

УДК: 629.78

DOI: 10.53816/23061456_2022_9–10_35

**МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ СОСТАВА НАЗЕМНЫХ СРЕДСТВ
ИНФОРМАЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
С КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ МНОГОСПУТНИКОВОЙ
ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ**

**METHOD OF SUBSTANTIATION OF THE COMPOSITION GROUND-BASED
MEANS OF INFORMATION INTERACTION WITH SPACECRAFT MULTI —
SATELLITE ORBITAL GROUPING**

Канд. техн. наук С.Х. Зиннуров, канд. техн. наук М.А. Колпин, канд. воен. наук С.Г. Хлебников

Ph.D. S.Kh. Zinnurov, Ph.D. M.A.Kolpin, Ph.D. S.G. Khlebnikov

Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского

В работе сформулирована актуальность задачи обоснования состава наземных средств информационного взаимодействия с космическими аппаратами многоспутниковой орбитальной группировки. Установлено, что одним из основных направлений развития многоспутниковых космических систем является внедрение сетевых технологий информационного обмена между основными ее элементами. Указанное обстоятельство позволяет представить совокупность наземных средств в виде многоканальной системы массового обслуживания и применить для расчета ее параметров модели и методы теории телетрафика. Авторами для обоснования состава наземных средств использована модель Эрланга В, которая широко применяется на практике для расчета объема инфраструктуры действующих и перспективных сетей сотовой связи.

Ключевые слова: информационное взаимодействие, космический аппарат, многоспутниковая орбитальная группировка, наземные средства, система массового обслуживания.

The paper formulates the relevance of the task of substantiating of the composition of ground-based means of information interaction with spacecraft of a multi-satellite orbital grouping. It is established that one of the main directions of the development of multi-satellite space systems is the introduction of network technologies of information exchange between its main elements. This circumstance makes it possible to present a set of ground facilities in the form of a multi-channel queuing system and apply models and methods of teletraffic theory to calculate its parameters. The authors used the Erlang B model to substantiate of the composition of ground facilities, which is widely used in practice to calculate the volume of infrastructure of existing and prospective cellular networks.

Keywords: information interaction, spacecraft, multi-satellite orbital grouping, ground facilities, queuing system.

Введение

Актуальным направлением развития космических систем является создание и применение многоспутниковых орбитальных группировок (ОГ) космических аппаратов (КА).

Проектирование многоспутниковой космической системы любого целевого назначения сопряжено с решением комплекса сложных научно-теоретических и научно-практических задач. Одной из таких актуальных задач является обоснование состава наземных средств (НС), обеспечивающих информационный обмен с КА [1].

Результаты анализа научно-методического задела в части обоснования облика наземного сегмента космических систем и комплексов показывают, что их использование весьма проблематично для многоспутниковых ОГ [2–5]. Данное обстоятельство связано со сложностями формализации и решения задачи отыскания оптимального количества наземных средств в динамической или статической постановке. Количество КА в составе многоспутниковой ОГ обуславливает высокую размерность оптимизационной задачи, а также проблематичность формализованного учета системы технических и технологических ограничений, накладываемых на процесс информационного обмена с КА.

В связи с этим актуальной становится разработка альтернативных подходов к обоснованию облика наземного сегмента многоспутниковых космических систем, позволяющих исходя из состава, структуры и параметров ОГ КА, характеристик наземных средств и бортовых систем КА, а также требований и ограничений технологии информационного обмена с КА получать рациональный, в смысле выбранной системы показателей качества, вариант структуры наземного сегмента многоспутниковой космической системы.

Данная работа посвящена разработке методики обоснования состава НС информационного взаимодействия (ИВ) с КА многоспутниковой ОГ. Решение задачи поиска мест размещения рассчитанного количества НС ИВ целесообразно осуществлять с использованием имеющегося научно-методического задела, позволяющего обеспечить заданный уровень устойчивости наземного сегмента многоспутниковой космической системы в условиях воз-

действия различного рода возмущений, представленного в работе [6].

Математическая постановка задачи выбора состава наземных средств информационного взаимодействия с космическими аппаратами многоспутниковой орбитальной группировки

Тенденции развития многоспутниковых систем свидетельствуют о том, что требуемую эффективность их применения планируется обеспечить за счет внедрения межспутниковых каналов связи и сетевых технологий для информационного обмена с КА [7]. Реализация указанного мероприятия позволяет не только повысить устойчивость, глобальность, и оперативность услуг, предоставляемых многоспутниковой системой, но и расширяет возможности по привлечению известных и апробированных математических моделей и методов для решения задачи обоснования состава НС ИВ таких систем.

