

А.Д. ХОМОНЕНКО, Д.Ю. СТАРОБИНЕЦ, В.А. ЛОХВИЦКИЙ  
**МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ОПЕРАТИВНОСТИ  
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БОРТОВОГО КОМПЛЕКСА  
УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ  
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

---

*Хомоненко А.Д., Старобинец Д.Ю., Лохвицкий В.А. Модель оценки оперативности функционирования бортового комплекса управления космическими аппаратами дистанционного зондирования Земли.*

**Аннотация.** Для оценки оперативности функционирования бортового комплекса управления космическими аппаратами дистанционного зондирования Земли предлагается применение моделей разомкнутых сетей массового обслуживания. В моделях сетей узлы задаются многоканальными немарковскими системами массового обслуживания. Предложенная модель позволяет учесть затраты на сжатие графических изображений и их передачу при расчете распределения времени пребывания заявки в сетевой модели бортового комплекса управления.

**Ключевые слова:** сжатие графических изображений, сеть массового обслуживания, бортовые комплексы управления, оперативность функционирования бортовых комплексов управления.

*Khomonenko A.D., Starobinets D.Yu., Lokvitskii V.A. A Model of Estimating Quickness of Functioning of Onboard Control Systems of Spacecraft Remote Sensing of the Earth.*

**Abstract.** To assess the efficiency of functioning of the onboard control complex of spacecraft Earth remote sensing, it is proposed to use models of open queuing networks. For queuing networks, nodes are given by multi-channel non-Markov queuing systems. The proposed model allows one to take into account the costs for compressing and broadcasting the graphics in the calculation of the distribution of the residence time of the application in a network model.

**Keywords:** compression of graphic images; queuing network; on-board control systems; efficiency of functioning of onboard control complexes.

---

**1. Введение.** При проектировании и разработке бортовых комплексов управления (БКУ) космическими аппаратами (КА) весьма важным является решение задач обоснования производительности их аппаратно-программных комплексов и обеспечение требуемой оперативности функционирования БКУ с учетом состава решаемых задач, частот и характеристик трудоемкости. Принципы построения БКУ КА и общие подходы к их разработке рассмотрены в работах [1-2]. В работах [3-4] рассматриваются стандарты и концепция построения средств мониторинга, контроля и диагностики КА.

В работе [5] дается систематическое изложение методов исследования эффективности ракетно-космической техники, в том числе здесь приводятся математические модели и алгоритмы для оценки производительности КА наблюдения на основе теории массового обслуживания. В частности, приведены основные этапы построения не-

которых частных моделей, необходимых для оценки производительности космической системы наблюдения. В работах [6, 7] рассматриваются вопросы оптимизации построения оптических спутниковых систем, в том числе в [7] затрагиваются вопросы оценивания производительности оптических спутников.

Для прогнозирования оперативности функционирования вычислительных комплексов и сетей различного целевого назначения и оценивания их производительности широко применяется математический аппарат теории массового обслуживания. Большое распространение получили модели многоканальных систем массового обслуживания (СМО). Например, в работах [8-9] рассматриваются модели многоканальных немарковских СМО с «разогревом», позволяющие учесть системные издержки при моделировании узлов вычислительных сетей. Для моделирования вычислительных сетей в целом применяются модели замкнутых и разомкнутых сетей массового обслуживания (СеМО) [10-12].

В настоящей статье предлагается подход к решению задачи оценивания оперативности функционирования БКУ КА дистанционно-го зондирования Земли (ДЗЗ). Важной особенностью указанного типа КА является то, что к ним предъявляются высокие требования по своевременности предварительной обработки графической информации (с целью сжатия), передаваемой на Землю. В основе предлагаемого подхода положено использование вероятностной модели БКУ КА, задаваемой с помощью модели разомкнутой СеМО.

Предлагаемая модель предназначена для оценки оперативности функционирования БКУ КА ДЗЗ при условии дополнительного анализа изображений на борту КА с целью автоматизированного выбора коэффициента сжатия изображений, предложенного в работе [13]. Модель ориентирована на то, чтобы учесть затраты на сжатие графических изображений и их передачу при расчете распределения времени пребывания заявки в сетевой модели БКУ.

Основными решаемыми в настоящей статье задачами являются: определение параметров модели; задание исходных данных для моделирования с учетом современных тенденций, решений и характеристик бортовых вычислительных комплексов и информационных систем КА; расчет вероятностно-временных характеристик модели.

## **2. Характеристика бортовых комплексов управления КА.**

При разработке модели функционирования БКУ КА ДЗЗ, прежде всего целесообразно учитывать состав бортовых систем, перечень и характеристики решаемых ими задач. Состав бортовых систем КА приведен на рисунке 1[1].

