



DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-3-211-226

EDN: VTMTST

Научная статья / Research article

Этапы структурно-параметрического синтеза низкоорбитальных систем связи с широкополосными межспутниковыми трактами

С.Б. Пичугин^{ID}

ПАО «РКК „Энергия“», Королёв, Российская Федерация

✉ sergey.pichugin@rsce.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 28 марта 2025 г.

Доработана: 12 мая 2025 г.

Принята к публикации: 20 мая 2025 г.

Заявление о конфликте интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Аннотация. Рассмотрены вопросы научного обоснования структурно-параметрического синтеза низкоорбитальных систем связи с широкополосными межспутниковыми трактами и маршрутизацией данных на борту спутника, принципы и этапы, положенные в основу маршрутизации данных на борту спутников, и построения надежных и широкополосных межспутниковых трактов. Цель исследования — конкретизация структурно-параметрического синтеза низкоорбитальных систем связи с широкополосными межспутниковыми трактами. Объект исследования — группировка спутников на низких орбитах с маршрутизацией данных на борту. Предметом исследования является процесс синтеза структуры соответствующей низкоорбитальной системы. Методология исследования включает математический аппарат систем массового обслуживания, применяемый как часть инструментария системного анализа. Научная значимость исследования заключается в разработке принципов и методов, позволяющих проводить структурно-параметрический анализ и разработку перспективных спутниковых систем связи, а также моделирования поведения низкоорбитальных систем связи с широкополосными межспутниковыми трактами и оценку их результативности. Практическая значимость исследования состоит в обеспечении формирования перечня работ по созданию отечественных группировок спутников, обеспечивающих абонентскую персональную связь с передачей данных от абонента к абоненту без промежуточного приземления сигнала.

Ключевые слова: синтез космической системы, низкоорбитальная система связи, маршрутизация данных на борту спутника, межспутниковые тракты

Для цитирования

Пичугин С.Б. Этапы структурно-параметрического синтеза низкоорбитальных систем связи с широкополосными межспутниковыми трактами // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2025. Т. 26. № 3. С. 211–226. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-3-211-226>



Stages of Structural and Parametric Synthesis of Low Earth Orbit Communication Systems with Broadband Inter-Satellite Links

Sergey B. Pichugin 

Rocket and Space Corp “Energia” named by S.P. Korolev, RSCE, Moscow, Russian Federation

✉ sergey.pichugin@rsce.ru

Article history

Received: March 28, 2025

Revised: May 12, 2025

Accepted: May 20, 2025

Conflicts of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

Abstract. The paper discusses the scientific rationale for the structural and parametric synthesis of low Earth orbit communication systems (LEOCSs) with broadband inter-satellite links (ISLs) and on-board data routing, principles and stages underlying data routing on board satellites and the construction of reliable and broadband inter-satellite links. The aim of the study is to specify a structural and parametric synthesis of low-orbital communication systems with broadband inter-satellite links. The object of the study is the constellation of satellites in low-altitude orbits with on-board data routing. The subject of study is the process of synthesis of the structure of the corresponding low-orbital system. The methodology of the study includes mathematical apparatus of queuing systems, used as part of the system analysis toolkit. The scientific significance of the research lies in the development of principles and methods that enable structural and parametric analysis and the development of promising satellite communication systems. Additionally, the research involves the modeling of the behavior of low-orbit communication systems with broadband inter-satellite links and the assessment of their effectiveness. The practical significance of the research is to provide a list of tasks for the creation of domestic satellite constellations that provide personal subscriber communications with data transmission from subscriber to subscriber without intermediate signal landing.

Keywords: space system synthesis, low orbit communications system, data routing on board of a satellite, intersatellite links

For citation

Pichugin SB. Stages of structural and parametric synthesis of low Earth orbit communication systems with broadband inter-satellite links. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2025;26(3):211–226. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-3-211-226>

Введение

На текущий момент существенно возрос интерес к практической реализации проектов систем связи со спутниками на низких околоземных орбитах. Интерес обусловлен, с одной стороны, тем, что абоненты космических систем связи требуют обеспечить им тот же уровень сервиса, который обеспечен им в наземных сотовых и проводных системах связи, при этом спутниковые системы со спутниками на

высокоэллиптических и геостационарной орбитах такой сервис зачастую обеспечить не в состоянии¹.

С другой стороны, такой интерес обусловлен тем, что развитие производства, науки и среды управления в некоторых странах, в частности в США, сделало возможным такой сервис обеспечить [1]. Примером являются реализованные в США проекты низкоорбитальных систем Иридиум и Старлинк [2; 3], которые в 2025 г. приближаются к окупаемости или

¹ Дятлов А.П. Системы спутниковой связи с подвижными объектами : учебное пособие. Таганрог : Изд-во Таганрогского государственного радиотехнического университета, 2004. 92 с.; Катунин Г.П., Мамчев Г.В., Попантонопуло В.Н., Шувалов В.П. Телекоммуникационные системы и сети. Том 2. Радиосвязь, радиовещание, телевидение : учебное пособие. Москва : Горячая Линия — Телеком, 2004. 672 с. ISBN 5-93517-109-0

вышли на окупаемость². В то же время становится очевидным, что расширение рынка и спектра услуг космической связи тормозит ряд ключевых проблем, не позволяющих реализовать тот же уровень сервиса, что и в наземных системах. В перечне важнейших проблем такого ранга выделяются две [4–6]: маршрутизация данных на борту спутников, составляющих орбитальную группировку и построение надежных и широкополосных межспутниковых трактов (МСТ) в низкоорбитальных системах связи (НОСС). Таким образом, маршрутизация данных на борту спутника и передача данных по широкополосным МСТ являются ключевыми факторами структурно-параметрического синтеза НОСС, обеспечивающими соответствие космической связи возросшим запросам абонентов.

1. Методы бортовой маршрутизации и обеспечения работы межспутниковых трактов

В разработке научно-технических основ маршрутизации данных на борту спутника и передачи данных по широкополосным МСТ задействован ряд предприятий космической промышленности России. В частности, в ПАО «РКК «Энергия» разработаны и запатентованы [7–11] решения, позволяющие обеспечить широкополосную связь абонентов через группы спутников, без промежуточного приземления сообщения, с учетом особенностей НОСС. Например, метод с чтением части заголовка, когда часть предыдущего заголовка запоминают, сравнивают с аналогичной частью текущего, при совпадении отправляют далее либо прочитывают полностью перед дальнейшей отправкой [7], а также метод, использующий для маршрутизации головной бит, когда «0» или «1» отправляет последовательность данных в одном из двух направлений и далее не пере-

дается («срезается») и на следующем каскаде данные маршрутизируются следующим головным битом [8]. При этом выбор направления ретрансляции данных осуществляют исходя из информации о координатах ближайших соседей, своего местоположения и координатах получателя. Координатами являются номер зоны, в которой находится спутник или его сосед. Если сосед вышел из строя (неисправность, перегрузка и т.д.) и не передал свои координаты за текущий период обмена, то информация о его координатах на соседних спутниках стирается. При восстановлении работоспособности она может быть возобновлена. Пример нумерации зон приведен на рис. 1.

Взаимодействие спутников в НОСС показано на рис. 2.

Для реализации технических решений, связанных с маршрутизацией данных на борту спутника и передачей данных по широкополосным МСТ, на базе методов системного анализа был сформулирован ряд принципов.

Принцип 1: абонентские тракты обеспечивают связь через атмосферу Земли и реализованы в радиодиапазоне от 0,3 до 4 ГГц.

Принцип 2: широкополосные МСТ реализуют на базе устройств лазерной связи (диапазон выше 300 ГГц) либо на базе радиоаппаратуры сантиметрового или миллиметрового диапазонов (диапазон от 18 до 60 ГГц), при этом устанавливая связь с ближайшими спутниками-соседями, спутники ищут друг друга, сканируя лучом широкую область и, найдя друг друга, сужают ее.

Принцип 3: позиции лазерного или радиолуча нумеруют на стороне спутника-отправителя, а на стороне спутника-соседа берут пеленг на принятый луч и в служебном сообщении в виде кода поправки наведения, информируют о пеленге и номере позиции спутник-отправитель. Это ускоряет поиск и повышает надежность сопровождения спутников-соседей.

² Отчет о доходах Iridium Communications Inc. 22.04.2025. URL: <https://ru.tradingview.com/symbols/NASDAQ-IRDM/financials-income-statement/> (дата обращения: 30.05.2025); *Потанов И.В.* Стало известно о резком росте доходов от Starlink (URL: <https://lenta.ru/news/2025/02/05/stalo-izvestno-o-rezkom-roste-dohodov-ot-starlink/> (дата обращения: 30.05.2025)).

