

## Стохастические системы

© 2025 г. А.А. МАСЛОВ, канд. техн. наук (maslov.aa@mipt.ru),  
Г.В. СЕБЕКИН, канд. техн. наук (sebekin.gv@mipt.ru)  
(Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)),  
М.С. СТЕПАНОВ, канд. техн. наук (m.s.stepanov@mtuci.ru),  
С.Н. СТЕПАНОВ, д-р техн. наук (s.n.stepanov@mtuci.ru)  
(Московский технический университет связи и информатики),  
А.О. ЩУРКОВ (shchurkov.ao@mipt.ru)  
(Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет))

### МОДЕЛЬ ОБСЛУЖИВАНИЯ МУЛЬТИСЕРВИСНОГО ТРАФИКА В УЗЛЕ ДОСТУПА СПУТНИКОВОЙ СЕТИ СВЯЗИ С ДИНАМИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЕМОЙ СКОРОСТЬЮ ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ СЕРВИСОВ

В мультисервисных спутниковых сетях связи, как правило, существует возможность предоставления того или иного сервиса с различным качеством. При этом используются разные скорости передачи трафика. В лицензионных соглашениях может оговариваться, что конкретный сервис предоставляется с некоторой скоростью в течение основной части времени и допустимо снижение скорости до предельного порога в оставшееся время. При этом операторам сетей необходим математический аппарат, позволяющий оценить выполнение указанных в соглашениях требований, чтобы иметь представление, до каких пределов возможно расширение абонентской емкости сети. В статье разработана математическая модель совместного обслуживания в узлах доступа таких сетей трафика сервисов реального времени и эластичного трафика данных на основе формализации процесса функционирования сети с использованием аппарата многомерных ступенчатых марковских процессов. Приведены примеры решения задач определения требуемого ресурса на этапе планирования сети и оценки возможности расширения абонентской емкости сети при имеющемся ресурсе.

*Ключевые слова:* космические аппараты, каналный ресурс, мультисервисный трафик, трафик реального времени, эластичный трафик, многомерные ступенчатые марковские процессы.

**DOI:** 10.31857/S0005231025110044

#### 1. Введение

В мультисервисных спутниковых сетях связи (рис. 1), где роль узлов доступа абонентов к сервисам наземных сетей и Интернета играют центральные земные станции (ЦЗС) совместно с космическими аппаратами (КА), как

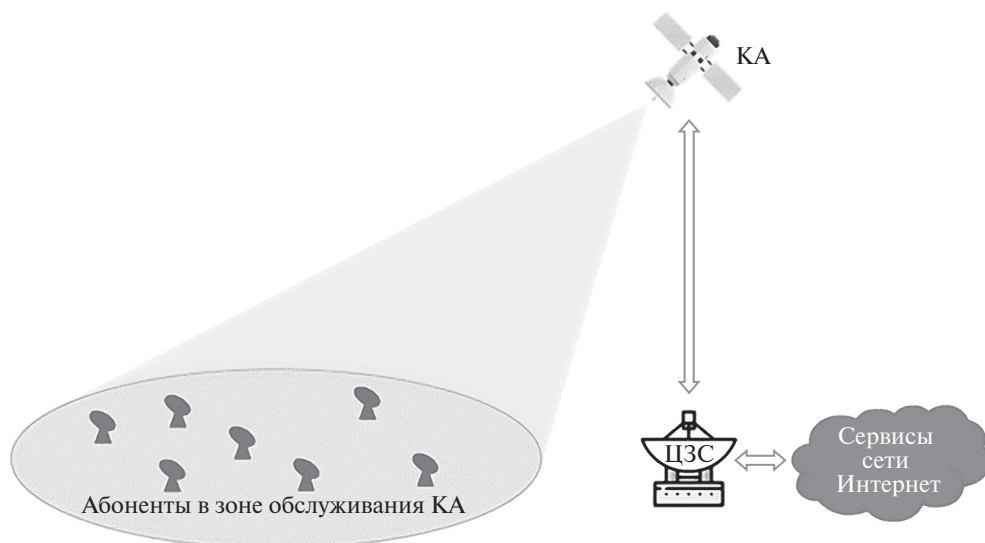


Рис. 1. Упрощенная схема мультисервисной спутниковой сети связи.

правило, существует возможность предоставления того или иного сервиса с различными скоростями передачи трафика. Чем выше скорость, тем лучше качество, например четче видеоизображение и т.п.

Поскольку пропускная способность спутниковых каналов ограничена, то при большом количестве одновременно обслуживаемых абонентов использование максимально высоких скоростей становится невозможным, и для части абонентов требуется снижение скорости. В лицензионных соглашениях (Service Level Agreement, SLA) может оговариваться, что конкретный сервис предоставляется с высокой скоростью в течение основной части времени и допустимо снижение скорости до минимального порога в оставшееся время. В этом случае операторам сетей необходим математический аппарат, позволяющий оценить выполнение указанных в SLA требований, чтобы понимать, до каких пределов возможно расширение абонентской емкости сети при заданных требованиях или когда дальнейшее расширение невозможно и требуется модернизация сети, корректировка нормативов, изменение тарифной политики и т.п.

В статье для решения этой задачи рассматривается узел доступа мультисервисной сети, в которой качество предоставления сервисов (Quality of Service, QoS) оценивается следующими показателями:

- высокие скорости передачи трафика каждого сервиса для обеспечения наилучшего качества;
- доли времени, в течение которых трафики сервисов передаются с высокими скоростями;
- минимально допустимые скорости передачи трафика для каждого сервиса в оставшееся время;

- доли потерянных заявок каждого типа вследствие недостаточности ресурса;
- среднее время доставки файла.

Полагается, что в сети обслуживается  $K$  типов трафика сервисов реального времени (РВ) и эластичный трафик сервисов передачи данных. Ресурс для обслуживания заявок на получение сервисов выделяется в виде целого числа квантов скорости. Квант  $\Delta v$  измеряется в бит/с. Для организации работы сети в составе ЦЗС есть система управления связью, которая реализует правила, позволяющие однозначно определить, каким образом назначается и перераспределяется ресурс при поступлении и завершении обслуживания заявок с учетом текущего состояния сети. Считается, что прием заявки на обслуживание осуществляется, если ресурса будет достаточно для обслуживания всех заявок хотя бы на минимальных скоростях. Оставшийся ресурс используется для назначения высоких скоростей обслуживания для части или всех заявок с учетом важности соответствующих типов сервисов и объема указанного оставшегося ресурса. Остатки ресурса, при их наличии, направляются на повышение скорости эластичного трафика. Поэтому для эластичного трафика заданные в SLA высокие и минимальные скорости фактически являются гарантированными и могут быть превышены. Кроме того, если для трафика РВ продолжительность сессии не зависит от скорости, то время доставки файлов с увеличением скорости снижается.