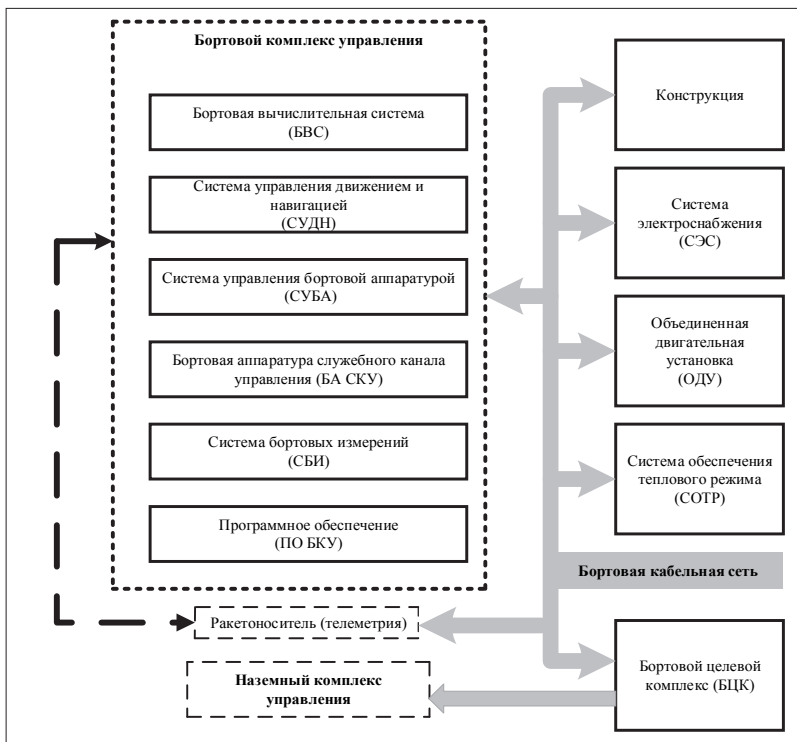


Рис. 1. Состав бортовых систем КА

Унифицированный бортовой вычислительный комплекс (БВК), учитывающий тенденции в современных зарубежных и отечественных проектах, представляет собой распределенную вычислительную систему, включающую системный контроллер, высокопроизводительную микроЭВМ MicroPC и специализированные контроллеры [2].

Перспективная структура бортового вычислительного комплекса КА приведена на рисунке 2, где использованы следующие сокращения: КИС — командно-измерительная система; АД — астродатчик; АСН — аппаратура спутниковой навигации; ССИ — система сбора измерений; РК — разовые команды.

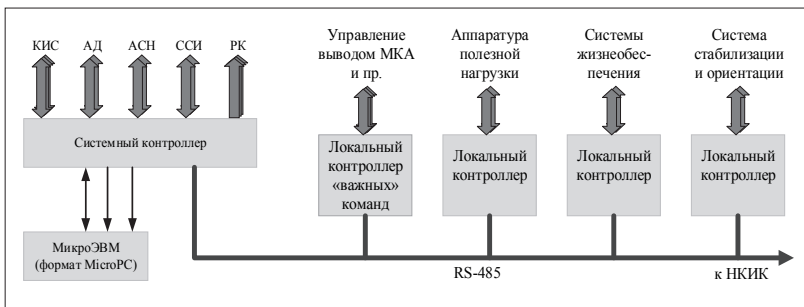


Рис. 2. Перспективная структура БВК КА

С учетом стандартов и современных тенденций в [3] предложена концепция построения архитектуры системы интеллектуальной поддержки космических систем, в том числе на основе использования методов высокопроизводительных вычислений.

Работа системы ориентирована на охват таких перспективных направлений как интеллектуальное управление, когнитивная графика, нейронные сети. Предполагается, что встраивание средств ИИ может быть реализовано путем установки специального программного обеспечения на управляющую ЭВМ.

На рисунке 3 приведена типовая архитектура системы обработки информации. Управление КА предполагает, что с ним поддерживается хорошо налаженная, устойчивая двусторонняя радиосвязь, которую обеспечивает антенная система.



Рис. 3. Типовая архитектура системы обработки информации

Необходимо обозначить исходные данные, выделить основные параметры, определяющие решение задачи управления, а также выбрать методы ее решения.

**3. Моделирование процесса функционирования БКУ КА ДЗЗ на основе не экспоненциальной разомкнутой СеМО.** На начальном этапе для оценивания оперативности функционирования БКУ (на основе анализа вычислительной структуры и информационных потоков) производится формирование исходных данных, создается структура СеМО и характеристики узлов сети.

При составлении матрицы переходов учитываются частоты и трудоемкость обрабатываемых задач. Телеметрическая и командно-программная информация занимает незначительный объем и передается несколько раз в сутки.

В свою очередь, периодичность получения специальной информации для систем оптико-электронного наблюдения может достигать до 25 раз в сутки. При этом поток исходной обзорной космической информации составляет около 120 Гб в сутки. Кроме того, для мониторинга последствий пожаров и оценки эмиссий вредных газов в атмосферу, используются данные среднего и высокого разрешения, объем которых может достигать ~ 100 Гб в сутки.

