

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕТЕРОГЕННОЙ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ С КОММУТАЦИЕЙ ПАКЕТОВ КАК СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ С АБСОЛЮТНЫМ ПРИОРИТЕТОМ И РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ КАНАЛЬНОГО РЕСУРСА

DOI: 10.36724/2072-8735-2021-15-11-45-52

Manuscript received 25 July 2021;
Accepted 27 August 2021

Саитов Сергей Игоревич,
Федеральное государственное казённое военное
образовательное учреждение высшего образования
"Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации",
г. Орёл, Россия, Sami.stv@mail.ru

Keywords: гетерогенная сеть, система
массового обслуживания, каналный ресурс,
моделирование, система мониторинга

В статье рассматривается решение своевременной и актуальной научно-технической задачи моделирования сети передачи данных с коммутацией пакетов системы мониторинга состояния критически важных объектов государства. Предметом исследования является процессы обслуживания сетью передач данных с коммутацией пакетов сообщений как традиционных услуг связи, так и сообщений от средств динамической многомодальной аутентификации легитимности и девиантности персонала критически важного объекта. Такие средства аутентификации для сети передачи данных являются источниками поступающей нагрузки со специфическими свойствами. Целью исследования является обеспечить качественное обслуживание протокольных блоков данных обоих типов с минимальными затратами каналного ресурса. Для достижения цели исследования в статье предлагается конструктивный подход к разработке модели гетерогенной сети передачи данных с коммутацией пакетов на основе методологии систем массового обслуживания. Протокольные блоки данных многомодальных сообщений имеют небольшой объем, но должны быть переданы к органу управления критически важным объектом с высокими требованиями по своевременности. В связи с этим, объект моделирования – сеть передачи данных с коммутацией пакетов – представлен в виде системы массового обслуживания с абсолютным приоритетом и резервированием каналного ресурса. Такой подход позволяет избежать вытеснения более ресурсоемких сообщений (традиционных услуг связи) менее ресурсоемкими (сообщениями в многомодальном представлении) при обеспечении требований по качеству обслуживания обоих типов нагрузки. В результате моделирования получены выражения для расчета показателей качества обслуживания поступающих заявок сообщений традиционных услуг связи и сообщений в многомодальном представлении. Предложенная модель совместно с существующими моделями систем массового обслуживания позволит решать расчетные и исследовательские задачи по поиску рациональных проектных стратегий построения сетей передачи данных с коммутацией пакетов системы мониторинга критически важных объектов государства.

Информация об авторах:

Саитов Сергей Игоревич, адъюнкт, Федеральное государственное казённое военное образовательное учреждение высшего образования "Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации", г. Орёл, Россия

Для цитирования:

Саитов С.И. Моделирование гетерогенной сети передачи данных с коммутацией пакетов как системы массового обслуживания с абсолютным приоритетом и резервированием каналного ресурса // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №11. С. 45-52.

For citation:

Saitov S.I. (2021) Modeling of a heterogeneous packet-switched data network as a queuing system with absolute priority and channel resource redundancy. T-Comm, vol. 15, no.11, pp. 45-52. (in Russian)

Введение

К настоящему времени в предметной области разработано множество моделей, направленных на формальное представление различных аспектов обслуживания протокольных блоков данных в сетях передачи данных с коммутацией пакетов. Многие из них доведены до прикладных программных продуктов, используемых для решения расчетных и исследовательских задач планирования и проектирования сетей связи общего пользования и систем связи специального назначения. В последние годы наблюдается постепенное смещение применяемых средств моделирования от аналитических к имитационным, что обусловлено существенным развитием возможностей вычислительной техники. Однако, как показывает практика, имитационное моделирование демонстрирует высокую эффективность в случаях, когда структура объекта исследования уже известна и уточнены пределы изменения исходных данных. В ситуациях, когда структура объекта исследования вариативна, а характеристики исходных данных еще требуется определить, по-прежнему ведущую роль играют средства традиционного математического моделирования.

В предлагаемой статье рассмотрен вариант применения математической модели для формального представления гетерогенной сети передачи данных (СПД) с коммутацией пакетов (КП), в которой циркулируют не только сообщения традиционных услуг связи (ТУС), но и сообщения в многомодальном представлении в интересах системы мониторинга критически важных объектов (КВО) государства. Новизна объекта исследования и отсутствие достаточных статистических данных относительно обслуживания такой двухмерной нагрузки и предопределили необходимость представления СПД с КП в виде системы массового обслуживания. Полученные результаты в дальнейшем позволили бы ограничить область поиска оптимальных решений, разработать конструктивные имитационные модели, позволяющие уточнить решения, полученные аналитически, для конкретных СПД с КП конкретных КВО.

1. Общие положения

Состояние критически важных объектов определяет потенциально достижимый уровень экономического развития страны, определяет ее обороноспособность и национальную безопасность [1, 2]. Неработоспособность даже отдельных элементов КВО часто приводит к существенным негативным военно-политическим и экономическим последствиям, многочисленным человеческим жертвам. По этой причине совершенствованию системы мониторинга КВО государства уделяется повышенное внимание со стороны Правительства Российской Федерации, ведомств силового блока [3-5]. Для снижения влияния «человеческого фактора» на работоспособность КВО в настоящее время широко внедряются средства мониторинга поведения персонала КВО, например, на базе динамической многомодальной аутентификации (ДМА) [6-9].

В связи с этими инновациями для информационной инфраструктуры КВО появляется новый источник трафика – устройства (агенты) ДМА, генерирующие сообщения в многомодальном представлении об легитимности или девиантности операторов автоматизированных рабочих мест (АРМ).