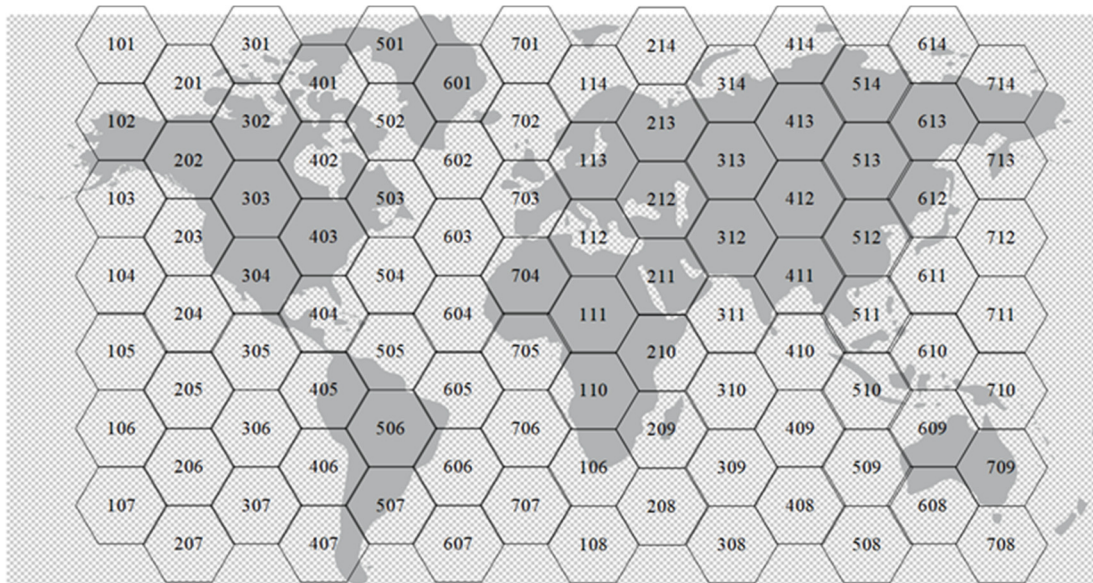


Рис. 1. Пример нумерации зон в НОСС

Источник: выполнено С.Б. Пичугиным

Figure 1. Sample zone numbering in LEOCS

Source: by S.B. Pichugin

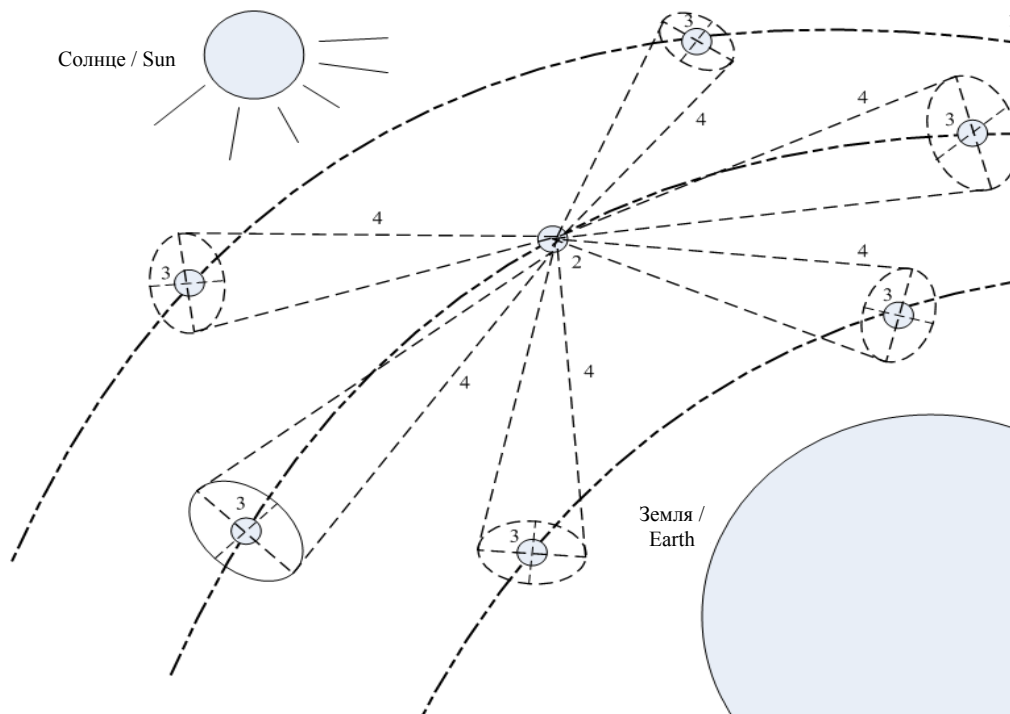


Рис. 2. Взаимодействие спутников в НОСС:

1 — орбитальная плоскость; 2 — спутник, 3 — спутник — сосед; 4 — МСТ

Источник: выполнено С.Б. Пичугиным

Figure 2. Interaction of satellites in LEOCS:

1 — the orbital plane; 2 — satellite, 3 — satellite neighbor; 4 — MCT

Source: by S. B. Pichugin

Принцип 4: в районах орбитальных полюсов, там, где угловые скорости взаимного перемещения спутников на соседних орбитах возрастают, применяют перехватывающее сопровождение соседнего спутника набором бортовых антенн спутника антенн, чьи зоны обслуживания частично перекрываются.

Принцип 5: идентификация абонентских зон, обслуживаемых спутниками, осуществляется зонированием поверхности земли по числу спутников, а данные местоположения спутника и абонентов включаются в маршрутную информацию, необходимую для доставки сообщений от абонентов-отправителей к абонентам-получателям.

Реализация приведенных принципов в рамках технических решений, закладываемых в создаваемые спутники орбитальной группировки и в наземный сегмент НОСС, позволяет существенно улучшить характеристики предоставляемых сервисов космической связи и повышает ее конкурентоспособность в сравнении с наземной связью [6; 12; 16]. Для объективной оценки соответствующих характеристик технических решений, реализуемых в НОСС, и научного обоснования выбора соответствующих методов маршрутизации и межспутниковой связи в НОСС необходим соответствующий математический аппарат.

2. Научное обоснование выбора метода бортовой маршрутизации и обеспечения работы межспутниковых трактов

При выборе метода бортовой маршрутизации и обеспечения работы межспутниковых трактов и соответствующих технических решений был разработан и применялся математический аппарат на базе методов теории массового обслуживания⁴, который позволил исследовать, дать научное описание и обосновать для различных условий функционирования НОСС, в том числе штатных и нештатных, соответствующий выбор методов и средств.

Моделирование дало возможность комплексно исследовать спутник с маршрутизацией сообщений на борту и двумя типами трактов — абонентским, направленным в сторону Земли и обеспечивающим связь в диапазоне от 0,3 до 4 ГГц и межспутниковым трактом оптического диапазона от 300 ГГц до 700 ТГц.

Чтобы оценить процессы, происходящие в бортовой аппаратуре спутника с широкополосными межспутниковыми трактами и маршрутизацией данных на борту, была предложена двухосевая двухфазная модель его функционирования, базирующаяся на математическом аппарате систем массового обслуживания, приведенная на рис. 3.

Модель включала четыре обслуживающих прибора на двух осях — по два прибора на каждую ось, именуемых головным и замыкающим.

В соответствии с предложенной моделью на входы головных приборов каждой оси поступает простейший поток заявок интенсивности λ_0 (на головной прибор первой оси) и λ_2 (на головной прибор второй оси). Время обслуживания заявок на указанных головных приборах распределено по экспоненциальному закону с параметром μ_{01} или μ_{21} , соответственно. После обслуживания на головном приборе первой оси заявка с головного прибора с вероятностью ε_0 поступает на замыкающий прибор этой же оси и с вероятностью $(1 - \varepsilon_0)$ поступает на замыкающий прибор другой оси. Аналогично, после обслуживания на головном приборе второй оси, заявка с головного прибора с вероятностью ε_2 поступает на замыкающий прибор этой же оси и, с вероятностью $(1 - \varepsilon_2)$, поступает на замыкающий прибор первой оси.

Исследуемая система массового обслуживания может находиться в следующих 16 состояниях:

- S_{0000} — все приборы свободны;
- S_{0001} — замыкающий прибор второй оси занят, остальные приборы свободны;
- S_{0010} — головной прибор второй оси занят, остальные приборы свободны;

⁴ Назаров А.А., Терпугов А.Ф. Теория массового обслуживания : учебное пособие. Томск : НТЛ, 2004. 228 с. ISBN 5-89503-233-8 EDN: QJOKAZ

S_{0011} — головной и замыкающий прибор второй оси занят, приборы первой оси свободны;

S_{0100} — замыкающий прибор первой оси занят, остальные приборы свободны;

S_{0101} — замыкающие приборы первой и второй оси заняты, остальные приборы свободны;

S_{0110} — замыкающий прибор первой оси и головной прибор второй оси заняты, остальные приборы свободны;

S_{0111} — головной прибор первой оси свободен, остальные приборы заняты;

S_{1000} — головной прибор первой оси занят, остальные приборы свободны;

S_{1001} — головной прибор первой оси и замыкающий прибор второй оси заняты, остальные приборы свободны;

S_{1010} — головные приборы первой и второй оси заняты, остальные приборы свободны;

S_{1011} — замыкающий прибор первой оси свободен, остальные приборы заняты;

S_{1100} — головной и замыкающий приборы первой оси заняты, приборы второй оси свободны;

S_{1101} — головной прибор второй оси свободен, остальные приборы заняты;

S_{1110} — замыкающий прибор второй оси свободен, остальные приборы заняты;

S_{1111} — все приборы заняты.