Суммарный объем потоков данных, получаемых при оперативном космическом мониторинге для обнаружения и оценки последствий пожаров на территории Российской Федерации, достигает ~ 220 Гб в сутки. Близкий объем космических данных (~ 280 Гб в сутки) формируется государственной территориально-распределенной системой космического мониторинга Росгидромета. Подобные объемы информации формируются и другими спутниковыми, а также воздушными системами мониторинга [14].

Исходя из состава бортовых систем КА (рисунок 1), структуры БВК (рисунок 2) и архитектуры систем обработки информации (рисунок 3), построим разомкнутую СеМО с 8 рабочими узлами (рисунок 4). В данной сети узел S1 — БВС, узел S2 — СУДН, узел S3 — СУБА, узел S4 — КИС, узел S5 — системный контроллер (СК), узел S6 — целевая аппаратура приема и обработки графической информации (ЦА), узел S7 — СБИ, S8 — БА СКУ (антенная система). Исходя из решаемых задач, устанавливается следующее число каналов в узлах (таблица 1):

Таблица 1. Число каналов обслуживания в узлах СеМО

Узел	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
Количество каналов	8	2	3	4	8	6	2	4

Выбор средней интенсивности входящего потока определяется исходя из максимально оговоренной стандартом RS-485 скорости обмена 2400 кбит/с и максимальным объемом данных, который может быть передан протоколом Ethernet в одном пакете (одна заявка на обслуживание), MTU=1500 байт, что позволяет установить среднюю интенсивность входящего в сеть потока  $\Lambda=200$  запросов в секунду.

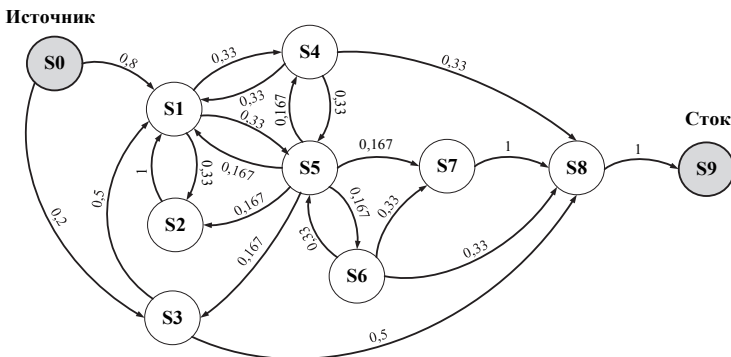


Рис. 4. Схема разомкнутой CeMO

Каждый рабочий узел рассматриваемой CeMO представлен в виде многоканальной немарковской СМО типа  $M/H_2/n$  (рисунок 5).

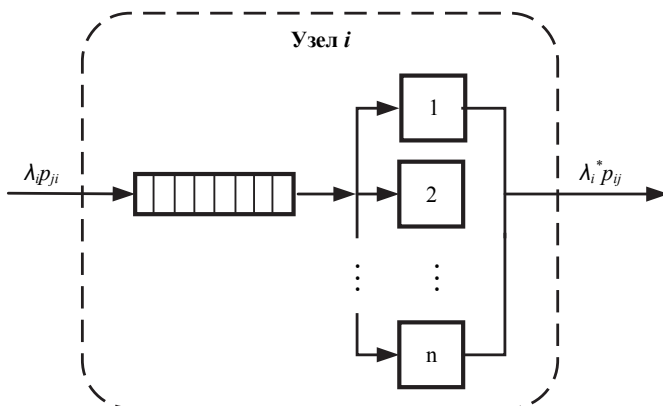


Рис. 5. Схема многоканального узла сети на основе СМО  $M/H_2/n$

Модель многоканального не экспоненциального узла G-сети на основе СМО  $M/H_2/n$  содержит следующие основные элементы:

$n$  — число каналов обслуживания в  $i$ -м узле;

$\lambda_i$  — средняя интенсивность входящего в  $i$ -й узел потока заявок;

$\lambda_i^*$  — средняя интенсивность потока обслуженных заявок в  $i$ -м узле;

$p_{ji}$  — вероятность перехода заявки из  $j$ -го в  $i$ -й узел сети.

**4. Расчет СеМО, моделирующей БКУ КА ДЗЗ.** Расчет разомкнутой немарковской СеМО осуществляется по следующей схеме [11]:

1. Рассчитываются средние интенсивности входящих в узлы потоков заявок на основе матрицы передач и средней интенсивности суммарного входящего потока заявок в сеть путем решения системы уравнений баланса потоков:

$$\lambda_i = A p_{0,i} + \sum_{j=1}^M \lambda_j p_{j,i}, \quad i = \overline{1, M}, \quad (1)$$

где  $A$  — средняя интенсивность суммарного входящего потока заявок.