Целью настоящей статьи является разработка математической модели узла доступа мультисервисной спутниковой сети, учитывающей возможности изменения скоростей передачи трафика отдельных сервисов и позволяющей оценить перечисленные выше показатели качества обслуживания трафика каждого типа.

Моделирование мультисервисных сетей, как правило, осуществляется в предположении, что потоки заявок в сети являются пуассоновскими, а продолжительности обслуживания распределены по экспоненциальному закону. Это позволяет строить аналитические модели с использованием аппарата многомерных ступенчатых марковских процессов. Разработке моделей мультисервисных сетей посвящен широкий круг работ. При этом фундаментальные результаты приведены, например, в [1–5]. Получено большое количество результатов для сетей различного назначения [6–23], в том числе, и для мультисервисных спутниковых сетей [16–23], включая сети на базе КА на геостационарной и высокоэллиптической орбитах [16–19, 22], а также на низких круговых орбитах [20, 21]. Хотя фактор изменения скорости передачи в большинстве работ учитывался только для эластичного трафика, но и для трафика реального времени возможности перестройки скорости в некотором диапазоне также рассматривались, например в [15]. Однако при этом учитывались отличные от перечисленных выше показатели качества. Так в [15] целью является анализ средней скорости передачи данных видеоконференций. Поэтому задача моделирования узла доступа сети является актуальной.

Для достижения поставленной цели в разделе 2 дается описание модели, в разделе 3 формируется и решается система уравнений равновесия марковского процесса, описывающего динамику изменения состояний сети, и получаются соотношения для расчета показателей качества. В разделе 4 проводится численный анализ характеристик модели.

## 2. Описание модели

В рассматриваемой сети передача трафика сервисов реального времени (речевой информации, данных видеоконференцсвязи и др.) в зависимости от типа сервиса может осуществляться на высоких скоростях  $V_k$ ,  $k = 1, \dots, K$ , предусмотренных в SLA, и на отдельных интервалах времени при большом количестве активных абонентов на минимально допустимых скоростях  $V'_k$ . Передача файлов производится в рамках эластичного трафика и может выполняться в течение основной части времени со скоростью не ниже гарантированно высокой  $V_e$  и в остальное время – со скоростью не ниже минимально допустимой  $V'_e$ .

Пусть  $b_k = \lceil V_k / \Delta v \rceil$ ,  $k = 1, \dots, K$  и  $b_e = \lceil V_e / \Delta v \rceil$  – ресурсы, выраженные целым числом используемых квантов скорости и требуемые для передачи трафика РВ и эластичного трафика на высоких скоростях  $V_k$  или  $V_e$ . Отметим, что ресурс на передачу данных одним абонентом может быть и более  $b_e$ . Пусть  $b'_k = \lceil V'_k / \Delta v \rceil$ ,  $k = 1, \dots, K$  и  $b'_e = \lceil V'_e / \Delta v \rceil$  – ресурсы, соответствующие минимальным скоростям  $V'_k$  или  $V'_e$ . Здесь также ресурс на передачу данных одним абонентом может быть и более  $b'_e$ .

Сервис РВ с номером  $k = 1, \dots, K$  получают  $N_k$  абонентов. Время обслуживания заявки на получение сервиса является экспоненциально распределенной случайной величиной с параметром  $\mu_k$ . После завершения обслуживания заявки новая заявка от этого абонента возникает также через случайное время, имеющее экспоненциальное распределение с параметром  $\beta_k$ . Соответствующие параметры для эластичного трафика обозначим через  $N_e$  и  $\beta_e$ , а  $\mu_e$  – параметр экспоненциального распределения времени передачи файла при выделении ресурса  $b_e$ .

Введем обозначения для показателей качества. Пусть  $P_k$ ,  $k = 1, \dots, K$ , и  $P_e$  – доли времени, в течение которого трафик каждого сервиса РВ передается на высокой скорости, а эластичный трафик данных на скорости, не менее гарантированной высокой. Пусть  $\pi_k$ ,  $k = 1, \dots, K$ , и  $\pi_e$  – доли потерянных заявок на предоставление сервисов, которые получили отказ ввиду недостаточности свободного ресурса при их поступлении,  $W$  – среднее время доставки файла и  $v$  – общий ресурс сети, которым управляет узел доступа.

Динамика изменения состояния сети описывается случайным процессом  $r(t) = (i_1(t), \dots, i_K(t), d(t))$ , где  $i_k(t)$  – число обслуживаемых заявок на предоставление сервиса  $k$  и  $d(t)$  – число обслуживаемых заявок на передачу данных в момент времени  $t$ . Процесс определен на пространстве состояний  $S$ , ку-

да входят состояния  $s = (i_1, \dots, i_K, d)$  с целочисленными неотрицательными компонентами, каждая из которых не превышает количество абонентов, получающих соответствующий сервис. Пространство  $S$  можно записать в виде

$$(1) \quad S = \left\{ (i_1, \dots, i_K, d) : N_k \geq i_k \geq 0, k = 1, \dots, K; N_e \geq d \geq 0; \sum_{k=1}^K i_k b'_k + db'_e \leq v \right\}.$$

В этом пространстве можно выделить подмножества состояний  $U_k$ ,  $k = 1, \dots, K$ , и  $U_e$ , в которых поступающие заявки на передачу каждого типа трафика реального времени и трафика данных получают отказ из-за недостаточности ресурса на их обслуживание. Указанные подмножества определяются следующим образом:

$$(2) \quad U_k = \left\{ (i_1, \dots, i_K, d) : (i_1, \dots, i_K, d) \in S, \left( \sum_{k=1}^K i_k b'_k + db'_e > v - b'_k \right) \cup (i_k = N_k) \right\},$$

$$(3) \quad U_e = \left\{ (i_1, \dots, i_K, d) : (i_1, \dots, i_K, d) \in S, \left( \sum_{k=1}^K i_k b'_k + db'_e > v - b'_e \right) \cup (d = N_e) \right\}.$$

Для управления работой сети оператору необходимо иметь правило  $f(s)$ , однозначно определяющее для каждого состояния сети  $s \in S$  количество заявок каждого типа  $i_k^{(h)}$  из  $i_k$ ,  $k = 1, \dots, K$ , и  $d^{(h)}$  из  $d$ , которое будет обслуживаться на высокой скорости.