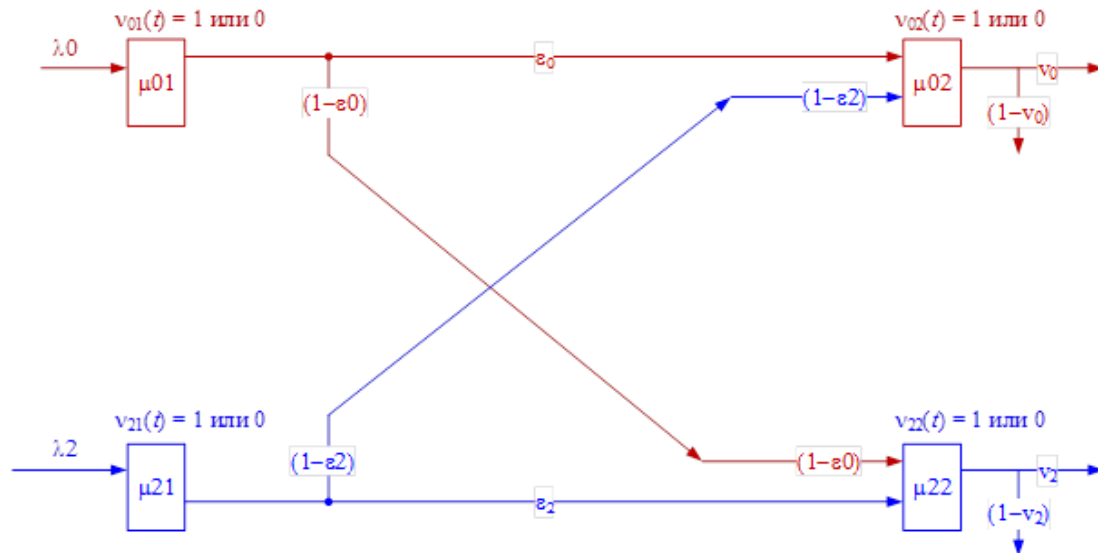


Рис. 3. Двухосевая двухфазная модель функционирования спутника

Источник: выполнено С.Б. Пичугиным

Figure 3. Two — axis and two — phased model of operation of the satellite

Source: by S.B. Pichugin

Соответственно $p_{ijkl}(t)$ — вероятность нахождения системы массового обслуживания в состоянии i, j, k, l , где $i = 0$ или $1, j = 0$ или $1, k = 0$ или 1 и $l = 0$ или 1 .

Если при поступлении заявки состояние системы «все приборы свободны», то заявка считается успешно обслуженной. Если свободны головной и замыкающий приборы одной

оси, то заявка считается обслуженной с вероятностью ε_0 или ε_2 соответственно, дополненной вероятностью $(1 - \varepsilon_2)$ или $(1 - \varepsilon_0)$ противоположной оси, что означает, что часть заявок могут перемещаться между осями. Если свободны головной прибор одной и замыкающий прибор противоположной оси, то заявка считается обслуженной с вероятностью $(1 - \varepsilon_0)$ или

$(1 - \varepsilon_2)$ соответственно. Если в комбинации состояний приборов системы оба головных прибора заняты, поступившая заявка теряется.

На базе предложенной модели была получена система дифференциальных уравнений Колмогорова. Процесс получения указанных уравнений показан на примере состояния S_{0000} .

На первом этапе для состояния S_{0000} был построен граф переходов, приведенный на рис. 4, где учтены переходы из этого состояния во все возможные состояния системы (их всего 16, что соответствует 24, где 4 — число приборов в модели).

Далее исследовалось изменение состояний системы на бесконечно малом интервале Δt . Имеем в виду, что интервал Δt таков, что для

простейшего потока в котором интервалы между поступлениями отдельных заявок подчиняются закону с плотностью распределения $p(t) = \lambda e^{-\lambda t}$, вероятность поступления очередной заявки интервале Δt приближенно равна $\lambda \Delta t$.

Кроме того, такой простейший поток характеризуется тем, что суммарный поток заявок, полученный объединением конечного числа потоков с экспоненциальными законами распределения с различными интенсивностями, является экспоненциальным потоком с интенсивностью, равной сумме их интенсивностей [13–15].

Исходя из указанных соображений, вероятность того, что состояние S_{0000} в момент времени $(t + \Delta t)$, записывается, в соответствии с графом на рис. 4, в виде выражения (1).

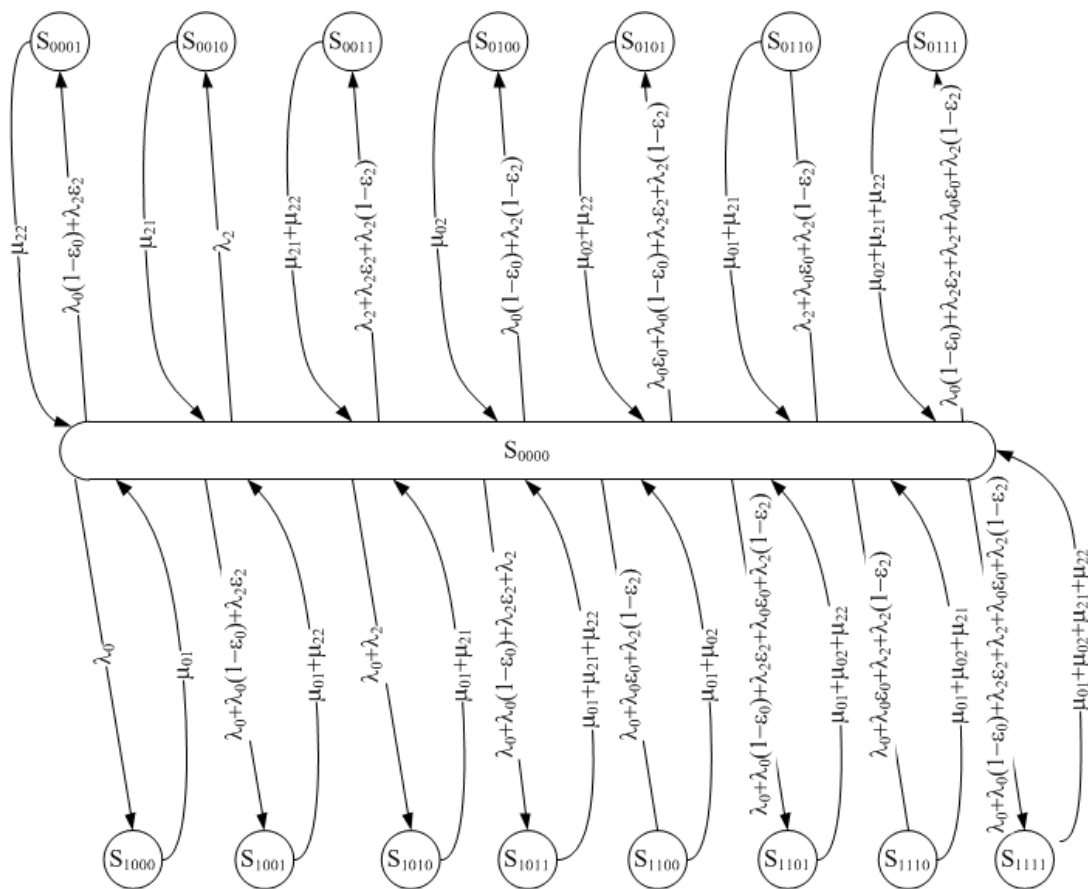


Рис. 4. Граф переходов из состояния S_{0000} в прочие состояния системы

Источник: выполнено С.Б. Пичугины

Figure 4. Flow graph from the S_{0000} state to all other states of the queuing system

Source: by S.B. Pichugin

Уравнение (1) дублировалось для всех шестнадцати состояний. После этого все полученные уравнения, в результате преобразований, сводились к виду, характерному для стационарного режима, такому, когда все переходные процессы в модели были завершены, а малые

второго и выше порядков исключены из рассмотрения. Для стационарного режима функционирования модели НОСС дифференциальные уравнения Колмогорова были сведены в систему из 16 линейных уравнений и дополнены уравнением полной вероятности (см. табл.).