Так как потоки в СеМО простейшие, то после решения системы (1) можно рассчитать каждый узел СеМО как изолированную систему:

– рассчитать распределение числа заявок в узле;

– рассчитать характеристики узла.

2. Определяются агрегированные характеристики распределения времени пребывания заявок в сети.

Каждый узел представим в виде СМО  $M/H_2/n$  [9, 11]. В качестве исходных данных задаются множества микросостояний  $S_j$ , при которых на обслуживании находится ровно  $j$  заявок, количество элементов в  $S_j - \sigma_j$ , матрицы переходов:

1)  $A_j[\sigma_j \times \sigma_{j+1}]$  в  $S_{j+1}$  — прибытие заявки;

2)  $B_j[\sigma_j \times \sigma_{j-1}]$  в  $S_{j+1}$  — завершение обслуживания целевой заявки;

3)  $D_j[\sigma_j \times \sigma_j]$  — ухода из состояний яруса  $j$ , а также векторы-строки вероятностей нахождения СМО в состоянии  $(j, i)$ :

$$V_j = \{V_{j,1}, V_{j,2}, \dots, V_{j,\sigma_j}\}.$$

Расчет характеристик таких СМО подразумевает построение диаграмм и соответствующих матриц переходов [9, 11], составление

векторно-матричных уравнений баланса переходов между состояниями вида:

$$\begin{aligned} \gamma_0 D_0 &= \gamma_1 B_1, \\ \gamma_j D_j &= \gamma_{j-1} A_{j-1} + \gamma_{j+1} B_{j+1}, \quad j = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (2)$$

Решение указанных уравнений основано на реализации расчетной схемы Гаусса-Зейделя и использовании итерационного алгоритма Такахаши-Таками [9, 11, 15, 16].

Характеристики узлов сети рассчитываются на основе метода пересчета, предложенного в [11]. Для расчета характеристик времени пребывания заявки в узле необходимо:

1. Вычислить факториальные моменты  $\{f_{[k]}\}$ ,  $k = \overline{1, 3}$ , распределения длины очереди:

$$f_{[k]} = \sum_{i=k}^{\infty} i(i-1)\dots(i-k+1)p_{i+n}. \quad (3)$$

2. По формулам Брюмелля [11] получить моменты распределения времени ожидания:

$$\omega_k = f_{[k]} / \lambda^k. \quad (4)$$

3. Сверткой в моментах распределений времени ожидания и обслуживания получить моменты распределений пребывания заявки в узле:

$$v^k = (\omega + b)^k. \quad (5)$$

На завершающем этапе с помощью свертки начальных моментов распределений времен ожидания и чистого обслуживания заявок производится расчет распределения времени пребывания заявки в сети [15, 16] и строится его дополнительная функция распределения (ДФР).

Для нахождения начальных моментов распределения пребывания заявки в сети из матрицы передач выделяются [11]:

– вектор-строка вероятностей перехода из источника в конкретные рабочие узлы  $P = \{r_{0,1}, r_{0,2}, \dots, r_{0,M}\}$ ;

– вектор-столбец вероятностей перехода из рабочих узлов в сток  $\Gamma = \{r_{1,M+1}, r_{2,M+1}, \dots, r_{M,M+1}\}^T$ ;

– матрица вероятностей переходов между рабочими узлами  $Q = \{r_{i,j}\}$ ,  $i, j = \overline{1, M}$ .



Кроме того, определяется диагональная матрица  $N(s)$  преобразований Лапласа  $\{v_i(s)\}$  распределений времени пребывания в рабочих узлах и формируется матрица:

$$\Gamma(s) = N(s)Q. \quad (6)$$

Преобразование Лапласа-Стилтьеса (ПЛС) распределения длительности  $k$ -шаговых переходов в сток:

$$\gamma_k(s) = P\Gamma^{k-1}(s)N(s)T. \quad (7)$$

Полное ПЛС распределения времени пребывания заявки в сети вычисляется по формуле:

$$\gamma(s) = \sum_{k=1}^{\infty} \gamma_k(s) = P \left( \sum_{k=0}^{\infty} \Gamma^k(s) \right) N(s)T = P(I - \Gamma(s))^{-1}N(s)T. \quad (8)$$

Моменты  $\{v_{ij}\}$  распределения времени пребывания в сети вычисляются путем численного дифференцирования  $\gamma(s)$  в нуле. Для проведения численных расчетов искомых характеристик (рисунок 4) использовался программный комплекс [17], позволяющий рассчитать начальные моменты распределения времени пребывания заявки в узлах в соответствии с (1)-(8), и в сети путем численного дифференцирования  $\gamma(s)$  в нуле.

В таблице 2 представлены начальные моменты распределения времени пребывания заявки в узлах.