Естественно, для обслуживания этой нагрузки требуется:

- выделение (введение, приобретение) дополнительной пропускной способности (каналов и трактов) в сети передачи данных КВО для передачи протокольных блоков данных (ПБД) в многомодальном представлении от средств ДМА;
- изменение дисциплины (способа) обслуживания трафика в системах коммутации СПД КВО с тем, чтобы сохранить качество обслуживания ПБД традиционных услуг связи и обеспечить требуемое качество обслуживания ПБД в многомодальном представлении.

Исходя из текущей геополитической ситуации в мире и экономической обстановкой в стране, осложняемой мероприятиями по противодействию пандемии COVID-19, второй путь является более предпочтительным. Однако из-за новизны применяемых средств мониторинга КВО, особенностей передачи многомодальной информации (требующей соблюдения взаимных временных соотношений между отдельными модами на приеме [7]), к настоящему времени отсутствуют формальные средства исследования таких гетерогенных СПД.

Таким образом, моделирование СПД с КП системы мониторинга КВО государства при передаче по ее каналам как ПБД от средств ДМА персонала (далее – ПБД_{МОД}), так и ПБД традиционных услуг связи (далее – ПБД_{ТУС}), является своевременной и злободневной научно-технической задачей.

2. Постановка задачи моделирования гетерогенной СПД с КП системы мониторинга КВО государства

В предметной области имеется хорошо апробированный инструментарий теории массового обслуживания (ТМО) [10-14], позволяющий математическими средствами описать процессы в СПД с КП, аналитически обосновать дисциплину обслуживания, исходя их характеристик нагрузки и параметров обслуживаемых приборов. Далее под целью моделирования будет пониматься формальное представление зависимости системных свойств СПД (своевременности доставки ПБД_{ТУС} и ПБД_{МОД}, вероятность потерь ПБД_{ТУС} и ПБД_{МОД} и т.д.) от таких управляемых на этапе проектирования СПД параметров как, например, пропускная способность каналов (трактов) связи СПД.

Исследования показали, что дисциплина обслуживания в СПД с КП существенным образом определяет степень использования ресурсов пропускной способности при обслуживании двух типов нагрузки: ПБД_{ТУС} (с разными требованиями к ресурсу) и ПБД_{МОД} (с малыми требованиями к ресурсу). На первом этапе была проанализирована приоритетная дисциплина обслуживания с явными потерями [15].

Системы массового обслуживания (СМО) с приоритетом и явными потерями позволяет в первом приближении решить основную проблему распределения ресурсов в гетерогенной СПД с КП, состоящую в вытеснении из обслуживания заявок с большими требованиями к ресурсам передачи информации заявками с меньшими требованиями. Однако в рассматриваемой СПД с КП этого недостаточно. Требуется не только обеспечить качество предоставления ТУС, что реализуется за счет присвоения приоритета ПБД_{ТУС} относительно ПБД_{МОД}. Вследствие необходимости синхронизации мод нужны механизмы, гарантирующие своевременную доставку ПБД_{МОД} без изменения взаимных временных соот-

ношений между ними, а тем более без прерывания. Следовательно, существующие модели ТМО не в полной мере подходят целям проводимого исследования. В условиях большой нагрузки от источников ТУС высока вероятность прерывания заявки по передаче ПБД_{МОБ}.

Опираясь на исследования [12, 13] можно утверждать, что выходом из описанной ранее ситуации является реализация приоритетного обслуживания вызовов с *градиентным резервированием канального ресурса* (РКР) для низкоприоритетных заявок, к которым будут отнесены ПБД_{МОД}. Высокоприоритетными останутся сообщения ТУС, требования к качеству которых определяются руководящими документами [16]. Все вышесказанное в формализованном виде целесообразно представить в виде.

Пусть дан вектор параметров входной нагрузки

$$\vec{Z}_k = [b_k, N_k, \alpha_k, \mu_k]^T. \quad (1)$$

Здесь n – число потоков заявок, $k = \overline{1, n}$; V – объем канального ресурса; α_k – интенсивность потока заявок от одного источника k -го приоритета в свободном состоянии; b_k – число единиц ресурса линии, необходимого для обслуживания потока k -го приоритета; μ_k – интенсивность обслуживания заявок потока k -го приоритета; N_k – общее число источников, формирующих поток k -го приоритета нагрузки; $\varphi_k(i)$ – градиентная функция внутренней блокировки для заявок потока k -го приоритета, где i – общее число занятых канальных единиц объема канального ресурса V в момент поступления заявки потока k -го приоритета.

Применение инструментария ТМО потребует использовать следующие ограничения и допущения:

анализ процесса обслуживания заявок – на уровне соединения;

входные информационные потоки формализуются на основе модели простейшего ($N_k < 100$) потока с параметром α_k ;

длительность обслуживания заявок потоков имеет экспоненциальное распределение с параметром μ_k ;

функция внутренней блокировки $\varphi_k(i)$ является неубывающей и $\varphi_k(i) \neq 1$.

Задача исследования – разработать математическую модель, учитывающую выбранную выше дисциплину обслуживания заявок с приоритетами и РКР, определяющую зависимость показателей качества вида

$$\pi_k = F(\vec{Z}_k, V, n), \quad (2)$$

где π_k – параметр качества – вероятность потерь заявок k -го потока.