Здесь необходимо иметь в виду, что в разных сетях свои перечни предоставляемых сервисов, и важность каждого сервиса определяется оператором с учетом целевых задач, решаемых сетью. Поэтому выбор правила  $f(s)$  назначения ресурса имеет качественный характер, и в статье не рассматривается. Будем лишь полагать, что:

- прерывание обслуживания заявок недопустимо;
- все заявки одного типа имеют равную ценность;
- при применении правила ресурс для передачи трафика на высокой скорости назначается для обслуживания заявок в порядке убывания важности их типов, т. е. сначала для заявок наиболее важного типа, потом следующего по важности типа и т. д.

Правило  $f(s)$  отрабатывается при изменениях состояний сети и включает три этапа:

- на первом этапе определяется, достаточно ли ресурса для обслуживания всех заявок хотя бы на минимальных скоростях;

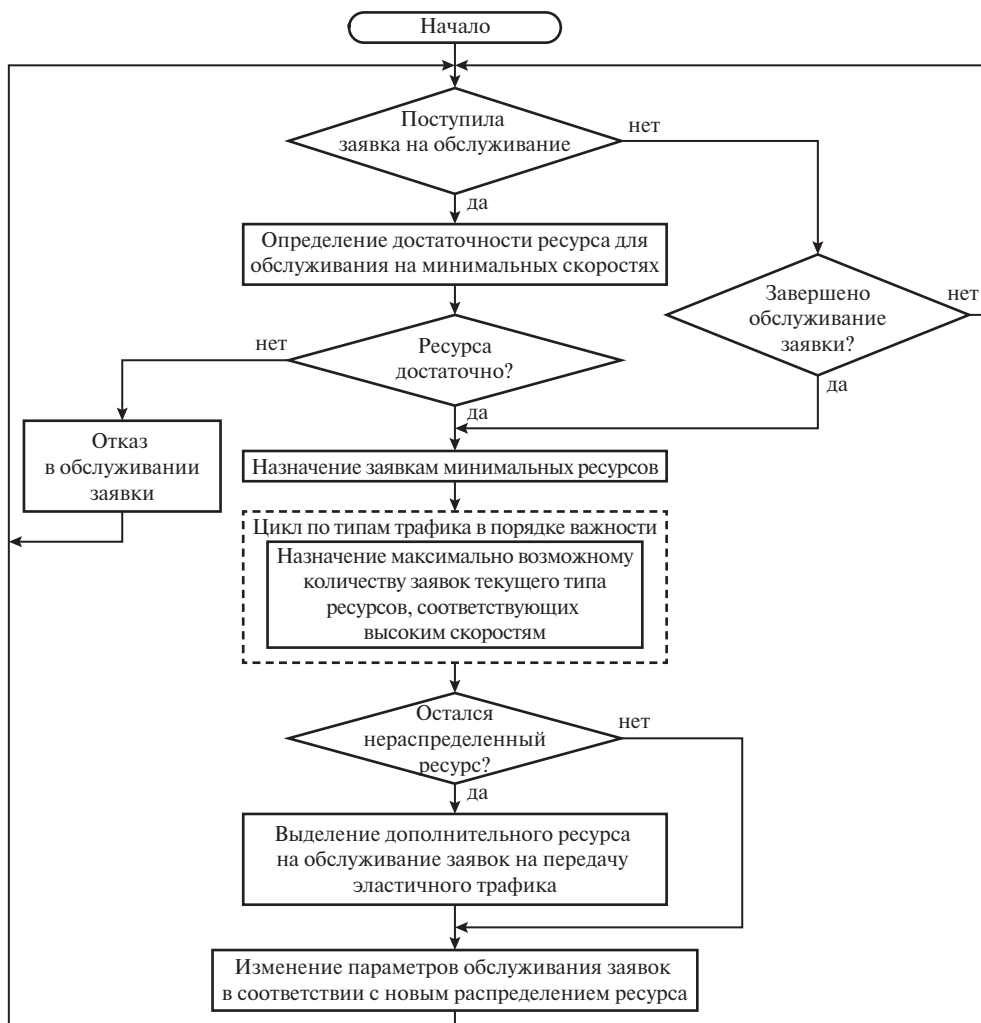


Рис. 2. Укрупненный алгоритм применения правила назначения ресурса.

- если ресурса достаточно, на втором этапе производится назначение высоких скоростей для обслуживания заявок с учетом объема свободного ресурса и важности типов сервисов;
- если имеются остатки свободного ресурса, они направляются на увеличение скорости передачи эластичного трафика.

Укрупненный алгоритм применения правила иллюстрируется рис. 2. Комментируя алгоритм, отметим, что, если после выполнения второго этапа остались заявки, обслуживаемые на минимальных скоростях, ни для одной из них невозможно увеличение скорости до высокой. Выделение дополнительного ресурса для обслуживания заявок, трафик которых уже передается на высокой скорости, не имеет смысла. Поэтому остатки ресурса, если они есть, на третьем этапе направляются на повышение скорости передачи эластично-

го трафика. Отметим также, что в случае поступления заявок на передачу трафика важных типов назначение ресурса для них будет осуществляться раньше, и для заявок менее важных типов при недостаточности ресурса может быть снижена скорость с высокой до минимальной, т.е. будет иметь место перераспределение ресурса, используемого для обслуживания разных типов трафика.

Возможный пример такого правила рассматривается в разделе 4 при проведении численного анализа.

Введем вектор  $s^{(h)} = (i_1^{(h)}, \dots, i_K^{(h)}, d^{(h)})$ . Тогда  $s^{(h)} = f(s)$ . Очевидно, после назначения высоких скоростей обслуживания заявок должно выполняться ограничение по ресурсу, более жесткое по сравнению с соответствующим ограничением в выражении (1):

$$(4) \quad v_{\min} = \sum_{k=1}^K \left[ (i_k - i_k^{(h)}) b'_k + i_k^{(h)} b_k \right] + (d - d^{(h)}) b'_e + d^{(h)} b_e \leq v.$$

Если в сети обслуживаются заявки на передачу данных, т.е.  $d > 0$ , и в выражении (4)  $v_{\min} < v$ , то на третьем этапе отработки правила  $f(s)$  остаток ресурса в объеме  $v - v_{\min}$  направляется на обслуживание этих заявок. В итоге суммарный ресурс, выделяемый на обслуживание заявок на передачу данных при условии  $d > 0$ , равен

$$(5) \quad v_e(s, s^{(h)}) = v - v_{\min} + (d - d^{(h)}) b'_e + d^{(h)} b_e,$$

а суммарная интенсивность обслуживания таких заявок равна

$$(6) \quad \mu_{et}(s, s^{(h)}) = \frac{v_e(s, s^{(h)}) \mu_e}{b_e}.$$

При наступлении событий, изменяющих состояние сети, для нового состояния  $s$  осуществляется вычисление  $s^{(h)} = f(s)$  и производится перераспределение ресурса между заявками, а выражение (6) определяет интенсивность  $\mu_{et}(s, s^{(h)})$  выхода из состояния  $s$  по событию завершения передачи файла.