Так, проведенный анализ содержания процессов информационного обмена в многоспутниковых системах показал, что ее наземный сегмент может быть представлен в виде многоканальной системы массового обслуживания (СМО), в которой в качестве каналов обслуживания выступают НС ИВ, а заявками на обслуживание являются потоки целевой и технологической информации, которыми обмениваются КА и НС ИВ. Количественный состав многоспутниковой ОГ, технологии и параметры информационного обмена в системе обуславливают наличие в наземном сегменте всех характеристик, присущих СМО: случайный поток заявок на обслуживание КА, продолжительность обслуживания, конечное число каналов обслуживания (количество НС ИВ), требования к качеству обслуживания.

Тогда задача поиска необходимого состава НС ИВ может быть представлена в следующем виде.

Пусть задано:

I — количество КА в составе многоспутниковой ОГ;

N — множество вариантов количественного состава НС ИВ, $N = \{N_s, s = \overline{1, S}, N_s \in N\}$;

t — исследуемый интервал времени;

J — количество операций ИВ с одним КА на интервале t ;

V — средний объем информации, который требуется передать во время операции ИВ;

C — скорость канала связи, выделяемого для проведения операций ИВ;

P_3 — вероятность события, что заявка КА на выполнение операции ИВ с наземным сегментом получит отказ по причине занятости всех наземных средств.

Необходимо найти такое минимальное количество НС ИВ N^* , которое для заданной многоспутниковой ОГ КА и установленной технологии информационного взаимодействия в системе обеспечивает вероятность отказа в обслуживании заявки $P(N^*)$ не более P_3 , то есть:

$$N^* = \arg \max_{N_s \in N, P(N_s) \leq P_3} P(N_s).$$

Описание разработанной методики

Для решения сформулированной задачи предлагается использовать методы расчета систем массового обслуживания. Наиболее общей характеристикой случайного потока задач по информационному обмену НС ИВ и КА является средняя частота поступления данных задач — $\lambda = J/t$, которая измеряется их числом в единицу времени.

Используя величину среднего объема информации V , которую необходимо передать в рамках одной операции ИВ по каналу связи со скоростью C , вводится средняя длительность операции ИВ — T . Тогда под средним трафиком или интенсивностью нагрузки на наземный сегмент многоспутниковой системы понимается величина $A = \lambda T$, которая измеряется в эрлангах.

Необходимо отметить, что время начала обслуживания КА, связанное с решением задач управления КА или целевых задач, традиционно устанавливается соответствующими планами для каждого КА и НС ИВ на текущие сутки. Однако в работе введено допущение, что для многоспутниковой ОГ, в которой информационный обмен реализуется с использованием сетевых технологий, частоту поступления задач на средства наземного сегмента системы можно принять случайной величиной, которая описывается распределением Пуассона.

Тогда вероятность поступления k задач на обслуживание КА за время t :

$$P_k = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}, \quad \lambda t > 0, \quad k \geq 0.$$

При этом среднее число задач на интервале t и дисперсия числа задач на том же интервале равны:

$$\bar{k} = \lambda t, \quad D_k = \lambda t.$$

Для формализации длительности занятости НС ИВ (длительности ИВ с КА) на практике используют непрерывную случайную величину τ , которая представляется экспоненциальным распределением

$$\omega(\tau) = \frac{1}{T} e^{-\frac{\tau}{T}}, \quad \tau \geq 0,$$

а среднее значение и дисперсия равны $\tau = T$ и $D_\tau = T^2$ соответственно.

Для расчета СМО, удовлетворяющих сформулированным выше выражениям, разработано большое количество моделей, позволяющих определить требуемое количество каналов обслуживания для заданного качества обслуживания [8]. Основное отличие данных моделей друг относительно друга заключается в том, что именно происходит с задачей обслуживания, поступающей в моменты времени, когда все НС ИВ заняты. Задачи могут сбрасываться, т.е. аннулироваться (система с отказами), или становиться в очередь и ждать освобождения канала неопределенно долгое время, после чего выполняться в течение необходимого интервала времени (система с ожиданием); возможны промежуточные случаи, например модели с ожиданием, но в течение ограниченных интервалов времени.