В символике Кендалла-Башарина такая модель СМО может быть записана в следующем виде

$$\vec{M}i_n / \vec{M}i_1 / V / L / PRA. \quad (3)$$

Исследования показывают, что записать общие выражения для расчета характеристик СМО такого типа в силу сложности аналитических соотношений затруднительно [17–19]. Однако целесообразно получить частные выражения, важные с точки зрения разработки формальных средств проектирования СПД с КП системы мониторинга КВО.

3. Входные параметры модели СМО с приоритетом, прерываниями и РКР

Пусть на исследуемую СМО, которая обеспечивает скорость передачи информации V , поступают два потока заявок ($n = 2$), а именно ПБД_{МОД} и ПБД_{ТУС}. Каждый информационный поток аппроксимируется моделью примитивного потока. Вероятность потерь заявок по вызовам k -го потока ($k = 1, 2$) далее обозначается как π_k (далее по тексту – вероятность потерь).

Заявки ПБД_{ТУС} ($k = 2$) имеют абсолютный приоритет по отношению к заявкам ПБД_{МОД} ($k = 1$) за исключением случаев, предусмотренных механизмом РКР.

В связи с изложенным, входными данными модели является вектор параметров входной нагрузки $\vec{Z}_k = [b_k, N_k, \alpha_k, \mu_k]^T$, а выходными данными – параметры качества обслуживания π_1, π_2 .

Далее все расчеты производятся в единицах канального ресурса (ЕКР) в соответствии с теорией мультитрафика, предложенной в [14]. Так, число заявок потока ПБД_{МОД} и потока ПБД_{ТУС}, находящихся на обслуживании, далее находится как

$$i_1 \in \left\{ 0, 1, \dots, \left\lfloor \frac{V}{b_1} \right\rfloor \right\} \text{ и } i_2 \in \left\{ 0, 1, \dots, \left\lfloor \frac{V}{b_2} \right\rfloor \right\}, \quad (4)$$

где скобки $\lfloor \cdot \rfloor$ обозначают целую часть выражения.

Суммарное число занятых в этот момент ЕКР определяется как

$$i = i_1 b_2 + i_2 b_2. \quad (5)$$

Таким образом, вектор (i_1, i_2) отражает текущее состояние СМО.

Дисциплина обслуживания, обоснованная выше, обуславливает следующее поведение СМО при поступлении высокоприоритетной заявки:

с вероятностью $1 - \varphi_2(i)$ при $\varphi_2(i) \in [0; 1)$ вызов будет принят на обслуживание, что не повлияет на число установленных низкоприоритетных соединений для ПБД_{МОД}. Эта ситуация наблюдается при условии, если число свободных ресурсов больше или равно b_2 ЕКР, т. е. при $V - i \geq b_2$;

с вероятностью $1 - \varphi_2(i)$, при $\varphi_2(i) \in [0; 1)$ вызов будет принят на обслуживание только за счет прерывания

$\left\lfloor \frac{b_2 - (V - i)}{b_1} \right\rfloor$ установленных низкоприоритетных соединений для ПБД_{МОД}. Здесь $\lceil \cdot \rceil$ – округление к большему целому.

Эта ситуация наблюдается при условии, если число свободных ресурсов меньше числа b_2 ЕКР, требуемых для установления высокоприоритетного соединения для обслуживания ПБД_{ТУС}, т. е. при $V - i < b_2$;

если число ресурсов, не занятых обслуживанием высокоприоритетных соединений, меньше числа ЕКР b_2 , при $V - i_2 b_2 < b_2$, вызов будет потерян.

Поведение СМО при поступлении низкоприоритетного вызова ПБД_{МОД} можно описать следующим образом:

если число свободных ресурсов звена больше или равно b_1 ЕКР ($V - i \geq b_1$) вызов будет принят на обслуживание.

во всех остальных случаях вызов будет потерян.

Далее число заявок находящихся в момент времени t на обслуживании обозначено: $i_1(t)$ – для первого ($k = 1$) и $i_2(t)$ – для второго ($k = 2$) потоков. Двумерным случайным процессом $r(t) = (i_1(t), i_2(t))$, определённым на пространстве состояний $\Omega = \{(i_1, i_2) : i \leq V\}$, описывается характер изменения числа обслуживаемых заявок каждого из имеющихся потоков во времени. Соответствующая диаграмма переходов состояний СМО в указанном пространстве состояний [14] иллюстрируется рисунком 1. Далее для сокращения записи параметр времени будет опускаться.

4. Выходные параметры модели СМО с приоритетом, прерываниями и РКР

Исследования показали, что процесс $r(t)$ является марковским. Следовательно, он может быть исследован в стационарном режиме.

Далее принято, что $P(i_1, i_2)$ – есть стационарная вероятность того, что на обслуживании находятся ровно i_1 заявок на передачу ПБД_{МОД} и i_2 заявок ПБД_{ТУС}. Отсюда – значение вероятности $P(i_1, i_2)$ представляет собой долю времени пребывания звена в состоянии (i_1, i_2) .

