификации в критически важных объектах // Информационная безопасность регионов. 2015. Т. 4. Вып. 21. С. 18–23.
5. Саитов С. И. Многомодальная динамическая аутентификация технического персонала критически важных объектов // Современные материалы, техника и технологии. 2017. Т. 4. Вып. 12. С. 36–39.
6. Гнидко К. О., Ломако А. Г. Контроль потенциального опасного взаимодействия на индивидуальное и групповое сознание потребителей мультимедийного контента // Труды СПИИРАН. 2015. Т. 1. С. 9–33. <https://doi.org/10.15622/sp.38.2>
7. Басов О. О. Модели и метод синтеза полимодальных инфокоммуникационных систем: дис. д-ра техн. наук. Орел: Академия ФСО России, 2016. 292 с.
8. Басов О. О., Карпов А. А., Саитов И. А. Методологические основы синтеза полимодальных инфокоммуникационных систем государственного управления. Орел: Академия ФСО России, 2015. 263 с.
9. Патент № 2674463 (РФ). Способ мультиплексирования цифровых сигналов при многомодальном представлении информации / С. И. Саитов, В. К. Игольников, О. О. Басов, И. А. Саитов. Заявл. 31 января 2018 г.; опубл. 11 декабря 2018 г. Бюл. № 35. 14 с.
10. Iversen V. B. Teletraffic engineering and network planning. Kgs. Lyngby: Technical University of Denmark, 2015. 382 p.
11. Ross K. Multiservice loss models for broadband telecommunication networks. London: Springer, 1995. 343 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2126-8>
12. Grimm C., Schluchtermann G. IP traffic theory and performance. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. 487 p. (Springer Series on Signals and Communication Technology.) <https://doi.org/10.1007/978-3-540-70605-2>
13. Степанов С. Н. Основы телетрафика мультисервисных сетей. М.: Эко-Трендз, 2010. 392 с.
14. Степанов С. Н. Теория телетрафика: концепции, модели, приложения. М.: Горячая линия–Телеком, 2015. 868 с.
15. ITU-T Recommendation I. 350. General aspects of quality of service and network performance in digital networks, including ISDNs. Geneva: ITU-T Publications, 1993.
16. Корнилов С. А. Модель звена мультисервисной сети следующего поколения с приоритетной дисциплиной обслуживания // Телекоммуникации. 2017. № 10. С. 35–42.

Статья поступила в редакцию 1 октября 2020 г.

Статья принята к печати 15 января 2021 г.

Контактная информация:

Саитов Сергей Игоревич — аспирант; sami.stv@mail.ru

Будков Виктор Юрьевич — канд. техн. наук, ст. науч. сотр.; visharmail@gmail.com

Conceptual model of a data transmission network for a polymodal control system in critical state infrastructure

S. I. Saitov¹, V. Yu. Budkov², D. K. Levonevsky², A. V. Denisov²

¹ Information Technologies, Mechanics and Optics University,
49, Kronverkskiy pr., St. Petersburg, 197101, Russian Federation

² St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences,
39, 14-ia linia V. O., St. Petersburg, 199178, Russian Federation

For citation: Saitov S. I., Budkov V. Yu., Levonevsky D. K., Denisov A. V. Conceptual model of a data transmission network for a polymodal control system in critical state infrastructure. *Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*, 2021, vol. 17, iss. 1, pp. 59–71. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu10.2021.106> (In Russian)

Approaches to modeling a data transmission network in a remotely controlled system for distributed critical state facilities are considered in the article. To solve the problem of increasing the efficiency of channel resource costs, a new analytical model of the information distribution system from the standpoint of teletraffic theory is proposed. The model describes the service of extraordinary calls with absolute priorities, failures and gradient reservation of the channel resource for messages of modalities with the characteristics of operators in the data transmission network of critical facilities.

Keywords: channel resource costs, data transmission network, multimodal information presentation, system of priority service of calls with obvious losses, probability call loss.