Наиболее распространенным способом для расчета количества каналов обслуживания является использование моделей Эрланга (А, В и С) [9].

В модели Эрланга А задача, поступившая в момент занятости всех каналов, становится в очередь, но время ожидания не превышает среднего времени выполнения задачи обслуживания.

В системе с отказами (модель Эрланга В) вероятность отказа (вероятность поступления задачи в момент времени, когда все каналы заняты) определяется выражением:

$$P^B = \frac{\frac{A^N}{N!}}{\sum_{n=0}^N \frac{A^n}{n!}}, \quad (1)$$

где N — число каналов, A — трафик.

В системе с ожиданием (модель Эрланга С) в качестве рассчитываемого параметра выступает вероятность задержки в обслуживании.

Для решения задач определения необходимого количества каналов обслуживания на практике наиболее часто используется модель Эрланга В. В качестве обоснования использования модели Эрланга В указывается, что для малых вероятностей отказа модели Эрланга В и С дают достаточно близкие результаты.

Использование формулы (1) для отыскания N сопряжено с вычислительными проблемами, так как величина $N!$ достаточно быстро увеличивается и перегружает память вычислительной машины. В связи с этим, на практике, для поиска N применяются таблицы Эрланга или рекурсивная формула Эрланга [10].

Рекурсивная формула для модели Эрланга В имеет следующий вид:

$$P_N^B(A) = \frac{AP_{N-1}^B(A)}{N + AP_{N-1}^B(A)}, \quad P_0^B(A) = 1.$$

На основе изложенного подхода к обоснованию состава НС ИВ разработана соответствующая методика, структурно-логическая схема которой представлена на рис. 1.