Таблица 2. Начальные моменты распределения времени пребывания заявки в узлах

№ узла	$v_1$	$v_2$
1	0,87	3,62
2	17,87	767,07
3	8,56	177,39
4	8,33	206,78
5	2,43	26,00
6	0,76	2,83
7	6,92	140,48
8	2,06	10,26

Начальные моменты распределения времени пребывания заявки в сети составляют  $v_{c1} = 44,77$ ,  $v_{c2} = 4556,85$ .

При выборе параметров сжатия узел целевой аппаратуры S6 выполняет дополнительно функции анализа изображений. В результате уменьшения объема передаваемого изображения при увеличении коэффициента сжатия уменьшается поток заявок в узел S8. Также

уменьшается поток заявок в S6 от системного контроллера S5, поскольку загруженный дополнительно узел не успевает обработать тот же поток заявок, что был ранее.

Перераспределение потока заявок приводит к пропорциональному увеличению потоков из S6 в S5 и S7, а также из S5 в остальные смежные узлы. Как показывают численные расчеты характеристик СеМО, в результате увеличивается общее время пребывания заявки в сети.

Графики ДФР распределения времени пребывания заявки в узлах и в сети в целом приведены на рисунке 6.

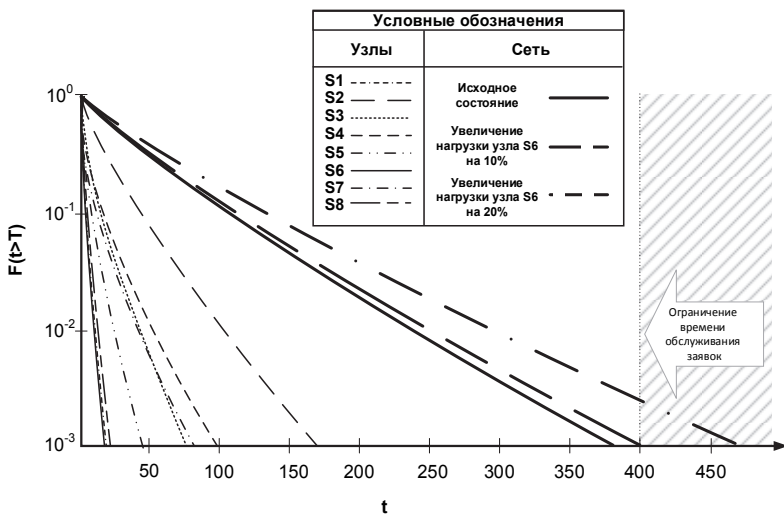


Рис. 6. ДФР распределения времени пребывания заявки в узлах и в сети

Из рисунка 6 видно, что любая заявка, приходящая в сеть, будет обслужена за время не больше 375 мс с вероятностью 0.999.

В соответствии с графиком (рисунок 2), при дополнительной загрузке узла S6 на 10% и 20% время пребывания заявки в сети увеличивается на 9% и 26%. Таким образом, в зависимости от характеристик аппаратуры и быстродействия алгоритмов анализа изображений с целью выбора коэффициента сжатия, можно установить предельные значения времени пребывания заявки в сети, при которых обеспечиваются требования по оперативности функционирования БКУ КА ДЗЗ.

**5. Заключение.** Предложенная модель оценивания оперативности функционирования БКУ позволяет оценить время, затрачиваемое на обработку и передачу информации в КА дистанционного зондирования Земли с учетом перераспределения нагрузки на элементы БКУ,

вызванного дополнительной обработкой изображений на борту КА в целях автоматического определения параметров сжатия.

Дальнейшие исследования целесообразно продолжить в следующих направлениях: повышение точности обоснования автоматизированного выбора коэффициента сжатия изображений БКУ КА ДЗЗ на основе оценки инвариантных моментов [18-19]; оценивание влияния организации параллельной обработки информации [20] по сжатию изображений на оперативность функционирования БКУ КА ДЗЗ.