Это утверждение позволяет определить выходные параметры модели – характеристики качества обслуживания поступающих потоков заявок (π_1 и π_2). Можно записать:

$$\pi_1 = \pi_{пт} + \pi_{пр}, \tag{6}$$

где $\pi_{пт}$ – вероятность потерь ПБД_{МОД} из-за занятости всего канального ресурса обслуживанием заявок потоков обоих типов. Эта вероятность определяется как отношение интенсивности потерянных заявок к интенсивности поступивших заявок

$$\pi_{пт} = \frac{\sum_{(i_1, i_2) \in B_1} P(i_1, i_2) \cdot (N_1 - i_1) \cdot \alpha_1}{\sum_{(i_1, i_2) \in \Omega} P(i_1, i_2) \cdot (N_1 - i_1) \cdot \alpha_1}, \tag{7}$$

где $B_1 = \{(i_1, i_2) \in \Omega : i + b_1 > V\}$; $\pi_{пр}$ – вероятность потерь ПБД_{МОД} из-за прерывания установленного соединения заявкой ПБД_{ТУС}. Эта вероятность определяется как отношение интенсивностей соответствующих событий. Если состояние СМО удовлетворяет условию $i_2 \cdot b_2 + b_2 \leq V$, то высокоприоритетная заявка будет принята к обслуживанию с вероятностью $1 - \varphi_2(i)$.

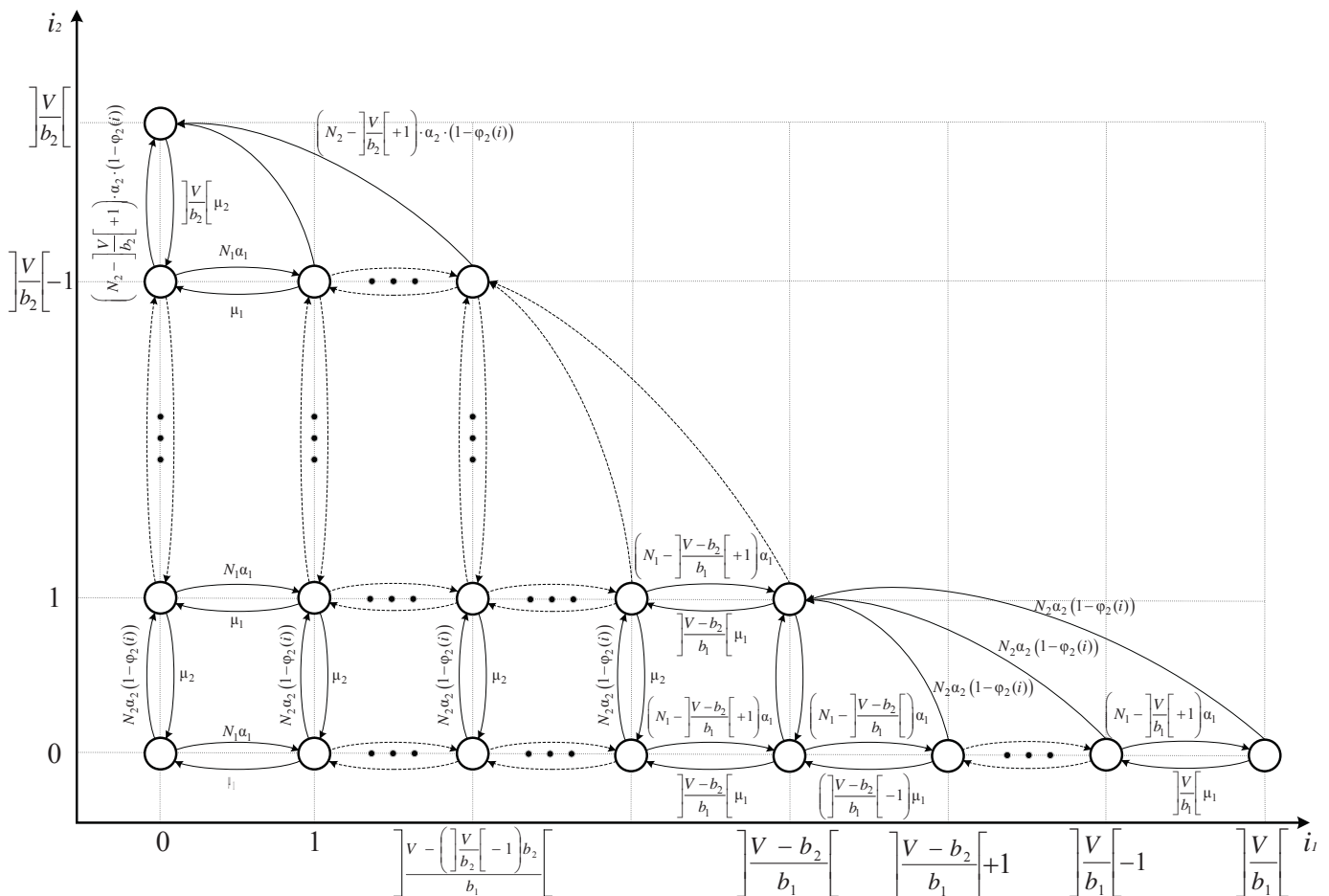


Рис. 1. Диаграмма состояний СМО с приоритетами и РКР в ходе переходов случайного процесса $r(t)$

При $i + b_2 > V$ происходит прерывание низкоприоритетных заявок для состояния (i_1, i_2) . Количество прерываемых заявок будет определяться для $\left\lceil \frac{b_2 - (V - i)}{b_1} \right\rceil$ выражением:

$$\pi_{np} = \frac{\sum_{(i_1, i_2) \in B_2} \left(\left\lceil \frac{b_2 - (V - i)}{b_1} \right\rceil \right) \cdot P(i_1, i_2) \cdot (N_2 - i_2) \cdot \alpha_2 \cdot (1 - \varphi_2(i))}{\sum_{(i_1, i_2) \in \Omega} P(i_1, i_2) \cdot (N_1 - i_1) \cdot \alpha_1}, \quad (8)$$