### 3. Система уравнений равновесия и показатели обслуживания заявок

Обозначим через  $p(s)$  вероятность нахождения сети в состоянии  $s \in S$ , а через  $P(s)$  ненормированную вероятность указанного состояния. Ненормированные вероятности используются в итерационных методах решения систем уравнений равновесия (СУР). Связь  $p(s)$  и  $P(s)$  с учетом условия нормировки следующая:

$$(7) \quad p(s) = \frac{P(s)}{\sum_{s \in S} P(s)}.$$

СУР имеет вид:

$$\begin{aligned}
 & P(i_1, \dots, i_K, d) \left[ \sum_{k=1}^K (\beta_k (N_k - i_k) I((i_1, \dots, i_K, d) \in S \setminus U_k) + i_k \mu_k) + \right. \\
 & \left. + \beta_e (N_e - d) I((i_1, \dots, i_K, d) \in S \setminus U_e) + \mu_{et} \left( s, s^{(h)} \right) I(d > 0) \right] = \\
 (8) \quad & = \sum_{k=1}^K [P(i_1, \dots, i_k - 1, \dots, i_K, d) \beta_k (N_k - i_k + 1) I(i_k > 0) + \\
 & + P(i_1, \dots, i_k + 1, \dots, i_K, d) (i_k + 1) \mu_k I((i_1, \dots, i_K, d) \in S \setminus U_k)] + \\
 & + I(d > 0) P(i_1, \dots, i_K, d - 1) \beta_e (N_e - d + 1) + \\
 & + P(i_1, \dots, i_K, d + 1) \mu_{et} \left( s_d, s_d^{(h)} \right) I((i_1, \dots, i_K, d) \in S \setminus U_e), \\
 & (i_1, \dots, i_K, d) \in S.
 \end{aligned}$$

Система уравнений (8) является однородной, и единственность решения обеспечивается благодаря добавлению к ней условия нормировки (7). Здесь  $s_d = (i_1, \dots, i_K, d + 1)$  и  $s_d^{(h)} = f(s_d)$ . Интенсивности  $\mu_{et}(s, s^{(h)})$  и  $\mu_{et}(s_d, s_d^{(h)})$  вычисляются в соответствии с соотношениями (5) и (6). Также используется индикаторная функция  $I$  (условие  $A$ ), равная единице, если условие выполняется, и нулю в противном случае.

Система уравнений (8) может быть решена численно. Хорошо зарекомендовал себя при решении подобных СУР метод Гаусса–Зейделя, описанный в [1] и использованный в ряде работ, например в [16–20]. Указанный метод применяется также для получения численных результатов в разделе 4.

Далее перейдем к получению соотношений для вычисления показателей качества обслуживания трафика, интерпретируя вероятности состояний  $p(s)$ ,  $s \in S$ , долей времени, в течение которого сеть пребывает в соответствующих состояниях, т.е. за достаточно большой интервал времени  $T$  сеть пребывает в состоянии  $s$  примерно время  $Tp(s)$ . Суммарное время обслуживания  $i_k$ ,  $k = 1, \dots, K$ , заявок на предоставление  $k$ -го сервиса РВ в этом состоянии составляет  $i_k Tp(s)$ . При этом вектор количеств заявок, обслуживавшихся на высоких скоростях, определяется в виде  $s^{(h)} = f(s)$ , и суммарное время обслуживания  $i_k^{(h)} \leq i_k$  заявок составляет  $i_k^{(h)} Tp(s)$ . Следовательно, доли времени, в течение которого трафик каждого сервиса передается на высокой скорости, определяются в виде

$$(9) \quad P_k = \frac{\sum_{s \in S} i_k^{(h)} p(s)}{\sum_{s \in S} i_k p(s)}, \quad k = 1, \dots, K.$$

Аналогично для заявок на передачу данных имеем:

$$(10) \quad P_e = \frac{\sum_{s \in S} d^{(h)} p(s)}{\sum_{s \in S} d p(s)}.$$

Поскольку входной трафик в рассматриваемой сети зависит от ее состояния  $s$ , то долю заявок на передачу трафика каждого типа, потерянных из-за отсутствия свободного канального ресурса, следует оценивать как отношение интенсивности потерянных заявок соответствующего потока к интенсивности поступивших заявок этого потока [1]. Для заявок на обслуживание трафика РВ  $k$ -го типа получаем

$$(11) \quad \pi_k = \frac{\sum_{s \in U_k} (p(s) (N_k - i_k))}{\sum_{s \in S} (p(s) (N_k - i_k))}, \quad k = 1, \dots, K,$$

и для заявок на передачу данных

$$(12) \quad \pi_e = \frac{\sum_{s \in U_e} (p(s) (N_e - d))}{\sum_{s \in S} (p(s) (N_e - d))}.$$

Среднее время доставки файла  $W$  может быть определено с использованием формулы Литтла как отношение среднего количества одновременно обслуживаемых в сети заявок на передачу данных  $y_e$  к интенсивности  $\lambda_e$  потока таких заявок, принятых на обслуживание, и равно

$$(13) \quad W = \frac{y_e}{\lambda_e},$$

$$(14) \quad y_e = \sum_{s \in S} dp(s),$$

$$(15) \quad \lambda_e = \beta_e \sum_{s \in S \setminus U_e} p(s) (N_e - d).$$

#### 4. Численный анализ характеристик модели

В качестве примера для численного анализа рассмотрим трехсервисную сеть маломощных мобильных абонентских терминалов на базе КА с высокой пропускной способностью [16, 17], обслуживающую два типа трафика РВ и эластичный трафик данных. Характеристики трафика представлены в таблице.