$$\begin{aligned}
 p_{0000}(t + \Delta t) = & p_{0000}(t) - p_{0000}(t) * (\lambda_0(1 - \varepsilon_0) + \lambda_2 \varepsilon_2) \Delta t - p_{0000}(t) \lambda_2 \Delta t - p_{0000}(t) [\lambda_2 + \lambda_2 \varepsilon_2 + \\
 & + \lambda_2(1 - \varepsilon_2)] \Delta t - p_{0000}(t) [\lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2)] \Delta t - p_{0000}(t) [\lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0) + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2)] * \Delta t - \\
 & - p_{0000}(t) * [\lambda_2 + \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2)] \Delta t - p_{0000}(t) * [\lambda_0(1 - \varepsilon_0) + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_2 + \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2)] * \Delta t - \\
 & - p_{0000}(t) * \lambda_0 * \Delta t - p_{0000}(t) [\lambda_0 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0) + \lambda_2 \varepsilon_2] * \Delta t - p_{0000}(t) [\lambda_0 + \lambda_2] * \Delta t - p_{0000}(t) [\lambda_0 + \\
 & + \lambda_0(1 - \varepsilon_0) + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_2 + \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2)] * \Delta t - p_{0000}(t) [\lambda_0 + \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2)] * \Delta t - \\
 & - p_{0000}(t) [\lambda_0 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0) + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2)] * \Delta t - p_{0000}(t) [\lambda_0 + \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2)] * \Delta t - \\
 & - p_{0000}(t) [\lambda_0 + \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \lambda_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0) + \lambda_2 \varepsilon_2] * \Delta t + p_{0001}(t) \mu_{22} * \Delta t + p_{0010}(t) \mu_{21} * \Delta t + \\
 & + p_{0011}(t) * (\mu_{21} + \mu_{22}) * \Delta t + p_{0100}(t) \mu_{02} * \Delta t + p_{0101}(t) * (\mu_{02} + \mu_{22}) * \Delta t + p_{0110}(t) * (\mu_{02} + \mu_{21}) * \Delta t + \\
 & + p_{0111}(t) * (\mu_{02} + \mu_{21} + \mu_{22}) * \Delta t + p_{1000}(t) \mu_{01} * \Delta t + p_{1001}(t) * (\mu_{01} + \mu_{22}) * \Delta t + p_{1010}(t) * (\mu_{01} + \mu_{21}) * \Delta t + \\
 & + p_{1011}(t) * (\mu_{01} + \mu_{21} + \mu_{22}) * \Delta t + p_{1100}(t) * (\mu_{01} + \mu_{02}) * \Delta t + p_{1101}(t) * (\mu_{01} + \mu_{02} + \mu_{22}) * \Delta t + p_{1110}(t) * \\
 & * (\mu_{01} + \mu_{02} + \mu_{21}) * \Delta t + p_{1111}(t) * (\mu_{01} + \mu_{02} + \mu_{21} + \mu_{22}) * \Delta t
 \end{aligned} \quad (1)$$

**Система линейных уравнений для стационарного режима функционирования НОСС,
дополненная уравнением полной вероятности /**

Set of linear equations for stationary mode of operation of LEOCS, supplemented by full probability equation

Состояние / State	Уравнение Колмогорова / Kolmogorov equation
S_{0000}	$ \begin{aligned} & - 8[\lambda_0 + \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0) + \lambda_2 + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2)] p_{0000}(t) + \mu_{22} p_{0001}(t) + \mu_{21} p_{0010}(t) + \\ & + (\mu_{21} + \mu_{22}) p_{0011}(t) + \mu_{02} p_{0100}(t) + (\mu_{02} + \mu_{22}) p_{0101}(t) + (\mu_{02} + \mu_{21}) p_{0110}(t) + \\ & + (\mu_{02} + \mu_{21} + \mu_{22}) p_{0111}(t) + \mu_{01} p_{1000}(t) + (\mu_{01} + \mu_{22}) p_{1001}(t) + (\mu_{01} + \mu_{21}) p_{1010}(t) + \\ & + (\mu_{01} + \mu_{21} + \mu_{22}) p_{1011}(t) + (\mu_{01} + \mu_{02}) p_{1100}(t) + (\mu_{01} + \mu_{02} + \mu_{22}) p_{1101}(t) + \\ & + (\mu_{01} + \mu_{02} + \mu_{21}) p_{1110}(t) + (\mu_{01} + \mu_{02} + \mu_{21} + \mu_{22}) p_{1111}(t) = 0 \end{aligned} $
S_{0001}	$ \begin{aligned} & [\lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)] p_{0000}(t) - 8[(\lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \mu_{22} + \lambda_0 + \lambda_2)] p_{0001}(t) + \\ & + [\mu_{21} + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)] p_{0010}(t) + \mu_{21} p_{0011}(t) + [\mu_{02} + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)] p_{0100}(t) + \\ & + \mu_{02} p_{0101}(t) + [\mu_{02} + \mu_{21} + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)] p_{0110}(t) + [\mu_{02} + \mu_{21}] p_{0111}(t) + \\ & + [\mu_{01} + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)] p_{1000}(t) + \mu_{01} p_{1001}(t) + [\mu_{01} + \mu_{21} + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)] p_{1010}(t) + \\ & + [\mu_{01} + \mu_{21}] p_{1011}(t) + [\mu_{01} + \mu_{02} + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)] p_{1100}(t) + [\mu_{01} + \mu_{02}] p_{1101}(t) + \\ & + [\mu_{01} + \mu_{02} + \mu_{21} + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)] p_{1110}(t) + [\mu_{01} + \mu_{02} + \mu_{21}] p_{1111}(t) = 0 \end{aligned} $
S_{0010}	$ \begin{aligned} & \lambda_2 p_{0000}(t) + [\lambda_2 + \mu_{22}] p_{0001}(t) - 8[\lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0) + \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \mu_{21} + \lambda_0] p_{0010}(t) + \\ & + \mu_{22} p_{0011}(t) + [\mu_{02} + \lambda_2] p_{0100}(t) + [\mu_{02} + \lambda_2 + \mu_{22}] p_{0101}(t) + \mu_{02} p_{0110}(t) + \\ & + [\mu_{02} + \mu_{22}] p_{0111}(t) + [\mu_{01} + \lambda_2] p_{1000}(t) + [\mu_{01} + \lambda_2 + \mu_{22}] p_{1001}(t) + \mu_{01} p_{1010}(t) + \\ & + [\mu_{01} + \mu_{22}] p_{1011}(t) + [\mu_{01} + \mu_{02} + \lambda_2] p_{1100}(t) + [\mu_{01} + \mu_{02} + \lambda_2 + \mu_{22}] p_{1101}(t) + \\ & + [\mu_{01} + \mu_{02}] p_{1110}(t) + [\mu_{01} + \mu_{02} + \mu_{22}] p_{1111}(t) = 0 \end{aligned} $