References

1. Shneps-Shneppe M. A. *Telekommunikacii Pentagona: cifrovaja transformacija i kiberzashhita* [Pentagon telecommunications: digital transformation and cyber defense]. Moscow, Gorjachaja liniya–Telekom Publ., 2017, 272 p. (In Russian)
2. *Ob odobrenii Kontseptsii federal'noi sistemy monitoringa kriticheski vazhnykh ob"ektov i (ili) potentsial'no opasnykh ob"ektov infrastruktury Rossijskoi Federatsii i opasnykh gruzov* [On approval of the Concept of the federal monitoring system for critical facilities and (or) potentially hazardous infrastructure facilities of the Russian Federation and dangerous goods]. Rasporjazhenie Pravitel'stva RF ot 27 avgusta 2005 g. no. 1314-r [Guidelines of Russian Federation Government N 1314-r at August 27, 2005]. Moscow, Sobranie zakonodatel'stva Russian Federation Publ., 2015. (In Russian)
3. Saitov I. A., Tregubov R. B. *Teoreticheskie osnovy analiza i optimizacii ierarhicheskikh mnogourovnevnykh marshrutizirujushhikh sistem* [Theoretical foundations of analysis and optimization of hierarchical multilevel routing systems]. Orel, Academy of FSO of the Russian Federation Publ., 2017, 587 p. (In Russian)
4. Goncharov S. M., Borshevnikov A. E. Ispolzovanie tekhnologij vysokonadezhnoj biometricheskoi autentifikacii v kriticheski vazhnykh objektah [Use of highly reliable biometric authentication technologies in critical facilities]. *Informacionnaja bezopasnost' regionov* [Information security of regions], 2015, vol. 4, iss. 21, pp. 18–23. (In Russian)
5. Saitov S. I. *Mnogomodalnaya dinamicheskaya autentifikaciya tekhnicheskogo personala kriticheski vazhnykh objektov* [Multimodal dynamic authentication of technical personnel of critical objects]. *Sovremennye materialy, tehnika i tekhnologii* [Modern materials, equipment and technology], 2017, vol. 4, iss. 12, pp. 36–39 (In Russian)
6. Gnidko K. O., Lomako A. G. Kontrol potencialnogo opasnogo vzaimodejstviya na individualnoe i grupповое soznanie potrebitel'ev multimedijnogo kontenta [Control of potential dangerous interactions on individual and group consciousness of multimedia content consumers]. *Trudy SPIIRAN* [Proceedings of SPIIRAS], 2015, vol. 1, pp. 9–33. <https://doi.org/10.15622/sp.38.2> (In Russian)

7. Basov O. O. *Modeli i metod sinteza polimodal'nyh infokommunikacionnyh sistem* [Models and method of synthesis of polymodal information and communication systems]. Dis. Dr. Sci. in Engineering. Orel, Akademy of FSO of the Russian Federation Publ., 2016, 292 p. (In Russian)
8. Basov O. O., Karpov A. A., Saitov I. A. *Metodologicheskie osnovy sinteza polimodal'nyh infokommunikacionnyh sistem gosudarstvennogo upravleniya* [Methodological basis for the synthesis of polymodal infocommunication systems of state administration]. Orel, Akademy of FSO of the Russian Federation Publ., 2015, 263 p. (In Russian)
9. Saitov S. I., Igol'nikov V. K., Basov O. O., Saitov I. A. *Sposob mul'tipleksirovaniya cifrovyyh signalov pri mnogomodal'nom predstavlenii informacii* [Method for multiplexing digital signals with multi-modal presentation of information]. Patent RF no. 2674463. Declare January 31, 2018; publ. December 11, 2018, bull. no. 35, 14 p. (In Russian)
10. Iversen V. B. *Teletraffic engineering and network planning*. Kgs. Lyngby, Technical University of Denmark Publ., 2015, 382 p.
11. Ross K. *Multiservice loss models for broadband telecommunication networks*. London, Springer Publ., 1995, 343 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2126-8>
12. Grimm C., Schluchtermann G. *IP traffic theory and performance*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag Publ., 2008, 487 p. (Springer Series on Signals and Communication Technology). <https://doi.org/10.1007/978-3-540-70605-2>
13. Stepanov S. N. *Osnovy teletrafika mul'tiservisnyh setej* [The basics of teletraffic multiservice networks]. Moscow, Jeko-Trendz Publ., 2010, 392 p. (In Russian)
14. Stepanov S. N. *Teorija teletrafika: koncepcii, modeli, prilozheniya* [Teletraffic theory: concepts, models, applications]. Moscow, Gorjachaja liniya–Telekom Publ., 2015, 868 p. (In Russian)
15. ITU-T Recommendation I.350. *General aspects of quality of service and network performance in digital networks, including ISDNs*. Geneva, ITU-T Publications Press, 1993.
16. Kornilov S. A. *Model' zvena mul'tiservisnoj seti sleduyushchego pokoleniya s prioritetnoj disciplinoy obsluzhivaniya* [Next-generation multiservice network link model with priority service discipline]. *Telekommunikacii* [Telecommunications], 2017, no. 10, pp. 35–42. (In Russian)

Received: October 01, 2020.

Accepted: January 15, 2021.

A u t h o r s ' i n f o r m a t i o n :

Sergey I. Saitov — Postgraduate Student; sami.stv@mail.ru

Viktor Yu. Budkov — PhD in Engineering, Senior Research Collaborator; visharmail@gmail.com

Dmitrii K. Levonevsky — PhD in Engineering, Research Collaborator; DLewonewski.8781@gmail.com

Alexandr V. Denisov — Junior Research Collaborator; sdenisov93@mail.ru