Правило  $f(s)$  назначения высоких скоростей исходит из того, что обеспечение высокой скорости при обслуживании заявок на передачу данных важнее, чем для трафика РВ второго типа, а трафик РВ первого типа не нуждается в повышении скорости, поэтому  $b_1 = b'_1$ . При этом  $f(s)$  предусматривает:

- определение, достаточно ли ресурса для обслуживания всех заявок при выделении им ресурсов  $b'_1$ ,  $b'_2$  и  $b'_e$ ;
- если ресурса достаточно и есть остаток, назначение ресурсов  $b_e$  по возможности большему количеству заявок на передачу данных;
- если всем заявкам на передачу данных назначен ресурс  $b_e$  и есть остаток, назначение ресурсов  $b_2$  по возможности большему количеству заявок на передачу трафика РВ второго типа;

Параметры системы

Параметр	Значение
Ресурс на обслуживание заявки на сервис РВ первого типа, $b_1/b'_1$	1/1
Ресурс на обслуживание заявки на сервис РВ второго типа, $b_2/b'_2$	8/4
Ресурс на обслуживание заявки на передачу данных, $b_e/b'_e$	8/4
Количество пользователей сервиса РВ первого типа, $N_1$	150
Количество пользователей сервиса РВ второго типа, $N_2$	60
Количество пользователей сервисов передачи данных, $N_e$	120
Интенсивность обслуживания заявок на сервис РВ первого типа, $\mu_1$	0,3 мин <sup>-1</sup>
Интенсивность обслуживания заявок на сервис РВ второго типа, $\mu_2$	0,15 мин <sup>-1</sup>
Интенсивность обслуживания заявок на ПД при выделении ресурса $b_e, \mu_e$	1,2 мин <sup>-1</sup>
Параметр экспоненциального распределения времени до поступления заявок первого типа, $\beta_1$	0,06 мин <sup>-1</sup>
Параметр экспоненциального распределения времени до поступления заявок второго типа, $\beta_2$	0,009 мин <sup>-1</sup>
Параметр экспоненциального распределения времени до поступления заявок на ПД, $\beta_e$	0,3 мин <sup>-1</sup>
Доля времени, в течение которого трафик сервисов РВ передается с заданной высокой скоростью, $P_k, k = 1, 2$ , не менее	0,9
Доля времени, в течение которого трафик сервисов передачи данных передается со скоростью, не ниже заданного порога, $P_e$ , не менее	0,9
Предельно допустимые доли потерянных заявок каждого типа вследствие недостаточности ресурса	0,01
Среднее время доставки файла, не более	0,5 мин

- если снова имеется остаток свободного ресурса и есть заявки на передачу данных, назначение указанного свободного ресурса для повышения скорости обслуживания этих заявок.

Использование описанного правила  $f(s)$  для  $v = 33$  и  $s = (2, 2, 2)$  иллюстрируется рис. 3. На первом шаге установлено, что ресурса достаточно для обслуживания всех заявок на минимальной скорости и есть некоторый остаток ресурса, т.е.  $2b'_1 + 2b'_2 + 2b'_e = 18$  и остаток ресурса равен 15 квантам. На втором шаге осуществляется проверка, можно ли обеспечить повышение скорости для заявок на передачу данных, и подтверждается такая возможность. Каждой заявке на передачу данных выделяется ресурс  $b_e$ . Остаток ресурса уменьшается на восемь и составляет теперь семь квантов. На третьем шаге определено, что повышение скорости возможно только для одной заявки второго типа, и остатка ресурса недостаточно для повышения скорости для второй заявки. Соответственно, ресурс одной заявки второго типа увеличится до восьми квантов, а остаток ресурса уменьшится до трех квантов. Этот оставшийся ресурс отдается на обслуживание заявок на передачу данных на четвертом шаге. В итоге суммарный ресурс заявок на передачу данных

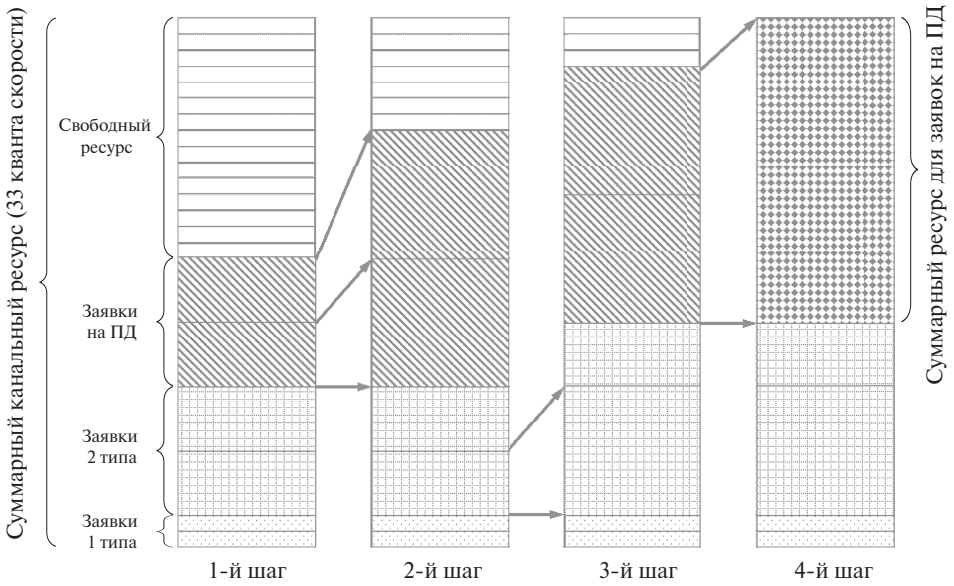


Рис. 3. Пример применения правила назначения ресурса для трехсервисной сети.