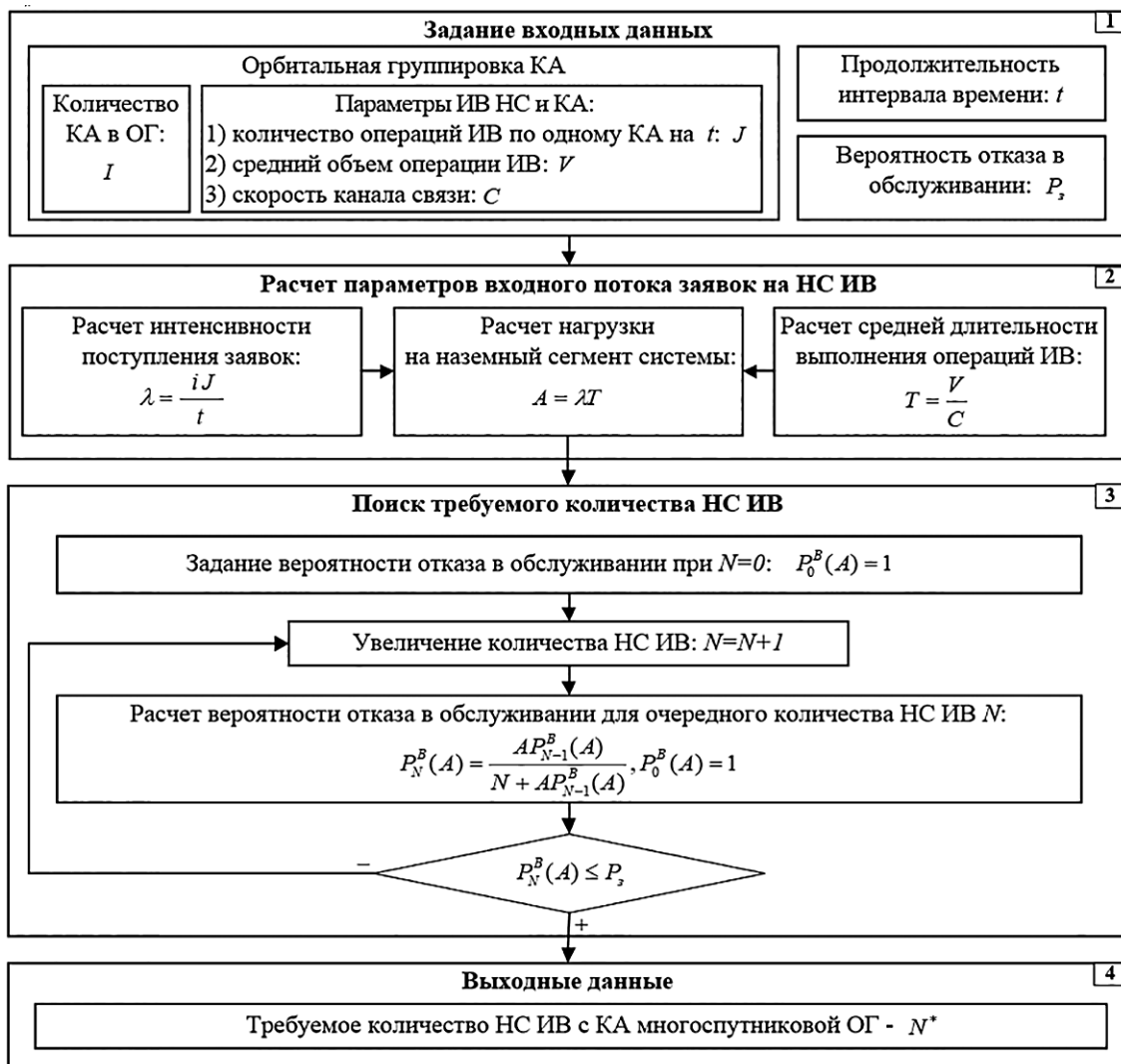


Рис. 1. Структурно-логическая схема методики обоснования состава НС ИВ

На первом этапе методики задаются входные данные о продолжительности исследуемого интервала времени t , количестве КА в многоспутниковой ОГ — I , параметрах ИВ каждого КА на интервале t (количество операций ИВ — J , средний объем операции ИВ — V), а также скорости каналов связи — C и исследуемой вероятности отказа в обслуживании — P_3 .

На втором этапе осуществляется расчет параметров входного потока заявок НС ИВ многоспутниковой системы. Для этого рассчитывается:

– интенсивность потока заявок на НС ИВ —

$$\lambda = \frac{i \cdot J}{t};$$

– средняя продолжительность выполнения

$$\text{операций ИВ} — T = \frac{V}{C};$$

– нагрузка на наземный сегмент — $A = \lambda T$.

На третьем этапе для заданной вероятности отказа (P_3) и вычисленного значения нагрузки (A) производится расчет требуемого количества НС ИВ с использованием рекурсивной формулы Эрланга В.

Необходимо отметить, что вычисление λ и T по представленным выше формулам предлагается использовать для исследования нагрузки на наземный сегмент многоспутниковых космических систем наблюдения, связанной с решением задач управления КА и приема специальной информации. При исследовании нагрузки на наземный сегмент многоспутниковых систем связи необходимо применять прогнозные значения параметров пользовательского трафика исходя из структуры ОГ и текущего количества абонентов системы [11].

Использование предложенной методики позволяет обеспечить решение ряда важных исследовательских задач структурно-параметрического синтеза наземного сегмента многоспутниковых космических систем, к основным из которых относятся:

1) обоснование требуемого количества НС ИВ при заданных параметрах информационного обмена в системе;

2) обоснование требуемой пропускной способности каналов связи при заданной структуре наземного сегмента и параметрах информационного обмена в системе;

3) обоснование требований к параметрам информационного обмена при заданной структуре ОГ и наземного сегмента системы.

Пример расчета с использованием разработанной методики обоснования состава наземных средств информационного взаимодействия с космическими аппаратами многоспутниковой орбитальной группировки

В интересах оценивания эффективности применения разработанной методики проведены расчеты требуемого количества НС ИВ в составе наземного комплекса управления (НКУ) КА многоспутниковой ОГ.

В качестве входных данных рассматривались:

– многоспутниковая ОГ КА: количество КА — 730, орбиты круговые с высотой $h \approx 500$ км, наклонение $i \approx 80^\circ$, орбитальные плоскости равномерно разнесены по долготе восходящего узла;

– интервал исследования — одни сутки;

– количество операций ИВ по каждому КА в сутки: 1; 2; 3; 4;

– средний объем операции ИВ 5 Мб;

– скорость каналов связи — 40 Кб/с;

– исследуемая вероятность отказа P_3 : 0,01; 0,02; 0,03; 0,04; 0,05.

Результаты расчета требуемого количества НС ИВ для описанных входных данных представлены на рис. 2.