Продолжение табл. / Continuation of the Table

Состояние / State	Уравнение Колмогорова / Kolmogorov equation
S_{0011}	$ \begin{aligned} & [\lambda_2 + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{0000}(t) + \lambda_2 p_{0001}(t) + [\lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{0010}(t) + \\ & - 8[\lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \lambda_0 + \mu_{21} + \mu_{22}]p_{0011}(t) + [\mu_{02} + \lambda_2 + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{0100}(t) + \\ & + (\mu_{02} + \lambda_2)p_{0101}(t) + [\mu_{02} + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{0110}(t) + \mu_{02}p_{0111}(t) + \\ & + [\mu_{01} + \lambda_2 + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{1000}(t) + [\mu_{01} + \lambda_2]p_{1001}(t) + [\mu_{01} + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{1010}(t) + \\ & + \mu_{01}p_{1011}(t) + [\mu_{01} + \mu_{02} + \lambda_2 + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{1100}(t) + [\mu_{01} + \mu_{02} + \lambda_2]p_{1101}(t) + \\ & + [\mu_{01} + \mu_{02} + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{1110}(t) + [\mu_{01} + \mu_{02}]p_{1111}(t) = 0 \end{aligned} $
S_{0100}	$ \begin{aligned} & [\lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2)]p_{0000}(t) + [\lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \mu_{22}]p_{0001}(t) + \\ & + [\lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \mu_{21}]p_{0010}(t) + [\lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \mu_{21} + \mu_{22}]p_{0011}(t) - \\ & - 8[\mu_{02} + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0) + \lambda_2 + \lambda_0]p_{0100}(t) + \mu_{22}p_{0101}(t) + \mu_{21}p_{0110}(t) + \\ & + [\mu_{21} + \mu_{22}]p_{0111}(t) + [\mu_{01} + \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2)]p_{1000}(t) + \\ & + [\mu_{01} + \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \mu_{22}]p_{1001}(t) + [\mu_{01} + \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \mu_{21}]p_{1010}(t) + \\ & + [\mu_{01} + \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \mu_{21} + \mu_{22}]p_{1011}(t) + \mu_{01}p_{1100}(t) + [\mu_{01} + \mu_{22}]p_{1101}(t) + \\ & + [\mu_{01} + \mu_{21}]p_{1110}(t) + [\mu_{01} + \mu_{21} + \mu_{22}]p_{1111}(t) = 0 \end{aligned} $
S_{0101}	$ \begin{aligned} & [\lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{0000}(t) + [\lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2)]p_{0001}(t) + \\ & + [\lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \mu_{21} + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{0010}(t) + (\lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \mu_{21})p_{0011}(t) + \\ & + [\lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{0100}(t) - 8[\mu_{02} + \mu_{22} + \lambda_2 + \lambda_0]p_{0101}(t) + [\mu_{21} + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{0110}(t) + \\ & + [\mu_{01} + \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{0111}(t) + \mu_{21}p_{1000}(t) + \\ & + [\mu_{01} + \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2)]p_{1001}(t) + [\mu_{01} + \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \mu_{21} + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{1010}(t) + \\ & + [\mu_{01} + \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \mu_{21}]p_{1011}(t) + [\mu_{01} + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{1100}(t) + \mu_{01}p_{1101}(t) + \\ & + [\mu_{01} + \mu_{21} + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{1110}(t) + [\mu_{01} + \mu_{21}]p_{1111}(t) = 0 \end{aligned} $
S_{0110}	$ \begin{aligned} & (\lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \lambda_2)p_{0000}(t) + (\lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \lambda_2 + \mu_{22})p_{0001}(t) + \\ & + [\lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2)]p_{0010}(t) + (\lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \mu_{22})p_{0011}(t) + \\ & + \lambda_2 p_{0100}(t) + (\lambda_2 + \mu_{22})p_{0101}(t) - 8[\mu_{02} + \mu_{21} + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0) + \lambda_0]p_{0110}(t) + \\ & + \mu_{22}p_{0111}(t) + [\mu_{01} + \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \lambda_2]p_{1000}(t) + [\mu_{01} + \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \\ & + \lambda_2 + \mu_{22}]p_{1001}(t) + [\mu_{01} + \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2)]p_{1010}(t) + [\mu_{01} + \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \mu_{22}]p_{1011}(t) \\ & + [\mu_{01} + \lambda_0]p_{1100}(t) + [\mu_{01} + \lambda_2 + \mu_{22}]p_{1101}(t) + \mu_{01}p_{1110}(t) + [\mu_{01} + \mu_{22}]p_{1111}(t) = 0 \end{aligned} $
S_{0111}	$ \begin{aligned} & [\lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \lambda_2 + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]\pi_{0000}(\tau) + (\lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \lambda_2)\pi_{0001}(\tau) + \\ & + [\lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]\pi_{0010}(\tau) + [\lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2)]\pi_{0011}(\tau) + \\ & + [\lambda_2 + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]\pi_{0100}(\tau) + \lambda_2 \pi_{0101}(\tau) + [\lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]\pi_{0110}(\tau) - \\ & - 8[(\lambda_0 + \mu_{02} + \mu_{21} + \mu_{22})]\pi_{0111}(\tau) + [\mu_{01} + \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \lambda_2 + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]\pi_{1000}(\tau) + \\ & + (\mu_{01} + \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \lambda_2)\pi_{1001}(\tau) + [\mu_{01} + \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]\pi_{1010}(\tau) + \\ & + [\mu_{01} + \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2)]\pi_{1011}(\tau) + [\mu_{01} + \lambda_2 + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]\pi_{1100}(\tau) + [\mu_{01} + \lambda_2]\pi_{1101}(\tau) + \\ & + [\mu_{01} + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]\pi_{1110}(\tau) + \mu_{01}\pi_{1111}(\tau) = 0 \end{aligned} $
S_{1000}	$ \begin{aligned} & [\lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2)]p_{0000}(t) + [\lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \mu_{22}]p_{0001}(t) + [\lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \mu_{21}]p_{0010}(t) + \\ & + [\lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \mu_{21} + \mu_{22}]p_{0011}(t) - 8[\mu_{02} + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0) + \lambda_2 + \lambda_0]p_{0100}(t) + \\ & + \mu_{22}p_{0101}(t) + \mu_{21}p_{0110}(t) + [\mu_{21} + \mu_{22}]p_{0111}(t) + [\mu_{01} + \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2)]p_{1000}(t) + \\ & + [\mu_{01} + \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \mu_{22}]p_{1001}(t) + [\mu_{01} + \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \mu_{21}]p_{1010}(t) + \\ & + [\mu_{01} + \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \mu_{21} + \mu_{22}]p_{1011}(t) + \mu_{01}p_{1100}(t) + [\mu_{01} + \mu_{22}]p_{1101}(t) + \\ & + [\mu_{01} + \mu_{21}]p_{1110}(t) + [\mu_{01} + \mu_{21} + \mu_{22}]p_{1111}(t) = 0 \end{aligned} $

Продолжение табл. / Continuation of the Table

Состояние / State	Уравнение Колмогорова / Kolmogorov equation
S_{1001}	$ \begin{aligned} & [\lambda_0 + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{0000}(t) + \lambda_0 p_{0001}(t) + [\lambda_0 + \mu_{21} + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{0010}(t) + \\ & + [\lambda_0 + \mu_{21}]p_{0011}(t) + [\lambda_0 + \mu_{02} + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{0100}(t) + [\lambda_0 + \mu_{02}]p_{0101}(t) + \\ & + [\lambda_0 + \mu_{02} + \mu_{21} + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{0110}(t) + [\lambda_0 + \mu_{02} + \mu_{21}]p_{0111}(t) + \\ & + [\lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{1000}(t) - 8[\lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0) + \mu_{01} + \mu_{21}]p_{1001}(t) + \\ & + [\mu_{21} + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{1010}(t) + \mu_{21}p_{1011}(t) + [\mu_{02} + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{1100}(t) + \\ & + \mu_{02}p_{1101}(t) + [\mu_{02} + \mu_{21} + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{1110}(t) + [\mu_{02} + \mu_{21}]p_{1111}(t) = 0 \end{aligned} $
S_{1010}	$ \begin{aligned} & [\lambda_0 + \lambda_2]p_{0000}(t) + [\lambda_0 + \lambda_2 + \mu_{22}]p_{0001}(t) + \lambda_0 p_{0010}(t) + [\lambda_0 + \mu_{22}]p_{0011}(t) + [\lambda_0 + \mu_{02} + \lambda_2]p_{0100}(t) + \\ & + [\lambda_0 + \mu_{02} + \lambda_2 + \mu_{22}]p_{0101}(t) + [\lambda_0 + \mu_{02}]p_{0110}(t) + [\lambda_0 + \mu_{02} + \mu_{22}]p_{0111}(t) + \lambda_2 p_{1000}(t) + \\ & + [\lambda_2 + \mu_{22}]p_{1001}(t) - 8[\lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0) + \mu_{01} + \mu_{21}]p_{1010}(t) + \mu_{22}p_{1011}(t) + \\ & + [\mu_{02} + \lambda_2]p_{1100}(t) + [\mu_{02} + \lambda_2 + \mu_{22}]p_{1101}(t) + \mu_{02}p_{1110}(t) + [\mu_{02} + \mu_{22}]p_{1111}(t) = 0 \end{aligned} $
S_{1011}	$ \begin{aligned} & [\lambda_0 + \lambda_2 + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{0000}(t) + [\lambda_0 + \lambda_2]p_{0001}(t) + [\lambda_0 + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{0010}(t) + \\ & + \lambda_0 p_{0011}(t) + [\lambda_0 + \mu_{02} + \lambda_2 + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{0100}(t) + [\lambda_0 + \mu_{02} + \lambda_2]p_{0101}(t) + \\ & + [\lambda_0 + \mu_{02} + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{0110}(t) + [\lambda_0 + \mu_{02}]p_{0111}(t) + [\lambda_2 + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{1000}(t) + \\ & + \lambda_2 p_{1001}(t) + [\lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{1010}(t) - 8[\lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \mu_{01} + \mu_{21} + \mu_{22}]p_{1011}(t) + \\ & + [\mu_{02} + \lambda_2 + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{1100}(t) + [\mu_{02} + \lambda_2]p_{1101}(t) + [\mu_{02} + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{1110}(t) + \\ & + \mu_{02}p_{1111}(t) = 0 \end{aligned} $
S_{1100}	$ \begin{aligned} & [\lambda_0 + \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2)]p_{0000}(t) + [\lambda_0 + \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \mu_{22}]p_{0001}(t) + \\ & + [\lambda_0 + \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \mu_{21}]p_{0010}(t) + [\lambda_0 + \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \mu_{21} + \mu_{22}]p_{0011}(t) + \\ & + \lambda_0 p_{0100}(t) + [\lambda_0 + \mu_{22}]p_{0101}(t) + [\lambda_0 + \mu_{21}]p_{0110}(t) + [\lambda_0 + \mu_{21} + \mu_{22}]p_{0111}(t) + \\ & + [\lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2)]p_{1000}(t) + (\lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \mu_{22})p_{1001}(t) + [\lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \mu_{21}]p_{1010}(t) + \\ & + [\lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \mu_{21} + \mu_{22}]p_{1011}(t) - 8[\mu_{01} + \mu_{02} + (\lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)) + \lambda_2]p_{1100}(t) + \\ & + \mu_{22}p_{1101}(t) + \mu_{21}p_{1110}(t) + [\mu_{21} + \mu_{22}]p_{1111}(t) = 0 \end{aligned} $
S_{1101}	$ \begin{aligned} & [\lambda_0 + \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{0000}(t) + [\lambda_0 + \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2)]p_{0001}(t) + \\ & + [\lambda_0 + \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \mu_{21} + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{0010}(t) + [\lambda_0 + \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \mu_{21}]p_{0011}(t) + \\ & + [\lambda_0 + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{0100}(t) + \lambda_0 p_{0101}(t) + [\lambda_0 + \mu_{21} + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{0110}(t) + \\ & + [\lambda_0 + \mu_{21}]p_{0111}(t) + [\lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{1000}(t) + [\lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2)]p_{1001}(t) + \\ & + [\lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \mu_{21} + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{1010}(t) + [\lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \mu_{21}]p_{1011}(t) + \\ & + [\lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{1100}(t) - 8[\lambda_2 + \mu_{22} + \mu_{01} + \mu_{02}]p_{1101}(t) + [\mu_{21} + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{1110}(t) + \\ & + \mu_{21}p_{1111}(t) = 0 \end{aligned} $
S_{1110}	$ \begin{aligned} & [\lambda_0 + \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \lambda_2]p_{0000}(t) + [\lambda_0 + \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \lambda_2 + \mu_{22}]p_{0001}(t) + \\ & + [\lambda_0 + \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2)]p_{0010}(t) + [\lambda_0 + \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \mu_{22}]p_{0011}(t) + [\lambda_0 + \lambda_2]p_{0100}(t) + \\ & + [\lambda_0 + \lambda_2 + \mu_{22}]p_{0101}(t) + \lambda_0 p_{0110}(t) + [\lambda_0 + \mu_{22}]p_{0111}(t) + [\lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \lambda_2]p_{1000}(t) + \\ & + [\lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \lambda_2 + \mu_{22}]p_{1001}(t) + [\lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2)]p_{1010}(t) + \\ & + [\lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \mu_{22}]p_{1011}(t) + \lambda_2 p_{1100}(t) + (\lambda_2 + \mu_{22})p_{1101}(t) - 8[\lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0) + \\ & + \mu_{01} + \mu_{02} + \mu_{21}]p_{1110}(t) + \mu_{22}p_{1111}(t) = 0 \end{aligned} $