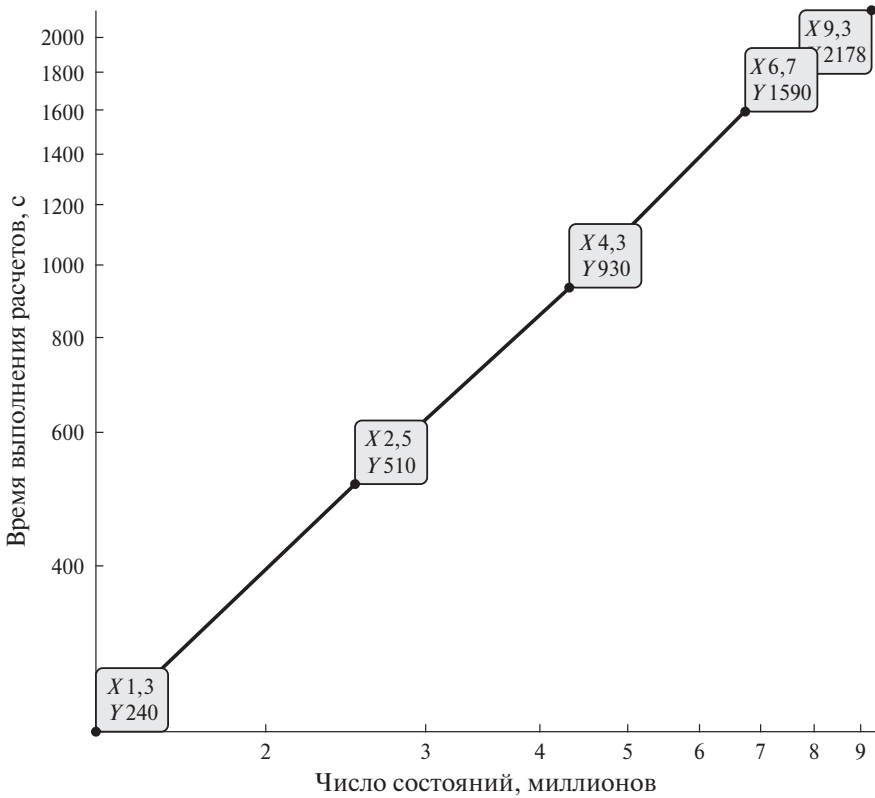


Рис. 4. Зависимость времени выполнения расчетов от числа состояний сети  $N_{\text{сост}}$ .

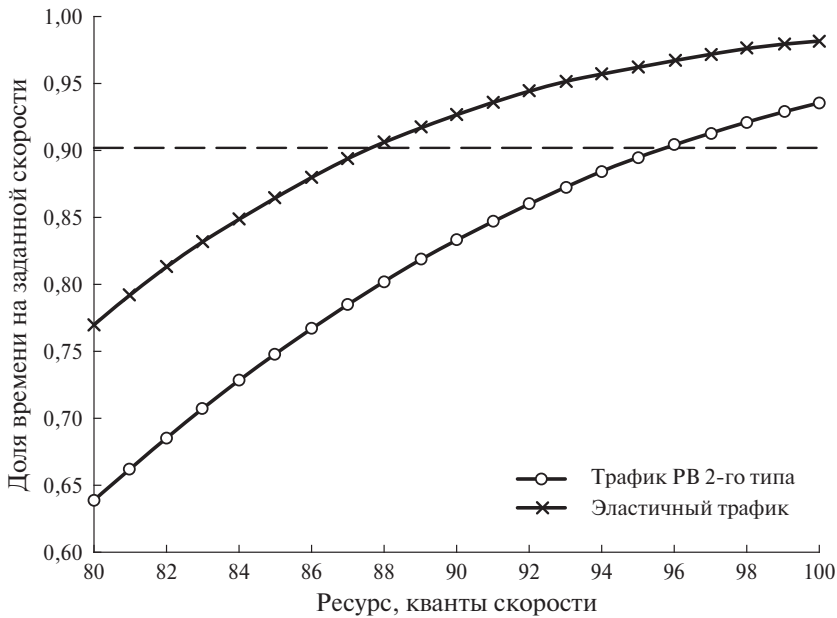


Рис. 5. Зависимости от ресурса  $v$  доли времени  $P_2$ , в течение которого трафик РВ второго типа передается с заданной высокой скоростью, и доли времени  $P_e$ , в течение которого трафик сервисов передачи данных передается со скоростью, не ниже заданного порога.

составит  $2b_e + 3 = 19$  квантов скорости. Для распределения ресурса между этими заявками могут использоваться известные подходы, описанные в [1], например водоналивной алгоритм.

Следует отметить, что предложенное правило является лишь частным примером. В некоторых источниках, например в [24], рассматриваются и другие правила.

Для проведения численного анализа разработан сценарий для среды Matlab, обеспечивающий по набору характеристик сети формирование СУР, ее решение методом Гаусса–Зейделя, а также вычисление показателей качества. Проведена оценка возможности решения СУР большой размерности, иллюстрируемая рис. 4.

Зависимость времени выполнения расчетов от числа состояний  $N_{\text{сост}}$  является монотонно возрастающей, практически линейной. При  $N_{\text{сост}} \approx 9,3$  миллиона время составило около 36 мин.

Как отмечено в разделе 1, интерес для оператора могут представлять как задача определения требуемого ресурса на этапе планирования сети, так и задача оценки возможности расширения абонентской емкости сети при имеющемся ресурсе.

При решении первой задачи строятся зависимости от ресурса показателей качества обслуживания трафика, иллюстрируемые рис. 5, 6, 7.

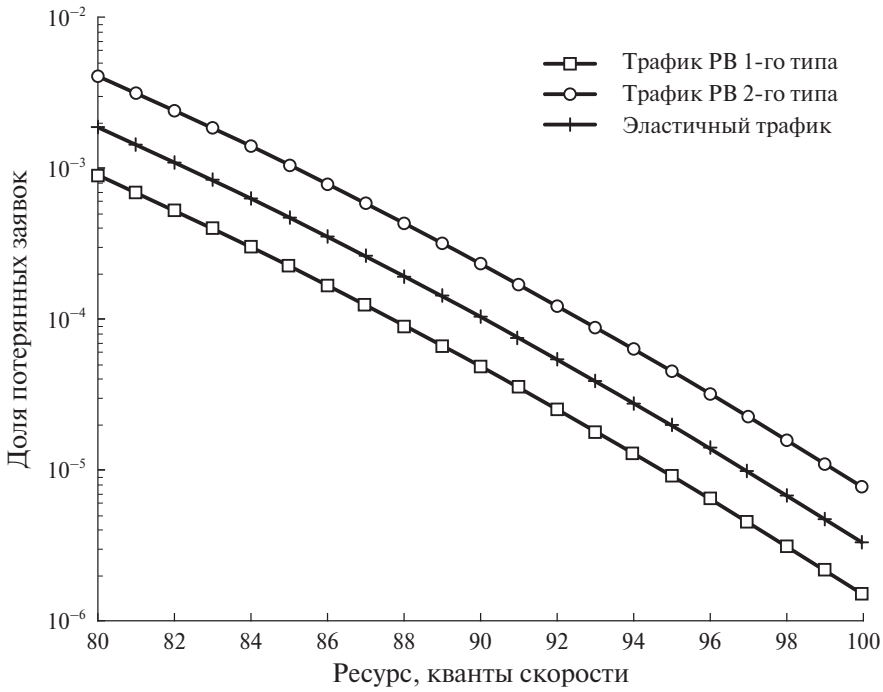


Рис. 6. Зависимости от ресурса  $v$  доли потерянных заявок каждого типа вследствие недостаточности ресурса  $\pi_k$ ,  $k = 1, 2$  и  $\pi_e$ .