## Литература

1. *Гобчанский О.* Проблемы создания бортовых вычислительных комплексов малых космических аппаратов // Современные технологии автоматизации. 2001. № 4. С. 28–34.
2. *Микрин Е.А. и др.* Принципы построения бортовых комплексов управления автоматических космических аппаратов // Проблемы управления. 2004. № 3. С. 62–66.
3. *Талалаев А.А., Фраленко В.П., Хачумов В.М.* Обзор стандартов и концепция построения средств мониторинга, контроля и диагностики космического аппарата // Программные системы: теория и приложения. 2015. № 3(26). С. 21–43.
4. *Gao X., Zhang T., Liu H., Gong J.* Spacecraft Fault Diagnosis Based on Telemetry Data Mining and Fault Tree Analysis and Design of Expert System // Advanced Materials Research. 2013. pp. 1062–1066.
5. *Куренков В.И., Гоголев М.Ю.* Методы исследования эффективности ракетно-космической техники // Самара: Издательство СГАУ им. С.П. Королева. 2012. 285 с.
6. *Denisov A.V., Demin A.V., Letunovskiy A.V.* Optical Digital Systems and Complexes for Space Applications // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2015. № 4. pp. 16–22.
7. *Perret L., Boussarie E., Lachiver I.M., Damilano P.* The Pleiades System High Resolution optical satellite and its performance // Proceedings of 53rd IAC/World Space Congress. Houston. 2002. С. 1.
8. *Sun B., Dudin A.N.* The MAP/PH/N multi-server queuing system with broadcasting service discipline and server heating // Automatic Control and Computer Sciences. 2013. vol. 47. no. 4. pp. 173–182.
9. *Khomonenko A.D., Gindin S.I.* Stochastic models for cloud computing performance evaluation // Proceedings of the 10<sup>th</sup> Central and Eastern European Software Engineering Conference in Russia. 2014. С. 20.
10. *Baskett F., Chandy K.M., Muntz R.R., Palacios F.* Open, closed and mixed networks of queues with different classes of customers // VJACM. 1975. vol. 22. no. 2. pp. 248–260.
11. *Рыжиков Ю.И., Хомоненко А.Д.* Расчет разомкнутых немарковских сетей с преобразованием потоков // Автоматика и вычислительная техника. 1989. № 3. С. 15–24.
12. *Pujolle G., Ai W.* A solution for multiserver and multiclass open queueing network // INFOR. 1986. vol. 24. no. 3. pp. 221–230.
13. *Хомоненко А.Д., Старобинец Д.Ю., Уваров В.А.* Выбор параметров сжатия изображений с потерями на основе их характеристических свойств // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2012. № 4(33). С. 78–85.
14. *Бондур В.Г., Резнев А.А.* О применении суперкомпьютеров для обработки потоков аэрокосмических изображений // Материалы 2-й Всероссийской научно-технической конференции. 2012. С. 338–345.

15. Рыжиков Ю.И., Лохвицкий В.А. Расчет узла сети с отрицательными заявками // Сборник трудов по материалам российской конференции «Информационные технологии в управлении». Спб. 2012. С. 354–359.
16. Рыжиков Ю.И., Лохвицкий В.А. Время решения задачи в сети с отрицательными заявками // Сборник трудов по материалам российской конференции «Информационные технологии в управлении». Спб. 2012. С. 360–365.
17. Рыжиков Ю.И., Лохвицкий В.А. Программный комплекс анализа немарковских систем и сетей массового обслуживания с положительными и отрицательными заявками // Патент РФ, № 2012616617. 2012
18. Жигалко Е. Ф. Особенность асимптотических свойств интегральных инвариантов // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2015. № 4(4). С. 55–58.
19. Hu M. Visual Pattern Recognition by Moment Invariants / M. Hu // IRE Trans. Inf. Theory. 1962. vol. 8. P. 179–187.
20. Басыров А.Г., Лебедев Д.М., Мастин А.Б. Планирование параллельной обработки информации в высокопроизводительных вычислительных системах бортовых комплексов управления космическими аппаратами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 1. С. 74–77.

## References

1. Gobchanskij O. [The problem of creating on-board computing systems of small satellites]. *Sovremennye tehnologii avtomatizacii – Modern automation technology*. 2001. no. 4. pp. 28–34. (In Russ.).
2. Mikrin E.A. et. al. [The Principles of Board control of automatic space devices]. *Problemy upravlenija – Control sciences*. 2004. no. 3. pp. 62–66. (In Russ.).
3. Talalaev A.A., Fralenko V.P., Nachumov V.M. [A review of standards and the concept of building monitoring tools, monitoring and diagnostics spacecraft]. *Programmnye sistemy: teorija i prilozhenija – Program systems: theory and applications*. 2015. no. 3(26). pp. 21–43. (In Russ.).
4. Gao X., Zhang T., Liu H., Gong J. Spacecraft Fault Diagnosis Based on Telemetry Data Mining and Fault Tree Analysis and Design of Expert System. *Advanced Materials Research*. 2013. pp. 1062–1066.
5. Kurenkov V.I., Gogolev M.IU. *Metody issledovanija jeffektivnosti raketno-kosmicheskoy tehniki* [Methods for investigating the efficiency of rocket and space technology]. Samara: Publishing house of Korolev Samara State Aerospace University. 2012. 285 p. (In Russ.).
6. Denisov A. V., Demin A. V., Letunovskiy A. V. Optical Digital Systems and Complexes for Space Applications. *Intellektual'nye tehnologii na transporte – Intellectual Technologies on Transport*. 2015. no. 4. pp. 16–22.
7. Perret L., Boussarie E., Lachiver I.M., Damilano P. The Pleiades System High Resolution optical satellite and its performance. Proceedings of 53rd IAC/World Space Congress. Houston. 2002. C. 1.
8. Sun B., Dudin A.N. The MAP/PH/N multi-server queuing system with broadcasting service discipline and server heating. *Automatic Control and Computer Sciences*. 2013. vol. 47. no. 4. pp. 173–182.
9. Khomonenko A.D., Gindin S.I. Stochastic models for cloud computing performance evaluation. Proceedings of the 10th Central and Eastern European Software Engineering Conference in Russia. 2014. C. 20.
10. Baskett F., Chandy K.M., Muntz R.R., Palacios F. Open, closed and mixed networks of queues with different classes of customers. *IJACM*. 1975. vol. 22. no. 2. pp. 248–260.