где $B_2 = \{(i_1, i_2) \in \Omega : V - i_1 \cdot b_1 < i_2 \cdot b_2 + b_2 \leq V\}$. Здесь π_2 – вероятность потерь ПБД_{ТУС} из-за занятости всего канального ресурса и с учетом РКР определяется по формуле:

$$\pi_2 = \pi_{nm2} + \pi_{\phi\delta}, \quad (9)$$

где π_{nm2} – вероятность потерь ПБД_{ТУС} из-за занятости всего канального ресурса обслуживанием заявок приоритетного потока. Эта величина определяется как отношение интенсивности потерянных заявок к интенсивности поступивших заявок

$$\pi_{nm2} = \frac{\sum_{(i_1, i_2) \in B_3} P(i_1, i_2) \cdot (N_2 - i_2) \cdot (1 - \varphi_2(i))}{\sum_{(i_1, i_2) \in \Omega} P(i_1, i_2) \cdot (N_2 - i_2) \cdot (1 - \varphi_2(i))}, \quad (10)$$

где $B_3 = \{(i_1, i_2) \in \Omega : i_2 \cdot b_2 + b_2 > V\}$. Здесь $\pi_{\phi\delta}$ – вероятность потерь ПБД_{ТУС} из-за функции блокировки:

$$\pi_{\phi\delta} = \sum_{(i_1, i_2) \in \Omega} P(i_1, i_2) \cdot \varphi_2(i). \quad (11)$$

Таким образом, получены выражения для оценки выходных параметров разрабатываемой модели – показателей качества обслуживания заявок. С учетом заданной функции блокировки для высокоприоритетного трафика эти формализмы позволяют определить отличия предлагаемой модели (с приоритетами и РКР) СПД с КП от существующих моделей с отказами и абсолютным приоритетом.

5. Ядро модели – система уравнений равновесия

Модель СМО $\bar{M}_i/n/\bar{M}_1/V/L/PRA$ в соответствии с целью моделирования и представленными выше входными и выходными параметрами, должна иметь теоретическое ядро, которым в предметной области считается система уравнений равновесия (СУР). Именно оно связывает значения стационарных вероятностей $P(i_1, i_2)$.

Правило статистического равновесия требует определения и суммирования интенсивностей поступления всех событий, которые выводят процесс $r(t)$ из произвольного состояния (i_1, i_2) [10, 12, 13]. Так, переход из состояния (i_1, i_2) наблюдается при наступлении следующих событий.

1. При поступлении заявки на передачу потока ПБД_{МОД}. Интенсивность события $(N_1 - i_1) \cdot \alpha_1$ при условии, что есть свободный ресурс для обслуживания поступившей заявки ($i + b_1 \leq V$). Переход происходит в состояние $(i_1 + 1, i_2)$.

2. При поступлении заявки на передачу потока ПБД_{ТУС}. Интенсивность события $(N_2 - i_2) \cdot \alpha_2 \cdot (1 - \varphi_2(i))$ при условии допуска заявки на обслуживание и значении функции блокировки $\varphi_2(i) \neq 1$. Это выполняется в двух случаях:

есть свободный ресурс для обслуживания поступившей заявки, т. е. $i + b_2 \leq V$. Тогда переход в состояние $(i_1, i_2 + 1)$;

свободных ресурсов меньше b_2 , т. е. $V - i < b_2$. Тогда происходит прерывание обслуживания $\left\lceil \frac{b_2 - (V - i)}{b_1} \right\rceil$ низкоприоритетных соединений, и осуществится переход в состояние $\left(i_1 - \left\lceil \frac{b_2 - (V - i)}{b_1} \right\rceil, i_2 + 1 \right)$.

3. Освобождение ресурса после обслуживания заявки на передачу потока ПБД_{МОД}. Интенсивность события $i_1 \cdot \mu_1$. При $i_1 > 0$ переход в состояние $(i_1 - 1, i_2)$.

4. Освобождение ресурса после обслуживания заявки на передачу потока ПБД_{ТУС}. Интенсивность события $i_2 \cdot \mu_2$. При $i_2 > 0$ переход в состояние $(i_1, i_2 - 1)$.

Переход $r(t)$ в заданное состояние (i_1, i_2) может произойти:

1. В результате поступления заявки на передачу потока ПБД_{МОД} из состояния $(i_1 - 1, i_2)$ с интенсивностью $(N_1 - i_1 + 1) \cdot \alpha_1$. Условием осуществления события является

$$0 < i_1 \leq \left\lceil \frac{V - i_2 \cdot b_2}{b_1} \right\rceil. \quad (12)$$

2. В результате поступления на передачу потока ПБД_{ТУС}. Это выполняется в двух случаях:

из состояния $(i_1, i_2 - 1)$ с интенсивностью $(N_2 - i_2 + 1) \cdot \alpha_2 \cdot (1 - \varphi_2(i))$. Должно выполняться условие:

$$0 < i_2 \leq \left\lceil \frac{V - i_1 \cdot b_1}{b_2} \right\rceil; \quad (13)$$

из состояний $(i_1 + k, i_2 - 1)$, где $k = 1, \left\lceil \frac{V - (i_2 - 1) \cdot b_2}{b_1} \right\rceil - i_1$,

с интенсивностью $(N_2 - i_2 + 1) \cdot \alpha_2 \cdot (1 - \varphi_2(i))$, в результате прерывания низкоприоритетной заявки. Должно выполняться условие: $i_2 > 0$ и $i_2 \cdot b_2 \leq V, i + b_1 > V$.

3. В результате окончания обслуживания заявки на передачу потока ПБД_{МОД} из состояния $(i_1 + 1, i_2)$ с интенсивностью $(i_1 + 1) \cdot \mu_1$. При этом должно выполняться условие: $i + b_1 \leq V$.