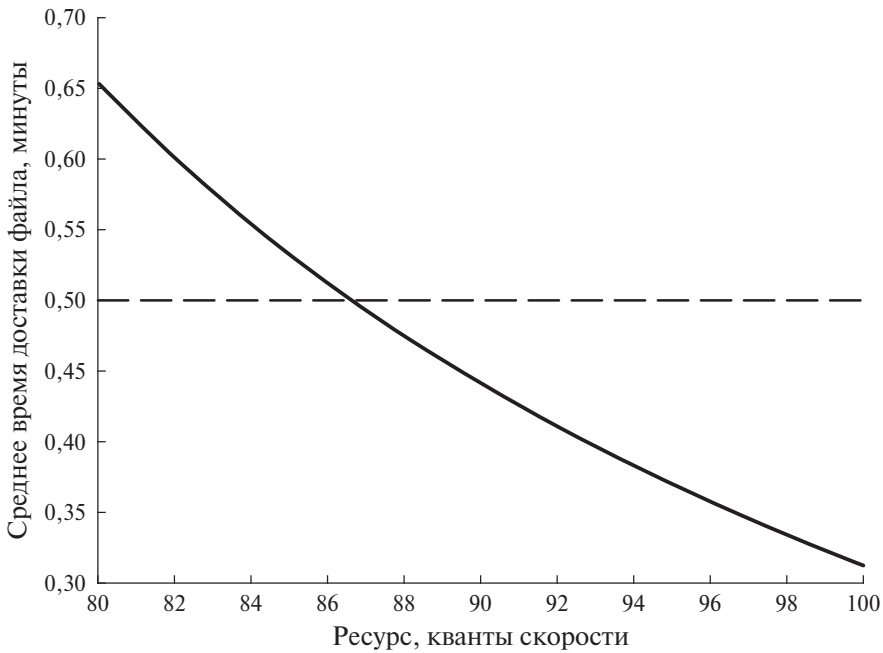


Рис. 7. Зависимости от ресурса  $v$  среднего времени доставки файла  $W$ .

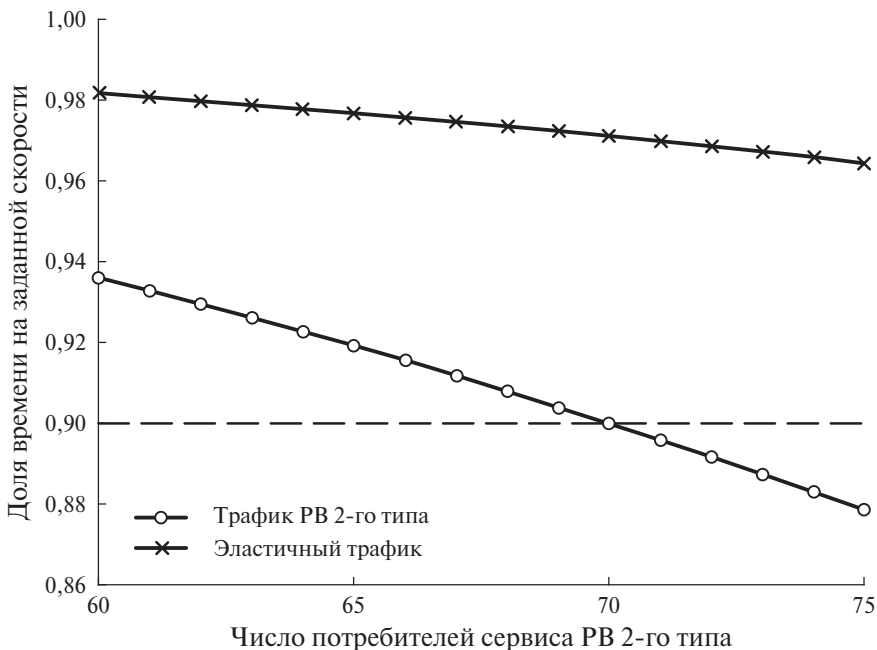


Рис. 8. Зависимости от количества потребителей сервиса второго типа  $N_2$  доли времени  $P_2$ , в течение которого трафик РВ второго типа передается с заданной высокой скоростью, и доли времени  $P_e$ , в течение которого трафик сервисов передачи данных передается со скоростью, не ниже заданного порога.

Из рис. 5 видно, что значение  $P_2$  не ниже 0,9 обеспечивается при ресурсе  $v \geq 96$ , а значение  $P_e$  – при ресурсе  $v \geq 88$ . Для всех значений  $v$  в диапазоне от 80 до 100, как следует из рис. 6, ограничение по предельной доле потерянных заявок выполняется с большим запасом. В соответствии в рис. 7 для выполнения ограничения по среднему времени доставки файла необходим ресурс  $v \geq 87$ . Таким образом, все ограничения выполняются при ресурсе сети  $v \geq 96$ . Минимально необходимый объем ресурса сети равен 96 квантам скорости.

Оценку возможности расширения сети проведем на примере увеличения количества потребителей сервиса РВ второго типа. Примем, что сеть – с ресурсом  $v = 100$  и параметры трафика – согласно таблице с тем отличием, что оценивается возможность увеличения параметра  $N_2$  и он варьируется в диапазоне от 60 до 75. Результаты расчета показателей  $P_2$  и  $P_e$  представлены на рис. 8. Видно, что с увеличением  $N_2$  значения показателей  $P_2$  и  $P_e$  уменьшаются. При этом величина  $P_e$  остается в заданных пределах, а для  $P_2$  ограничение выполняется лишь при  $N_2 \leq 70$ .

Таким образом, сеть допускает увеличение количества потребителей сервиса РВ второго типа до 70 без изменения объема ресурса. Если количество потребителей превысит 70, то для выполнения заданных ограничений по значениям показателей качества потребуется наращивание ресурса сети.