Окончание табл. / Ending of the Table

Состояние / State	Уравнение Колмогорова / Kolmogorov equation
S_{1111}	$ \begin{aligned} & [\lambda_0 + \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \lambda_2 + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{0000}(t) + [\lambda_0 + \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \lambda_2]p_{0001}(t) + \\ & + [\lambda_0 + \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{0010}(t) + [\lambda_0 + \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2)]p_{0011}(t) + \\ & + [\lambda_0 + \lambda_2 + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{0100}(t) + [\lambda_0 + \lambda_2]p_{0101}(t) + [\lambda_0 + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{0110}(t) + \\ & + \lambda_0 p_{0111}(t) + [\lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \lambda_2 + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{1000}(t) + (\lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \lambda_2)p_{1001}(t) + \\ & + [\lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{1010}(t) + [\lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2)]p_{1011}(t) + \\ & + [\lambda_2 + \lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{1100}(t) + \lambda_2 p_{1101}(t) + [\lambda_2 \varepsilon_2 + \lambda_0(1 - \varepsilon_0)]p_{1110}(t) - \\ & - 8[\mu_{01} + \mu_{02} + \mu_{21} + \mu_{22}]p_{1111}(t) = 0 \end{aligned} $

Источник: выполнено С.Б. Пичугиным / Source: by S.B. Pichugin

Уравнение полной вероятности:

$$\begin{aligned}
& p_{0000}(t) + p_{0001}(t) + p_{0010}(t) + p_{0011}(t) + \\
& + p_{0100}(t) + p_{0101}(t) + p_{0110}(t) + p_{0111}(t) + \\
& + p_{1000}(t) + p_{1001}(t) + p_{1010}(t) + p_{1011}(t) + \\
& + p_{1100}(t) + p_{1101}(t) + p_{1110}(t) + p_{1111}(t) = 1.
\end{aligned} \quad (2)$$

На следующем шаге находили решение полученной системы уравнений размерности 16×17 . Для решения приведенной в таблице системы использовался метод обращения матриц.

Вероятности p_{ijkl} были обозначены через x_i , а коэффициенты при p_{0i} через a_{mn} и переведены в матричный вид:

$$A = \begin{pmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} & \dots & a_{015} \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} & \dots & a_{115} \\ a_{20} & a_{21} & a_{22} & \dots & a_{215} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{150} & a_{151} & a_{152} & \dots & a_{1515} \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$X = \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ 1 \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 1 \end{pmatrix}$$

При использовании матричного способа решения данной системы обычно применяют формулу перемножения матриц:

$$A^{-1} \cdot B = X, \quad (4)$$

которая следует из выражения $A \cdot X = B$. Однако, в нашем случае мы оперируем с прямоугольной, а не квадратной матрицей.

При этом, если умножить обе части матричного выражения (4) на A^T , получим $(A^T \cdot A) \cdot X = A^T \cdot B$ квадратную матрицу и получим решение

$$(A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot B = X. \quad (5)$$

На базе решения (5) были получены значения вероятностей нахождения исследуемой системы в состояниях от «все приборы системы свободны» до «все приборы системы заняты», что позволяет оценить вероятность доставки сообщения по вероятности нахождения системы в заданном состоянии.

Для системы 2×2 , приведенной на рис. 2, уравнение системы имеет вид:

$$\begin{aligned}
& p_{a_m^1 a_m^2 a_n^3 a_n^4} \sum_{\substack{m=0; \\ m \neq n}}^{N=2^4} [f(a_m^1 - a_n^1) + f(a_m^2 - a_n^2) + \\
& + f(a_m^3 - a_n^3) + f(a_m^4 - a_n^4)] + \\
& + \sum_{\substack{n=0; \\ n \neq m}}^{N=2^4} p_{a_n^1 a_n^2 a_m^3 a_m^4} \cdot [f(a_n^1 - a_m^1) + f(a_n^2 - a_m^2) + \\
& + f(a_n^3 - a_m^3) + f(a_n^4 - a_m^4)] = 0,
\end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{где } f(a_m^1 - a_n^1) = \begin{cases} 1, & \mu_{01} \\ 0, & 0 \\ -1, & \lambda_0 \end{cases},$$

$$f(a_m^2 - a_n^2) = \begin{cases} 1, & \mu_{02} \\ 0, & 0 \\ -1, & \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) \end{cases},$$

$$f(a_m^3 - a_n^3) = \begin{cases} 1, & \mu_{21} \\ 0, & 0 \\ -1, & \lambda_2 \end{cases},$$

$$f(a_m^4 - a_n^4) = \begin{cases} 1, & \mu_{22} \\ 0, & 0 \\ -1, & \lambda_0(1 - \varepsilon_0) + \lambda_2\varepsilon_2 \end{cases},$$

$$f(a_n^1 - a_m^1) = \begin{cases} 1, & \lambda_0 \\ 0, & 0 \\ -1, & \mu_{01} \end{cases},$$

$$f(a_n^2 - a_m^2) = \begin{cases} 1, & \lambda_0\varepsilon_0 + \lambda_2(1 - \varepsilon_2) \\ 0, & 0 \\ -1, & \mu_{02} \end{cases},$$

$$f(a_n^3 - a_m^3) = \begin{cases} 1, & \lambda_2 \\ 0, & 0 \\ -1, & \mu_{21} \end{cases},$$

$$f(a_n^4 - a_m^4) = \begin{cases} 1, & \lambda_0(1 - \varepsilon_0) + \lambda_2\varepsilon_2 \\ 0, & 0 \\ -1, & \mu_{22} \end{cases}.$$

Были также получены [15; 16] соотношения для системы с произвольным числом межспутниковых трактов следующего вида, то есть для модели с m головными и n замыкающими приборами, нумерованными от 0 до $2x = m + n - 1$.

$$\begin{aligned} & -p_{a_m^1 \dots a_m^x} \sum_{\substack{m=0; \\ m \neq n}}^{N=2^x} [f(a_m^1 - a_n^1) + \dots + f(a_m^x - a_n^x)] + \\ & + \sum_{\substack{n=0; \\ n \neq m}}^{N=2^x} p_{a_n^1 \dots a_n^x} [f(a_n^1 - a_m^1) + \dots + f(a_n^x - a_m^x)] \end{aligned} \quad (7)$$

Как показано в [15], уравнение (7) применимо для систем любой размерности. Когда в

системе существуют низкоскоростные и высокоскоростные оси, модель сводится к двухосевой. Низкоскоростная ось моделирует работу абонентского тракта в НОСС, а высокоскоростная — работу межспутникового тракта, при произвольных числах направлений связи (лучей) в каждом тракте.