4. В результате окончания обслуживания заявки на передачу потока ПБД_{ТУС} из состояния $(i_1, i_2 + 1)$ с интенсивностью $(i_2 + 1) \cdot \mu_2$. При этом должно выполняться условие при $i + b_2 \leq V$.

Представленные выше выкладки позволяют записать СУР в виде:

$$\begin{aligned} & P(i_1, i_2) \cdot \left[(N_1 - i_1) \cdot \alpha_1 \cdot I(i + b_1 \leq V) + (N_2 - i_2) \cdot \alpha_2 \cdot (1 - \varphi_2(i)) \cdot I(i + b_2 \leq V) + \right. \\ & \left. + (N_2 - i_2) \cdot \alpha_2 \cdot (1 - \varphi_2(i)) \cdot I(i + b_2 > V, i_2 \cdot b_2 + b_2 \leq V) + \sum_{k=1}^{\left\lceil \frac{V - (i_2 - 1) \cdot b_2}{b_1} \right\rceil - i_1} i_k \cdot \mu_k \cdot I(i_k > 0) \right] = \\ & = P(i_1 - 1, i_2) \cdot (N_1 - i_1 + 1) \cdot \alpha_1 \cdot I\left(0 < i_1 \leq \left\lceil \frac{V - i_2 \cdot b_2}{b_1} \right\rceil\right) + \\ & + P(i_1, i_2 - 1) \cdot (N_2 - i_2 + 1) \cdot \alpha_2 \cdot (1 - \varphi_2(i - b_2)) \cdot I\left(0 < i_2 \leq \left\lceil \frac{V - i_1 \cdot b_1}{b_2} \right\rceil\right) + \\ & + P(i_1 + 1, i_2) \cdot (i_1 + 1) \cdot \mu_1 \cdot I(i + b_1 \leq V) + P(i_1, i_2 + 1) \cdot (i_2 + 1) \cdot \mu_2 \cdot I(i + b_2 \leq V) + \\ & + \sum_{k=1}^{\left\lceil \frac{V - (i_2 - 1) \cdot b_2}{b_1} \right\rceil - i_1} P(i_1 + k, i_2 - 1) \cdot (N_2 - i_2 + 1) \cdot \alpha_2 \cdot (1 - \varphi_2(i - b_2)) \cdot \end{aligned}$$

$$I(i_2 > 0, i_2 \cdot b_2 \leq V, i + b_1 > V), (i_1, i_2) \in \Omega. \quad (14)$$

где $I(\cdot)$ – индикаторная функция,

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

Условие нормировки, которое необходимо выполнить при решении СУР (14) имеет вид:

$$\sum_{(i_1, i_2) \in \Omega} P(i_1, i_2) = 1. \quad (15)$$

Влияние механизма прерывания в данной модели приводит к тому, что в данных условиях не выполняется критерий Колмогорова. Значит, процесс $r(t)$ не обладает свойством обратимости и распределение вероятностей состояний СМО не представимо в мультипликативном виде [12]. Это обуславливает необходимость решения СУР (14), например, итерационным методом Гаусса-Зейделя, общая схема применения которого изложена в [14].

6. Исследования выявленных закономерностей

Влияние механизмов РКР при обслуживании высокоприоритетного трафика как функцию от общего числа занятых канальных единиц целесообразно исследовать, варьируя значения вероятностей отказа. Для наглядности данные процедуры представлены на рисунках 2 и 3.

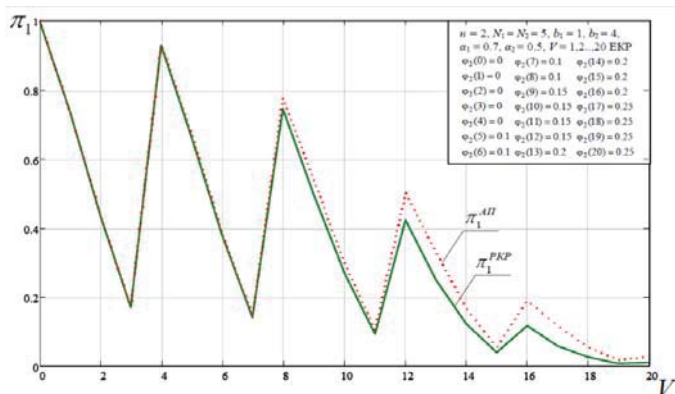


Рис. 2. График зависимости вероятности потерь ПБДМОД от объема канального ресурса известной и предлагаемой модели:

$\pi_1^{АП}$ – вероятности потерь ПБДМОД известной модели;
 $\pi_1^{РКР}$ – вероятности потерь ПБДМОД с учетом РКР

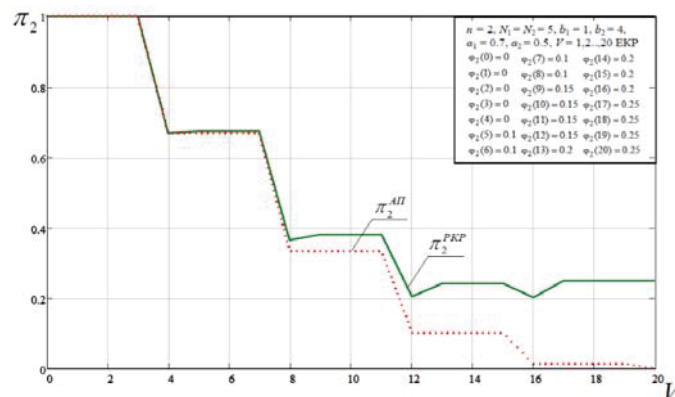


Рис. 3. График зависимости вероятности потерь ПБДТУС от объема канального ресурса известной и предлагаемой модели:

$\pi_2^{АП}$ – вероятности потерь ПБДТУС существующей модели;

$\pi_2^{РКР}$ – вероятности потерь ПБДТУС с учетом РКР

Из графиков видно, что имеет место локальное уменьшение вероятности потерь низкоприоритетных заявок. Оно объясняется вытеснением с обслуживания ресурсоемких заявок в соответствии с механизмами РКР, обусловленными значениями функции внутренней блокировки. Именно это позволяет устранить негативные последствия наблюдаемого ранее перераспределения канального ресурса СПД. В результате обеспечивается, во-первых, необходимый ресурс для передачи сообщений с характеристиками оператора КВО, а, во-вторых, поддерживается требуемое качество ТУС.

Формальное описание закономерностей зависимости параметров качества обслуживания ПБДТУС и ПБДМОД от параметров канального ресурса свидетельствует о достижении целей моделирования. Направлением дальнейших исследований в предметной области является поиск таких значений функций блокировок, при которых вероятность потерь низкоприоритетных заявок будет минимальной, а показатели качества обслуживания высокоприоритетных заявок останутся на требуемом уровне.

Заключение

Таким образом, в статье показаны результаты разработки новой математической модели СМО $M_i/\bar{M}_1/V/L/PRA$ с приоритетом и градиентным резервированием канального ресурса вида $\pi_k = F(Z_k, V, n)$. Получены выражения для расчета показателей качества обслуживания поступающих заявок различных приоритетов. Исследованы их зависимости от количества обслуживаемых приборов.

Рассмотренная модель совместно с существующими моделями СМО [12, 13, 20] позволит решать расчетные и исследовательские задачи по поиску рациональных проектных стратегий построения СПД с КП системы мониторинга КВО государства.

Литература

1. Федеральный закон РФ 68-ФЗ от 21.12.1994 (с изменениями от 8.03.2015) «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера». М.: Собрание законодательства РФ, 2017.
2. Постановление Правительства Российской Федерации от 14 августа 2020 г. № 1225 «Об утверждении правил разработки критериев отнесения объектов всех форм собственности к критически важным объектам». <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74423898>.
3. Распоряжение правительства Российской Федерации № 1314-Р от 27.08.2005 г. «Об одобрении Концепции федеральной системы мониторинга критически важных объектов и потенциально опасных объектов инфраструктуры». <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=84425>.
4. Васильев В. Информационная безопасность критически важных объектов // PC Week Review: ИТ-безопасность, сентябрь 2013.
5. Методические рекомендации по категорированию объектов критической информационной инфраструктуры, принадлежащих субъектам критической информационной инфраструктуры, функционирующим в сфере связи. М.: ОГО «АДЭ», 2019. 108 с.
6. Носов М.В., Басов О.О., Хахамов П.Ю. Повышение эффективности управления в условиях изменения

психофизиологического состояния персонала // Труды СПИИРАН. 2014. Вып. 3 (34). С. 112-135.

7. Саитов И.А., Басов О.О., Карпов А.А. Методологические основы синтеза полимодальных инфокоммуникационных систем государственного управления : монография. Орёл: Академия ФСО России, 2015. 263 с.

8. Саитов С.И. Многомодальная динамическая аутентификация технического персонала критически важных объектов // Современные материалы, техника и технологии. 2017. Вып. 4 (12). С. 36-39.

9. Басов О.О. Модели и метод синтеза полимодальных инфокоммуникационных систем: дис. док. техн. наук. Орел: Академия ФСО России, 2016. 292 с.

10. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. М.: Машиностроение, 1979. 432 с.

11. Evans J., Filsfils C. Deploying IP and MPLS QoS for Multiservice Networks. Theory and Practice, Morgan Kaufmann Publishers, 2007, 456 p.

12. Степанов С.Н. Основы телетрафика мультисервисных сетей. М.: Эко-Трендз, 2010. 392 с.

13. Саитов И.А., Трегубов Р.Б. Теоретические основы анализа и оптимизации иерархических многоуровневых маршрутизирующих систем : монография. Орёл: Академия ФСО России, 2017. 587 с.

14. Степанов С.Н. Теория телетрафика: концепции, модели, приложения. М.: Горячая линия – Телеком, 2015. 868 с.

15. Корнилов С.А., Королев А.В. Модель звена мультисервисной сети следующего поколения с приоритетной дисциплиной обслуживания // Журнал "Телекоммуникации". 2017. № 10. С. 35-42.

16. Концепция управления качеством связи в Российской Федерации. М.: Министерство связи и массовых коммуникаций Российской Федерации, 2015.

17. Андреев С.Ю., Трегубов Р.Б., Переверзев А.Н. Математическая модель транспортной сети связи с коммутацией пакетов, учитывающая особенности переноса трафика различного приоритета // Журнал "Телекоммуникации". 2019. № 8. С. 36-48.

18. Трегубов Р.Б., Андреев С.Ю., Тутов С.Ю. Задача выбора пропускных способностей каналов связи транспортной сети связи, учитывающей особенности переноса трафика различного приоритета // Информационные системы и технологии. 2019. №4 (114). С. 93-102.

19. Iversen V.B. Teletraffic Engineering and Network Planning. DTU Fotonik, 2015, 382 p.

20. Наумов В.А. Теория телетрафика мультисервисных сетей. М.: РУДН, 2007. 191 с.