## 5. Заключение

Для узла доступа спутниковой мультисервисной сети связи с динамически изменяемой скоростью передачи, где одним из показателей качества является доля времени, в течение которого каждый сервис предоставляется с высокой скоростью, построена модель совместного обслуживания трафика сервисов реального времени и эластичного трафика данных на основе формализации процесса функционирования сети с использованием аппарата многомерных ступенчатых марковских процессов. Получены соотношения для расчета показателей QoS. Программная реализация модели основана на решении систем уравнений равновесия марковских процессов с использованием итерационного метода Гаусса–Зейделя и обеспечивает оценку показателей при большой размерности сети, что подтверждено численными экспериментами при количестве состояний сети до десяти миллионов. Приведены примеры использования модели для решения задачи определения требуемого ресурса на этапе планирования сети и задачи оценки возможности расширения абонентской емкости сети при имеющемся ресурсе. Модель может быть использована при разработке программного обеспечения систем управления связью в спутниковых сетях, а также при эксплуатации сетей для обоснования целесообразности проведения мероприятий по наращиванию их характеристик и модернизации.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Степанов С.Н.* Теория телетрафика: концепции, модели, приложения. М.: Горячая линия – Телеком, 2015. 868 с.
2. *Вишневецкий В.М., Ефросинин Д.В.* Теория очередей и машинное обучение. М.: ИНФРА-М, 2024. 370 с.
3. *Вишневецкий В.М., Рыков В.В., Козырев Д.В. и др.* Моделирование надёжности привязных высотных беспилотных телекоммуникационных платформ. М.: Техносфера, 2022. 194 с.
4. *Вишневецкий В.М., Дудин А.Н., Клименок В.И.* Стохастические системы с коррелированными потоками. Теория и применение в телекоммуникационных сетях. М.: Рекламно-издательский центр «ТЕХНОСФЕРА», 2018. 564 с.
5. *Вишневецкий В.М., Ляхов А.И., Портной С.Л. и др.* Широкополосные беспроводные сети передачи информации. М.: Техносфера, 2005. 529 с.
6. *Stepanov M.S., Kanishcheva M.G., Malikova E.E., et.al.* The Development and Analysis of a Service Model for the Traffic of a Surveillance System Operator by a Dedicated Resource of an LTE Cell // Proc. of 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. 2022. P. 1–6.
7. *Stepanov M.S., Stepanov S.N., Kroshin F.S.* Effective Algorithm of Estimation the Performance Measures of Group of Servers with Dependence of Call Repetition on the Type of Call Blocking DCCN 2022 / Lecture Notes Computer Science, Springer, Cham. 2022.
8. *Gibadullina E.E., Viskova E.V., Stepanov S.N.* Automated Service Configuration Management in IP/MPLS Networks // 4th International Science and Technology Conference «Modern Network Technologies – 2022», MoNeTec – 2022.

9. *Andrabi U.M., Kanishcheva M., Stepanov S.N.* Observation system resource planning in presence of access control based on volume of resource occupied by traffic flows // T-Comm. 2022. V. 16. No. 8. P. 54–62.
10. *Dawood T., Stepanov M.S., Naoussi C., et.al.* The Mathematical Model of the Internet of Things Traffic Servicing in Case of its Impulse Nature // Proc. of 2023 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. 2023. P. 1–8.
11. *Ndimumahoro F., Stepanov M.S., Muzata A.R., et.al.* Using the Principles of Mobile Systems Modeling for LoRaWAN Characteristics Estimation // Proc. of 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. 2022. P. 1–8.
12. *Степанов С.Н., Степанов М.С.* Приближенный метод оценки характеристик совместного обслуживания трафика реального времени и эластичного трафика данных в мультисервисных узлах доступа // АиТ. 2023. № 11. С. 93–114.
13. *Степанов С.Н., Степанов М.С.* Методы оценки необходимого объема ресурса мультисервисных узлов доступа // АиТ. 2020. № 12. С. 129–152.
14. *Макеева Е.Д., Кочеткова И.А., Шоргин В.С.* Модель для выбора уровней скорости широкополосного трафика eMBB в условиях приоритетной передачи трафика URLLC в сети 5G // Системы и средства информатики. 2023. Т.33. № 4. С. 60–68.
15. *Borodakiy V.Y., Samouylov K.E., Gudkova I.A., et.al.* Analyzing mean bit rate of multicast video conference in LTE network with adaptive radio admission control scheme // J. Math. Sci. 2016. V. 218. No. 3. P. 257–268.
16. *Maslov A.A., Sebekin G.V., Stepanov S.N., et.al.* Model of processes for joint maintenance of real-time multiservice traffic and elastic data traffic in a network of low-power mobile subscriber terminals based on high-throughput satellites // T-COMM. 2024. V. 18. No. 5. P. 41–49.
17. *Маслов А.А., Себекин Г.В., Степанов М.С. и др.* Модель резервирования канального ресурса при обслуживании разнородного трафика в сети маломощных мобильных абонентских терминалов на базе КА с высокой пропускной способностью // Информационные процессы. 2024. Т. 24. № 1. С. 1–15.
18. *Себекин Г.В., Маслов А.А., Щурков А.О.* Моделирование совместного обслуживания мультисервисного трафика реального времени и эластичного трафика данных в сетях на базе космических аппаратов с высокой пропускной способностью // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2024. Т. 22. № 2. С. 11–22.
19. *Маков С.В., Маслов А.А., Себекин Г.В.* Оценка эффективности использования ресурса пропускной способности каналов ретрансляции космических аппаратов класса HTS на геостационарной и высокоэллиптической орбите для организации сети передачи трех типов трафика // Наноиндустрия. 2023. Т. 16. № S9-2 (119). С. 613–619.
20. *Маслов А.А., Себекин Г.В., Степанов М.С. и др.* Моделирование процессов обслуживания абонентов в сети передачи данных на базе космических аппаратов на низкой круговой орбите. I // Информационные процессы. 2024. Т. 24. № 4. С. 335–349.
21. *Маслов А.А., Себекин Г.В., Степанов М.С. и др.* Моделирование процессов обслуживания абонентов в сети передачи данных на базе космических аппаратов

- на низкой круговой орбите. II // Информационные процессы. 2025. Т. 25. № 2. С. 151–168.
22. Антонович П.И., Маслов А.А., Себекин Г.В. Задача минимизации ресурса спутниковых каналов для организации функционирования сетей связи «Интернета вещей» // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2021. Т. 12. № 6. С. 57–64.
23. Себекин Г.В., Щурков А.О., Маслов А.А. и др. Построение мультисервисной платформы спутниковой связи на основе решений для сетей передачи данных стандарта LTE (3GPP) // Успехи современной радиоэлектроники. 2024. Т. 78. № 2. С. 66–75.
24. Степанов С.Н. Модель обслуживания трафика сервисов реального времени и данных с динамически изменяемой скоростью передачи // АиТ. 2010. № 1. С. 18–33.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии В.М. Вишневым.*

Поступила в редакцию 18.07.2025

После доработки 19.09.2025

Принята к публикации 22.09.2025