Результаты исследования зависимости требуемого количества НС ИВ от объема операций ИВ для различных значений скорости каналов связи при выполнении одной операции по каждому КА в сутки и величине $P_3 = 0,01$ представлены на рис. 3.

В интересах подтверждения достаточности найденного количества НС ИВ в составе НКУ для решения задач управления многоспутниковой ОГ в работе проведено исследование результативности управления КА с использованием метода и реализующего его программного средства, представленных в работе [12].

В качестве исследуемого сценария использовался вариант из шести НС ИВ, которые представлены равномерно по долготе и широте на территории Российской Федерации и обеспечивают управление рассматриваемой ОГ КА проведением одной операции управления каждым КА в сутки.

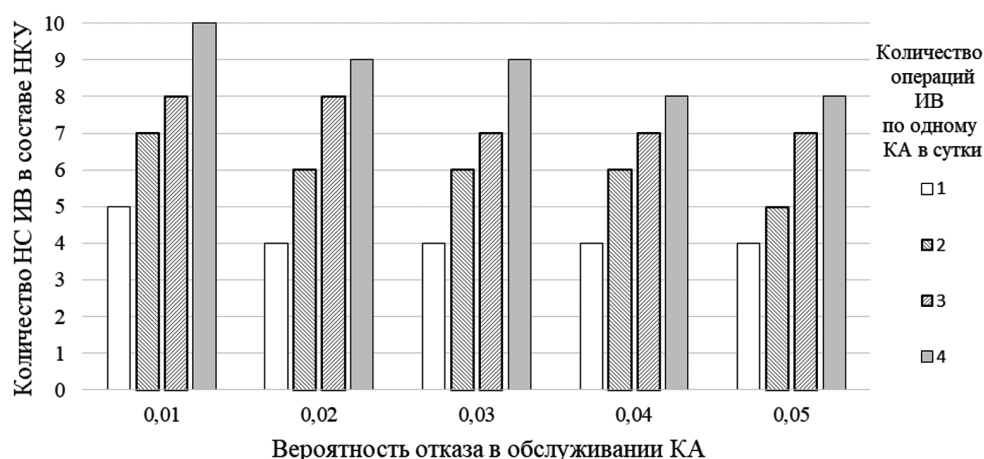


Рис. 2. Результаты расчета количества НС ИВ в составе НКУ КА

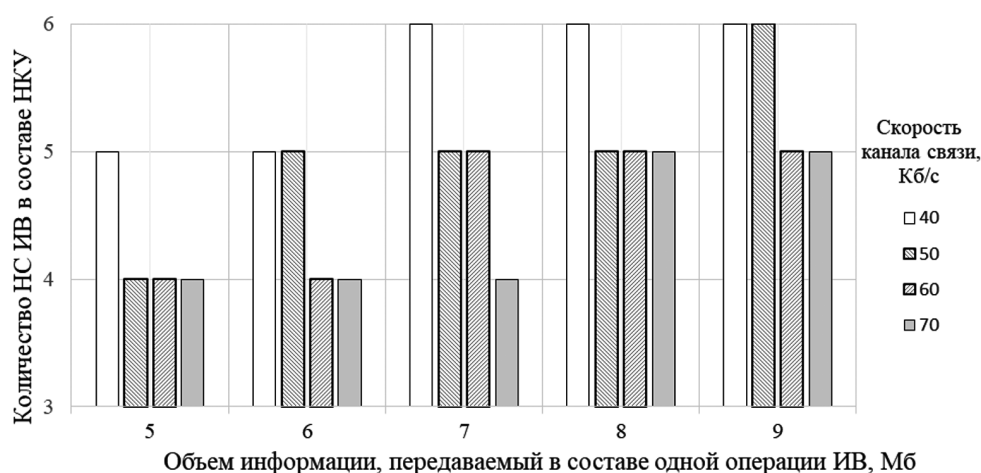


Рис. 3. Зависимость количества НС ИВ от объема операций ИВ для различных значений скорости канала связи

Результаты выполненного исследования представлены на рис. 4 в виде зависимости среднего значения результативности управления КА многоспутниковой ОГ от количества НС ИВ в составе НКУ.

Исследование основывалось на многократном решении задачи определения результативности управления КА для различных суток моделирования, различного количества НС ИВ в составе НКУ и представленных выше исходных данных о многоспутниковой ОГ КА и технологии ИВ, усреднении полученных результатов и построении соответствующей зависимости.