MODELING OF A HETEROGENEOUS PACKET-SWITCHED DATA NETWORK AS A QUEUING SYSTEM WITH ABSOLUTE PRIORITY AND CHANNEL RESOURCE REDUNDANCY

Sergey I. Saitov, Federal State State Military Educational Institution of Higher Education "Academy of the Federal Service of the Protection of the Russian Federation", Orel, Russia, Sami.stv@mail.ru

Abstract

The article deals with the solution of a timely and relevant scientific and technical problem of modeling the data transmission network of a system for monitoring the state of critical state facilities. The need to develop a new model of such a data transmission network is due to the introduction of means of dynamic multimodal authentication of the legitimacy and deviance of the person of critical objects. Such authentication tools for the data transmission network become new sources of incoming load with special properties. For high-quality performance of the functions of monitoring a critical object, the article suggests a constructive approach to the development of a model of a heterogeneous packet-switched data transmission network, to which not only messages of traditional communication services, but also messages in a multimodal representation circulate. The protocol data blocks of multi-channel messages are small in size, but they must be transmitted to the management body of a critical object with high security requirements. In this regard, the object of modeling – a data transmission network with packet communication is represented as a queuing system with absolute priority and channel resource reservation. This approach avoids replacing more resource-intensive messages (traditional communication services) with less resource-intensive ones (messages in a multimodal representation) while meeting the quality of service requirements of both types of load. As a result of the simulation, expressions are obtained for calculating the quality of service indicators for incoming requests for messages of traditional communication services and messages in a multimodal representation. The proposed model, together with the existing models of queuing systems, will allow solving computational and research tasks to find rational design strategies for building data transmission networks with packet switching for monitoring critical state facilities.

Keywords: heterogeneous network, queuing system, capital resource, modeling, monitoring system.

References

1. Federal law of the Russian Federation 68-FZ dated 21.12.1994 (as amended on 8.03.2015) "On protection of population and territories from emergency situations of natural and technogenic character" Moscow: meeting of the legislation of the Russian Federation, 2017.
2. Resolution of the Government of the Russian Federation dated August 14, 2020 No. 1225 "On approval of rules for the development of criteria for classifying objects of all forms of ownership to critical facilities". <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74423898>.
3. Order of the Government of the Russian Federation No. 1314-R of 27.08.2005 "On Approval of the Concept of the Federal System for Monitoring Critical Facilities and Potentially Dangerous Infrastructure Facilities". <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=84425>.
4. V. Vasiliev (2013). Information security of critical objects. *PC Week Review: IT Security*, September 2013.
5. Methodological recommendations for the categorization of critical information infrastructure objects belonging to critical information infrastructure entities operating in the field of communications. Moscow: OGO "ADE", 2019. 108 p.
6. M.V. Nosov, O.O. Basov, P.Yu. Khakhamov (2014). Improving the efficiency of management in the conditions of changes in the psychophysiological state of personnel. *Trudy SPIIRAN*. Issue 3 (34). Pp. 112-135.
7. I. A. Saitov, O. O. Basov, A. A. Karpov. (2015). Methodological foundations of the synthesis of polymodal infocommunication systems of public administration: monograph. Orel : Academy of FSO of Russia. 263 p.
8. S.I. Saitov (2017). Multimodal dynamic authentication of mission critical technicians. *Modern materials, equipment and technologies*. Issue 4 (12). Pp. 36-39.
9. O.O. Basov (2016). Models and method of synthesis of polymodal infocommunication systems: dis. doc. tech. sciences. Orel : Academy of FSO of Russia. 292 p.
10. L. Kleinrock (1979). *Theory of Queuing*. Moscow: Mashinostroenie. 432 p.
11. J. Evans, C. Filsfils (2007). *Deploying IP and MPLS QoS for Multiservice Networks. Theory and Practice*, Morgan Kaufmann Publishers. 456 p.
12. S. N. Stepanov (2010). *Osnovy teletrafika multiservice networks*. Moscow: Eco-Trends. 392 p.
13. I. A. Saitov, R. B. Tregubov (2017). Theoretical foundations of analysis and optimization of hierarchical multilevel routing systems: monograph. Orel: Academy of the FSO of Russia. 587 p.
14. S. N. Stepanov (2015). *Teoriya teletrafika: kontseptsii, modeli, prikladniya*. Moscow: Goryachaya liniya, Telekom. 868 p.
15. S. A. Kornilov, A.V. Korolev (2017).. Model of a next-generation multiservice network link with priority service discipline. *Telecommunications*. Issue 10. Pp. 35-42.
16. *The concept of communication quality management in the Russian Federation*. Moscow: Ministry of Communications and Mass Communications of the Russian Federation, 2015.
17. S. Ju. Andreev, R. B. Tregubov, A.N. Pereverev (2019). Mathematical model of a packet-switched transport communication network, taking into account the peculiarities of carrying traffic of various priorities. *Telecommunications*. Issue 8. Pp. 36-48.
18. R. B. Tregubov, S. Ju. Andreev, S. Ju. Tutov (2019). The problem of choosing the bandwidth of communication channels of a transport communication network, taking into account the features of transferring traffic of various priorities. *Information systems and technologies*. Issue 8 (114). Pp. 93-102.
19. V. V. Iversen (2015). *Teletraffic Engineering and Network Planning*. DTU Fotonik, 382 p.
20. V. A. Naumov (2007). *Teoriya teletrafika multiservice networks*. Moscow: RUDN. 191 p.