Зависимости вероятностей состояния системы от величины информационной нагрузки λ_0/μ_{01} , поступающей на вход абонентского тракта, в графическом виде представлены на рис. 5–7.

Из графиков, приведенных на рис. 5–7, следует, что вероятность занятости приемных трактов не превышает 2 % при величине поступающей нагрузки 20 % от пропускной способности абонентского тракта. То есть значительную часть времени абонентский тракт будет свободен.

Занятость передающего тракта составляет порядка 25 % и с ростом числа поступающих от абонентов сообщений снижается из-за учащения взаимных наложений данных абонентов (блокировок).

Вероятность занятости всех трактов спутника вначале нарастает с ростом входящей нагрузки, а затем начинает снижаться из-за того, что данные абонентов все чаще накладываются друг на друга, что приводит к потерям информации [14].

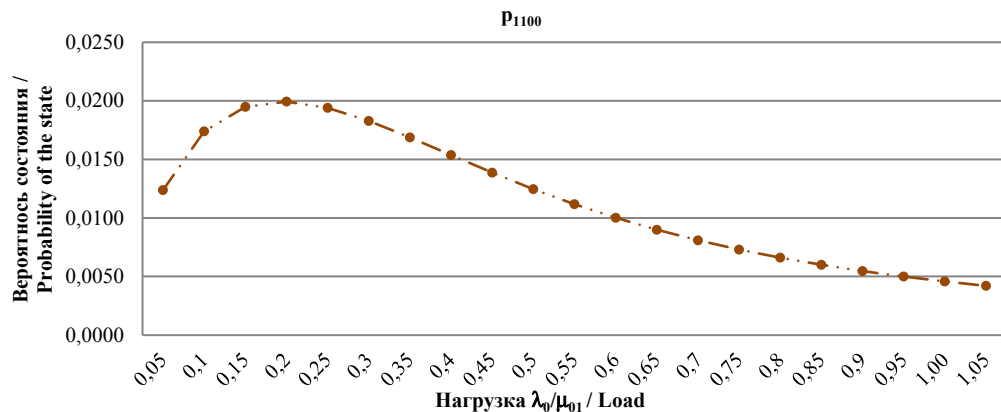


Рис. 5. Вероятность занятости приемных трактов
Источник: выполнено С.Б. Пичугиным

Figure 4. Probability of busy state of receiving paths
Source: by S.B. Pichugin

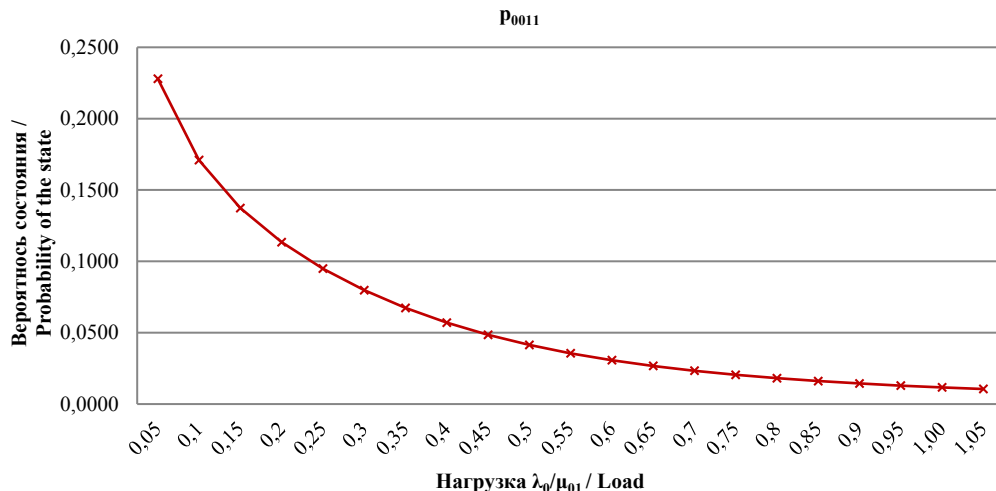


Рис. 6. Вероятность занятости передающих трактов
Источник: выполнено С.Б. Пичугиным

Figure 6. Probability of busy state of transmitting paths
Source: by S.B. Pichugin

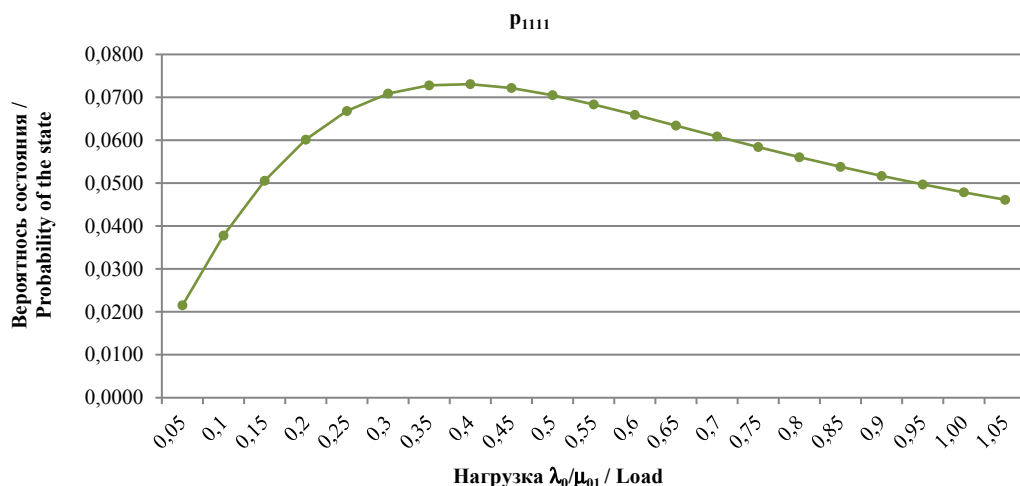


Рис. 7. Вероятность занятости приемных и передающих трактов
Источник: выполнено С.Б. Пичугиным

Figure 7. Probability of busy state of receiving and transmitting paths
Source: by S.B. Pichugin

3. Этапы научного обоснования структурно-параметрического синтеза НОСС

При наличии данных о методах бортовой маршрутизации, обеспечения работы межспутниковых трактов и принципах их построения, разработанности и готовности к применению математического аппарата, предназначенного

для научного обоснования структурно-параметрического синтеза низкоорбитальных систем связи с широкополосными межспутниковыми трактами и маршрутизацией данных на борту спутника, имеется возможность сформулировать этапность научного обоснования структурно-параметрического синтеза НОСС. Этот процесс включает следующие этапы:

1. Выбор метода маршрутизации в зависимости от развития технических средств и потребностей абонентов.

2. Формирование набора технических решений, реализующего выбранный метод маршрутизации и методик исследования.

3. Определение пороговых показателей, связанных с потребностями абонентов.

4. Оценка параметров функционирования технических решений в штатных и нештатных ситуациях с применением обоснованно выбранных методик.

5. Комплексное исследование реализуемости технических решений в рамках заданных сроков с применением обоснованно выбранных методик.

6. Заключение о реализуемости технических решений при синтезе НОСС.

На первом этапе синтеза из перечня разработанных методов маршрутизации отбирают те, которые наилучшим образом применимы для достижения целей применения НОСС в условиях текущего уровня потребностей абонентов, определяемых в первую очередь условиями конкуренции с наземными системами связи, а также техническими возможностями по удовлетворению указанных потребностей.

После того как методы маршрутизации информации для НОСС определены, наступает черед формирования перечня технических решений, реализующих выбранные методы в рамках синтезируемой структуры НОСС с учетом параметров функционирования последней.

На следующем этапе, применяя научные подходы, задают пороговые показатели параметров функционирования, позволяющих обеспечить функционирование НОСС и обеспечить потребности абонентов в космической связи, а также определенный задел на будущее.

В рамках очередного этапа осуществляют оценку параметров технических решений, перечень которых был определен ранее. Для оценки на основе научных подходов выбирают методики, которые в наибольшей степени соответствуют целям и задачам, определенным на предыдущих этапах синтеза НОСС. Рассматри-

ваться могут как штатные, так и нештатные ситуации функционирования НОСС, в зависимости от того, в каких условиях и какие задачи предстоит выполнять НОСС для обеспечения требований, предъявляемых абонентами к услугам космической связи.

Далее следует этап комплексного исследования реализуемости технических решений в рамках заданных сроков, с применением методик, обоснование выбора которых производилось на предыдущем этапе синтеза структуры НОСС.