11. Ryzhikov Y.I., Khomonenko A.D. [Calculation of open-loop non-Markovian networks with conversion flows]. *Avtomatika i vychislitel'naja tehnika – Automation and computer engineering*. 1989. no. 3. pp. 15–24. (In Russ.).
12. Pujolle G., Ai W. A solution for multiserver and multiclass open queuing network. *INFOR*. 1986. vol. 24. no. 3. pp. 221–230. (In Russ.).
13. Komonenko A.D., Starobinets D.Y., Uvarov V.A. [Choice of parameters of image compression with losses on the basis of their characteristic properties]. *Izvestija Peterburgskogo universiteta putej soobshhenija – Proceedings of St. Petersburg University of means of communication*. 2012. no. 4 (33). pp. 78–85. (In Russ.).
14. Bondur V.G., Reznev A.A. [On the use of supercomputers for processing of aerospace images]. *O primenении superkomp'yutеров dlja obrabotki potokov ајерокосмических изображений. Материалы 2-ј Всероссийской научно-технической конференции*. [Materials of the 2nd all-Russian scientific-technical conference]. Spb. 2012. pp. 338–345. (In Russ.).
15. Ryzhikov Y.I., Lohvitskii V.A. [Calculation node of the network with negative customers]. *Raschet uzla seti s otricatel'nymi zajavkami. Sbornik trudov po materialam rossijskoј konferencii «Informacionnye tehnologii v upravlenii* [Collection of works on materials of the Russian conference "Information technologies in management"]. Spb. 2012. pp. 354–359. (In Russ.).
16. Ryzhikov Y.I., Lohvitskii V.A. [Time of solving the problem in a network with negative customers]. *Vremja reshenija zadachi v seti s otricatel'nymi zajavkami. Sbornik trudov po materialam rossijskoј konferencii «Informacionnye tehnologii v upravlenii»* [Collection of works on materials of the Russian conference "Information technologies in management"]. Spb. 2012. pp. 360–365. (In Russ.).
17. Ryzhikov Y.I., Lohvitskii V.A. *Programmnyj kompleks analiza nemarkovskih sistem i setej massovogo obsluzhivaniја s polozhitel'nymi i otricatel'nymi zajavkami* [Software for analysis of non-Markovian systems and Queuing networks with negative and positive applications]. Patent RF, no. 2012616617. 2012.
18. Zhigalko E.Th. [A Singularity of Integral Moment Invariants]. *Intellektual'nye tehnologii na transporte – Intellectual Technologies on Transport*. 2015. no. 4(4). pp. 55–58. (In Russ.).
19. Hu M. Visual Pattern Recognition by Moment Invariants. *IRE Trans. Inf. Theory*. 1962. vol. 8. pp. 179–187.
20. Basyrov A.G., Lebedev D.M., Mastin A.B. [Planning for the parallel processing of information in high-performance computer systems onboard spacecraft control systems]. *Mehatronika, avtomatizatsiya, upravlenie – Mechatronics, Automation, Control*. 2011. no. 1. pp. 74–77. (In Russ.).

**Хомоненко Анатолий Дмитриевич** — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой информационных и вычислительных систем, ФГБОУ ВПО Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. Область научных интересов: численная теория массового обслуживания, программирование, операционные и информационные системы. Число научных публикаций — 150. khomon@mail.ru, <http://www.pgups.ru>; Московский пр., 9, Санкт-Петербург, 190031; п.т.: 8(812)457-80-23, Факс: 8(812)310-75-25.

**Khomonenko Anatoly Dmitrievich** — Ph.D., Dr. Sci., professor, head of information and computing systems department, Petersburg State Transport University. Research interests: queuing systems, artificial intelligence, databases. The number of publications — 150. khomon@mail.ru, <http://www.pgups.ru>; 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031; office phone: 8(812)457-80-23, Fax: 8(812)310-75-25.

**Старобинец Дмитрий Юрьевич** — преподаватель кафедры математического обеспечения ЭВМ, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (ВКА им. А.Ф. Можайского). Область научных интересов: обработка изображений, численная теория массового обслуживания, программирование, операционные и информационные системы. Число научных публикаций — 7. [norf12@rambler.ru](mailto:norf12@rambler.ru); ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198; р.т.: +7(812) 237-95-25.

**Starobinets Dmitriy Yurievich** — teacher of computer software department, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: image processing, queuing systems, artificial intelligence, databases. The number of publications — 7. [norf12@rambler.ru](mailto:norf12@rambler.ru); 13, Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, 197198, Russia; office phone: +7(812) 237-95-25.