Проведенный анализ данных, представленных на рис. 2–4, позволяет сделать следующие выводы:

- количество НС ИВ, рассчитанное с использованием разработанной методики, позво-

ляет обеспечить решение задач управления КА многоспутниковой ОГ для рассмотренных исходных данных;

- ступенчатый характер зависимости требуемого количества НС ИВ от нагрузки (А) обуславливает наличие определенной ресурсной избыточности в любом варианте построения наземного сегмента многоспутниковой системы, которую целесообразно использовать для обоснования вариантов развития ОГ КА и НС ИВ;

- снижение результативности управления КА многоспутниковой ОГ с уменьшением количества НС ИВ в составе НКУ согласуется со значениями вероятности отказа в обслуживании КА, полученными с использованием разработанной методики.

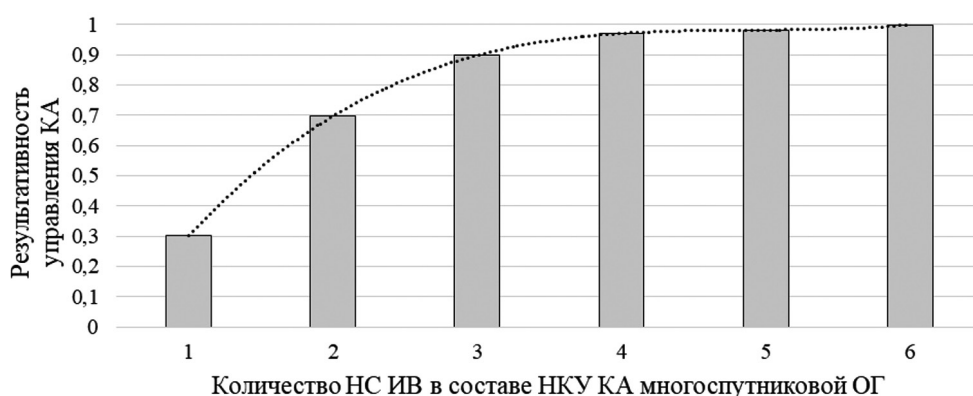


Рис. 4. Зависимость среднего значения результативности управления КА от количества НС ИВ в составе НКУ

Заключение

Разработанная методика основывается на представлении наземного сегмента многоспутниковой космической системы в виде многоканальной СМО с характеристиками входного потока задач и каналов обслуживания, позволяющими применить модель Эрланга В для расчета требуемого количества НС ИВ.

Достоверность результатов применения предлагаемой методики подтверждается высокой сходимостью с результатами анализа возможностей различного количества НС ИВ по обслуживанию многоспутниковой ОГ КА, полученными с использованием оптимизационных алгоритмов теории графов.

Разработанную методику целесообразно использовать для оценивания эффективности применения различных вариантов построения наземного сегмента средств ИВ с КА многоспутниковой ОГ как на этапе проектирования космических систем и комплексов, так и на этапах их развития и совершенствования.

Литература

1. Привалов А.Е., Федяев В.В., Бугайченко П.Ю. Применение многоагентных технологий для построения имитационных моделей многоспутниковых орбитальных группировок дистанционного зондирования Земли [Электронный ресурс] // Труды Первой Всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в военной сфере «Имитационное

моделирование систем военного назначения, действий войск и процессов их обеспечения» («ИМСВН-2020») (Санкт-Петербург, 25 ноября 2020 г.). — СПб.: Изд-во ВА МТО — АО ЦТСС. 2020. С. 219–228.

2. Системный анализ и организация автоматизированного управления космическими аппаратами: учебник / Ю.С. Мануйлов, Е.А. Новиков, А.Н. Павлов, А.Н. Кудряшов, А.В. Петрошенко. — СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2010. 266 с.

3. Ревин С.А., Сарычев А.П. Теоретические положения обоснования структуры автоматизированной системы управления специального назначения // Научные исследования в космических исследованиях Земли. 2014. Том VI. № 3. С. 52–55.

4. Управление космическими аппаратами и средствами наземного комплекса управления: учебник / Ю.С. Мануйлов, В.Н. Калинин, В.С. Гончаревский, И.И. Делий; под общ. ред. Ю.С. Мануйлова. — СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2010. 609 с.