По результатам комплексного исследования, в ходе которого полученные данные о технических характеристиках НОСС и сроках ее изготовления и ввода в строй сравниваются с пороговыми показателями, определенными в соответствии с потребностями абонентов, принимается окончательное решение о реализуемости, синтезированной НОСС с заданной структурой и параметрами.

В целом предложенная этапность научного обоснования структурно-параметрического синтеза НОСС позволяет обоснованно выбрать методы и средства для реализации такой конфигурации НОСС, которая дает возможность существенно улучшить характеристики космической связи в конкурентном отношении к наземным системам связи и объективно оценить ее возможности на текущий период и перспективу.

Заключение

Для научного обоснования научного обоснования структурно-параметрического синтеза низкоорбитальных систем связи с широкополосными межспутниковыми трактами и маршрутизацией данных на борту спутника предложены принципы и этапность реализации технических решений, связанных с маршрутизацией данных на борту спутника и передачей данных по широкополосным МСТ. Разработан ряд методик, позволяющих оценить ряд технических характеристик синтезируемых НОСС, в том числе пропускную способность спутниковых и абонентских трактов и вероятность доставки информации по структуре НОСС. Сформиро-

ван перечень этапов структурно-параметрического синтеза низкоорбитальных систем связи с широкополосными МСТ и маршрутизацией данных на борту спутника и сформулировано содержание научного обоснования для каждого этапа из сформированного перечня.

Список литературы

1. Невдяев Л.В. Спутниковые системы Часть 1. Орбиты и параметры (дата размещения: 16.01.1999) URL: <https://www.osp.ru/nets/1999/01-02/143941> (дата обращения: 30.05.2025)
2. Макаренко С.И. Описательная модель системы спутниковой связи Iridium // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 4. С. 1–34. <https://doi.org/10.24411/2410-9916-2018-10401> EDN: VNVWWU
3. Пехтерев С.В., Макаренко С.И., Ковальский А.А. Описательная модель системы спутниковой связи Starlink // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 4. С. 190–255. <https://doi.org/10.24412/2410-9916-2022-4-190-255> EDN: QMOLDV
4. Бойкачев В.Н., Пичугин С.Б. Перспективы бортовой пакетной коммутации в низкоорбитальных сетях связи // Радиопромышленность. 2016. № 3. С. 71–74. <https://doi.org/10.21778/2413-9599-2016-3-71-74> EDN: WIOFBT
5. Пичугин С.Б. Абонентские и межспутниковые тракты в низкоорбитальных сетях связи // Радиопромышленность. 2019. Т. 29. № 3. С. 48–54. <https://doi.org/10.21778/2413-9599-2019-3-48-54> EDN: MXFWVT
6. Пичугин С.Б., Жуков А.О., Кучумов А.А., Сазонов В.В., Кумакшев И.М. Алгоритмы управления потоками информации в низкоорбитальных системах : монография. Москва : ФГБНУ «Аналитический центр», 2023. 279 с. <https://doi.org/10.55469/9785904670832> EDN: RGUOVR
7. Пичугин С.Б. Способ определения маршрута ретрансляции пакета сообщения и устройство для его осуществления. Патент на изобретение RU 2001532 C1, 15.10.1993. Заявка № 5031334 от 31.01.1992. EDN: YOREJZ
8. Пичугин С.Б. Спутниковый ретранслятор «Аксай». Патент на изобретение RU 2097926 C1, 27.11.1997. Заявка № 94018404/09 от 19.04.1994. EDN: LJYKUU
9. Пичугин С.Б. Спутниковый ретранслятор. Патент на изобретение RU 2673060 C1, 22.11.2018. Заявка № 2017140374 от 20.11.2017. EDN: RMMNDX
10. Пичугин С.Б. Спутниковый ретранслятор. Патент на изобретение RU 2783202 C2, 09.11.2022. Заявка № 2021105819 от 09.03.2021. EDN: LJPRZT
11. Пичугин С.Б. Спутниковый ретранслятор. Патент на изобретение RU 2793898 C1, 07.04.2023. Заявка № 2022127471 от 21.10.2022. EDN: LRGYWG

12. Пичугин С.Б. Модели массового обслуживания с простейшими потоками для низкоорбитальной спутниковой системы // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2022. № 1 (742). С. 61–70. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-1-61-70> EDN: CGMMNP

13. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. Ленинград – Москва : Книга по Требованию, 2013. 429 с. ISBN 9785458355766

14. Пичугин С.Б. Двухфазная двухосевая модель многопролетной системы с дифференцированной пропускной способностью абонентских и межспутниковых трактов связи // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2023. № 12 (765). С. 131–140. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-12-131-140> EDN: UUEGMI

15. Пичугин С.Б. Обобщённая модель спутника — ретранслятора с функцией маршрутизации и межспутниковыми трактами // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2025. № 2 (779). С. 119–127. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2025-2-119-127>

16. Бондарева М.К., Дементьев А.Н., Жуков А.О., Пичугин С.Б. и др. Моделирование оперативности доставки информации орбитальной группировки дистанционного зондирования земли. Москва : Экспертноаналитический центр, 2023. 261 с. <https://doi.org/10.55469/9785904670825> EDN: NFSNHB

References

1. Nevdyayev LV. Satellite systems. Orbits and parameters. *Network world*. 1999;1. (In Russ).
2. Makarenko SI. Descriptive model OF IRIDIUM satellite communication system. *Systems of Control, Communication and Security*. 2018;(4):1–34. (In Russ). <https://doi.org/10.24411/2410-9916-2018-10401> EDN: VNVWWU
3. Pekhterev SV, Makarenko SI, Kovalskiy AA. Descriptive model of starlink satellite communication system. *Systems of Control, Communication and Security*. 2022;(4):190–255. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2410-9916-2022-4-190-255> EDN: QMOLDV
4. Boykachyov VN, Pichugin SB. Perspectives of on-board packet routing in low-orbit communication networks. *Radio Industry*. 2016;(3):71–74. (In Russ.) <https://doi.org/10.21778/2413-9599-2016-3-71-74> EDN: WIOFBT
5. Pichugin SB. Subscriber and inter-satellite paths in LEO communications networks. *Radio Industry*. 2019;(3):48–54. (In Russ.) <http://doi.org/10.21778/2413-9599-2019-3-48-54> EDN: MXFWVT
6. Pichugin SB, Zhukov AO, Kuchumov AA, Sazonov VV, Kumakshev IA. *Algorithms for data flow control in LEO systems*. Moscow: Analytical Center, 2023:279. (In Russ.) <https://doi.org/10.55469/9785904670832> EDN: RGUOVR

7. Pichugin SB. *Method of determination of route of relaying of message package and device to implement it*. Russian Federation patent 2001532. 31 January 1992. 15 October 1993. EDN: YOREJZ
8. Pichugin SB. *Satellite retransmitter*. Russian Federation patent 2097926. 27 November 1997. EDN: LJYKUU
9. Pichugin SB. *Satellite transmitter*. Russian Federation patent 2673060. 20 November 2017. EDN: RMMNDX
10. Pichugin SB. *Repeater satellite*. Russian Federation patent 2783202. 09 March 2021. EDN: LJPRZT
11. Pichugin SB. *Relay satellite*. Russian Federation patent 2793898. 21 October 2022. EDN: LRGYWG
12. Pichugin SB. Simplest flow queuing models for LEO satellite system. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2022;1:61–70. <http://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-1-61-70>
13. Kleinrok L. *Queue Systems Theory*. Leningrad–Moscow: Kniga po Trebovaniu Publ.; 2013. (In Russ.) ISBN 9785458355766
14. Pichugin SB. Two-phased and two-axis model of multihop system with differentiated capacity of subscriber and intersatellite communication links. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2023;12:131–140. (In Russ.) <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-12-131-140>
15. Pichugin SB. Generalized model of a relay satellite with routing functionality and with intersatellite links. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2025;2(779):119–127. (In Russ.) <http://doi.org/10.48550/arXiv.2005.12521>
16. Pichugin SB, Bondareva MK, Dementiev AN, Zhukov AO, Zhukov VA, Zhuravlev AP, et al. *Modelling of operability of data delivery from constellation for Earth remote probing*. Moscow: Analytical Center, 2023. (In Russ.) <https://doi.org/10.55469/9785904670825>

Сведения об авторе

Пичугин Сергей Борисович, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, ПАО РКК «Энергия» им. С.П. Королёва, Российская Федерация, 141070, Московская обл., г. Королёв, ул. Ленина, д. 4а; eLIBRARY SPIN-код: 5024-4804, ORCID: 0000-0002-1355-6708; e-mail: sergey.pichugin@rsce.ru

About the author

Sergey B. Pichugin, Doctor of Sciences (Techn.), Leading Science Associate, Rocket and Space Corp “Energia” named by S.P. Korolev, RSCE, 4a Lenin St, Korolev, Moscow region, 141070, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 5024-4804, ORCID: 0000-0002-1355-6708; e-mail: sergey.pichugin@rsce.ru