**Лохвицкий Владимир Александрович** — к-т техн. наук, доцент кафедры математического и программного обеспечения, Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (ВКА им. А.Ф. Можайского). Область научных интересов: математическое моделирование, численные методы, технологии разработки программного обеспечения, качество программного обеспечения, методы машинного обучения. Число научных публикаций — 35. [vovan296@mail.ru](mailto:vovan296@mail.ru); ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198; р.т.: +7(812) 237-95-25.

**Lokvitskii Vladimir Aleksandrovich** — Ph.D., associate professor of mathematical and software department, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: math modeling, numerical methods, software development technology, software quality, machine learning. The number of publications — 35. [vovan296@mail.ru](mailto:vovan296@mail.ru); 13, Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, 197198, Russia; office phone: +7(812) 237-95-25.

## РЕФЕРАТ

*Хомоненко А.Д., Старобинец Д.Ю., Лохвицкий В.А.* **Модель оценки оперативности функционирования бортового комплекса управления космическими аппаратами дистанционного зондирования Земли.**

В статье предлагается модель оценки функционирования БКУ КА ДЗЗ при условии дополнительного анализа изображений на борту КА с целью оптимизации выбора коэффициента сжатия изображений. Для оценивания оперативности функционирования БКУ КА ДЗЗ предлагается применение моделей разомкнутых сетей массового обслуживания (СеМО) с узлами, представленными многоканальными немарковскими системами массового обслуживания (СМО). Предложенная модель позволяет учесть затраты на сжатие графических изображений и их передачу при расчете распределения времени пребывания заявки в сетевой модели БКУ.

Исходные данные для моделирования информационных процессов в БКУ КА ДЗЗ получены на основе анализа унифицированного бортового вычислительного комплекса (БВК), учитывающего тенденции в современных зарубежных и отечественных проектах, который представляет собой распределенную вычислительную систему, включающую системный контроллер, высокопроизводительную микроЭВМ MicroPC и специализированные контроллеры.

Исходя из состава бортовых систем КА, структуры БВК и архитектуры систем обработки информации, строится разомкнутая СеМО, каждый рабочий узел которой представлен в виде многоканальной немарковской СМО типа M/H2/n.

Расчет СеМО осуществляется путем решения системы уравнений баланса потоков с использованием расчетной схемы Гаусса-Зейделя и итерационного алгоритма Такахаши-Таками, в результате которого рассчитываются характеристики узла и определяются агрегированные характеристики распределения времени пребывания заявок в сети.

На завершительном этапе с помощью свертки начальных моментов распределений времен ожидания и чистого обслуживания заявок производится расчет распределения времени пребывания заявки в сети и строится его дополнительная функция распределения.

Предложенная модель позволяет учесть перераспределение потока заявок СеМО при увеличении нагрузки на целевую аппаратуру обработки изображений и оценить оперативность БКУ КА ДЗЗ с учетом затрат на анализ и сжатие изображений.

## SUMMARY

### *Khomonenko A.D., Starobinets D.Yu., Lokvitskii V.A.* **A Model of Estimating Quickness of Functioning of Onboard Control Systems of Spacecraft Remote Sensing of the Earth.**

The article discusses the evaluation model of the functioning of the onboard control systems of spacecraft remote sensing of the Earth (CSSRS) providing an additional image analysis on-board the spacecraft to optimize the choice of the compression ratio of the images. For estimating the efficiency of functioning CSSRS, it is proposed to use models of open queueing networks (QN) with the nodes represented by non-Markovian multichannel queueing systems (QS). The proposed model allows one to take into account the cost for compression of graphic images and their transfer in the calculation of the distribution of the residence time of the application in the net-work model of CSSRS.

The source data for modeling of information processes in CSSRS is obtained based on the analysis of a standardized onboard computer system (CS), taking into account the trends in modern foreign and domestic projects, which is a distributed computing system that includes a system controller, high-performance microcomputers and specialized MicroPC controllers.

Based on the composition of the onboard systems of the spacecraft, CS structure and architecture of information processing systems, an open QN is constructed, every worker node of which is presented in the form of non-Markovian multichannel queueing systems QS type M/H2/n.

The QN calculation is realized by solving the system of equations of stream balance using the calculated scheme of the Gauss-Seidel iterative algorithm of Takahashi-Takami, in which the characteristics of the node are calculated, and the aggregated characteristics of the residence time distribution of requests in the network are determined.

At the finishing stage, by means of a convolution of the initial moments of the distributions of waiting times and clean service of applications, the calculation of the residence time distribution of the application in the network is carried out, and its complementary distribution function is built.

The proposed model allows one to take into account the redistribution of the flow of applications of QN with the increasing workload on the target hardware image processing and to assess the efficiency of CSSRS including the costs for analysis and image compression.