5. Фоминов И.В., Хлебников С.Г. Анализ технологических проблем построения роя малых космических аппаратов // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2019. № 1(141). С. 24–28.

6. Системный анализ организационно-технических систем космического назначения: учебник / А.Н. Павлов, Б.В. Соколов, С.А. Осипенко, Е.Н. Алешин [и др.]. — СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. 360 с.

7. Мырова Л.О., Ментус О.В., Давыдов А.Б. и др. Низкоорбитальные спутниковые системы

связи Starlink и OneWeb // Труды научно-исследовательского института радио. 2021. № 2. С. 36–45.

8. Рыжиков Ю.И. Имитационное моделирование. Теория и технологии. — СПб.: Корона принт, 2004. 380 с.

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

10. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями. Пер. с англ. / Под ред. Б.С. Цыбакова. — М.: Мир, 1979. 600 с.

11. Акмоллов А.Ф., Ковальский А.А., Ефимов С.Н. Предложения по созданию и функционированию многоспутниковой системы связи на основе разнорысотной орбитальной группировки // Труды учебных заведений связи. 2020. № 6 (1). С. 22–31.

12. Колпин М.А., Фролов О.П., Протсенко П.А. Метод планирования операций управления космическими аппаратами многоспутниковой орбитальной группировки // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2020. № 4 (114). С. 69–75.

References

1. Privalov A.E., Fedyaev V.V., Bugaychenko P.Yu. Use of mnogoagentny technologies for creation of simulation models of multi-satellite orbital groups of remote sensing of Earth [Electronic resource] // Works of the First All-Russian academic and research conference on imitating modeling and its application in the military sphere «Imitating modeling of systems of military purpose, actions of troops and processes of their providing» («IMSVN-2020») (St. Petersburg, November 25, 2020). — St. Petersburg: Publishing House VA MTO — JSC TsTSS. 2020. Pp. 219–228.

2. System analysis and organization of automated spacecraft control: textbook / Yu.S. Manuilov, E.A. Novikov, A.N. Pavlov, A.N. Kudryashov, A.V. Petoshenko. — St. Petersburg: VKA named after A.F. Mozhaisky, 2010. 266 p.

3. Revin S.A., Sarychev A.P. Theoretical provisions for substantiating the structure of an automated special-purpose control system // Science-intensive technologies in Earth space research. 2014. Volume VI. No. 3. Pp. 52–55.

4. Control of spacecraft and means of the ground control complex: textbook / Yu.S. Manuilov, V.N. Kalinin, V.S. Goncharevsky, I.I. Deliy; under the general. Ed. Yu.S. Manuylova. — St. Petersburg: VKA named after A.F. Mozhaisky, 2010. 609 p.

5. Fominov I.V., Khlebnikov S.G. Analysis of technological problems of building a swarm of small spacecraft // Defense complex — scientific and technical progress of Russia. 2019. № 1(141). Pp. 24–28.

6. System analysis of organizational and technical systems for space purposes: textbook / A.N. Pavlov, B.V. Sokolov, S.A. Osipenko, E.N. Aleshin [and others]. — St. Petersburg: VKA named after A.F. Mozhaisky, 2018. 360 p.

7. Myrova L.O., Mentus O.V., Davydov A.B. et al. Low-orbit satellite communication systems Starlink and OneWeb // Proceedings of the Radio Research Institute. 2021. № 2. Pp. 36–45.

8. Ryzhikov Yu.I. Simulation modeling. Theory and Technolog. — St. Petersburg: Crown Print, 2004. 380 p.

9. Stepanov S.N. Theory of teletraffics: concepts, models, applications. — M: Hotline – Telecom. 2015. 868 p.

10. Kleinrock L. Computing systems with queues. Per. from English / Ed. B. S. Tsybakov. — M.: World. 1979. 600 p.

11. Akmolov A.F., Kovalsky A.A., Efimov S.N. Proposals for the creation and functioning of a multi-satellite communication system based on a different-height orbital grouping // Proceedings of educational communication institutions. 2020. № 6 (1). Pp. 22–31.

12. Kolpin M.A., Frolov O.P., Protsenko P.A. Method of planning operations for the control of spacecraft of a multi-satellite orbital group // News of the Russian Academy of Missile and Artillery Sciences. 2020. № 4 (114). Pp. 69–75.