

УДК 621.314.5

doi: 10.18698/0536-1044-2019-11-55-65

Методика расчета показателей эффективности системы управления полетом космических аппаратов

И.Н. Пантелеймонов¹, А.Ю. Потюпкин¹, В.М. Траньков¹,
А.В. Пантелеймонова², В.В. Филатов³, В.В. Тодуркин⁴

¹ АО «Российские космические системы»

² ГОУ ВО Московской области «Московский государственный областной университет»

³ АО «НПК СПП»

⁴ Санкт Петербургский техникум железнодорожного транспорта — структурное подразделение ФГБОУ ВПО Петербургский государственный университет путей сообщения им. Александра I

Methods of Calculation of Performance Indicators of Spacecraft Flight Control Systems

I.N. Panteleymonov¹, A.Y. Potyupkin¹, V.M. Trankov¹,
A.V. Panteleymonova², V.V. Filatov³, V.V. Todurkin⁴

¹ AO Russian Space Systems

² State Educational Institution of Higher Education of Moscow region — Moscow State Regional University

³ AO NPK SPP

⁴ Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education — Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

Разработана методика оценки эффективности систем управления космическими аппаратами в полете. Введены, обоснованы и рассчитаны на примерах критерии эффективности управления космическими аппаратами. В качестве основных критериев эффективности заданы доступность бортовой аппаратуры, оперативность управления ею, трудозатраты на подготовку и проведение сеансов связи и управления, надежность системы связи. Для примера проведены расчеты критериев эффективности космических систем, управляемых без применения и с применением спутников-ретрансляторов. Дан сравнительный анализ различных подходов к реализации систем управления космическими системами в полете. Предложенная методика дает разработчику космических систем инструмент оценки эффективности систем управления ими в полете.

Ключевые слова: сеанс связи и управления, космический аппарат, центр управления полетом, система управления полетом, командно-измерительная станция, бортовая аппаратура

The article examines the problem of developing methods for evaluation of the effectiveness of space systems in flight. The criteria of spacecraft control efficiency are introduced, justified and calculated on examples. The accessibility and operational efficiency of on-board instrumentation, labour costs associated with the preparation and execution of communication and control sessions as well as reliability of communication systems are set as the main criteria of efficiency. As an example, the criteria of efficiency of space systems controlled with and without relay satellites are calculated. A comparative analysis of various approaches to the realization of space system in-flight control is performed. The developed methods can be used as a tool to evaluate the efficiency of space system in-flight control.

Keywords: communication and control session, spacecraft, mission control center, flight control system, command-measuring station, on-board equipment

Проведение системного анализа существующих и вновь создаваемых систем — важный этап системного проектирования. Для существующей системы такой анализ проводят с целью выявления недостатков и уязвимостей, а для вновь создаваемой системы — чтобы подтвердить успешное решение задачи устранения обнаруженных недостатков и уязвимостей, присущих системе, находящейся в эксплуатации.

Системный анализ систем основан на анализе конкретных параметров. Инструментом оценки эффективности их функционирования служит решение задачи сравнения заданных критериев эффективности. Одной из основных задач системного анализа систем является оценка эффективности их работы, главной составляющей которой является определение эффективности системы управления.

Цель работы — разработка математического аппарата расчета эффективности системы управления полетом космических аппаратов (КА) на основе заданных критериев.

Задание показателей эффективности системы управления полетом КА. К показателям качества системы управления КА и наземного автоматизированного комплекса управления относятся [1–4]: глобальность, непрерывность, оперативность, точность прогноза движения на момент решения целевых задач, надежность управления КА, производительность и пропускная способность.

Предлагаемая методика расчета показателей эффективности системы управления полетом КА задает порядок расчета и анализа непрерывности, оперативности, надежности управления и производительности.

Непрерывность связана с доступностью объекта управления в течение срока эксплуатации. Для ее оценки выбран критерий доступности, определяемый коэффициентами доступности оператора центра управления полетами (ЦУП) к бортовой аппаратуре (БА) КА и прерывности связи.

Оперативность зависит от задержки (времени реагирования) на получение информации о состоянии (телеметрии) объекта управления, принятие решения и доведение управляющих воздействий до объекта управления. В качестве критерия оценки оперативности выбрано время оперативного реагирования.

Надежность управления КА определяется вероятностью установления связи и вероятностью невхождения в связь.

Производительность оценивается с помощью одного из ее основных критериев — трудозатрат на подготовку и проведение сеансов управления и связи, так как снижение затрат на развертывание и эксплуатацию системы управления — важный фактор повышения рентабельности.

Расчет показателей доступности БА КА для контроля и управления оператором центра управления полетом (ЦУП) орбитальной группировки (ОГ).

Средняя продолжительность сеансов связи (СС) в течение одного витка определяется выражением

$$T_{CC}^{1B} = T_{ICC}^{1B} N_{CC}^{1B}, \text{ мин.},$$

где T_{ICC}^{1B} — продолжительность одного СС в течение одного витка; N_{CC}^{1B} — количество СС в течение одного витка.

Коэффициент доступности оператора ЦУП (связи) к БА в течение одного витка

$$k_{д.с}^{1B} = \frac{T_{CC}^{1B} \cdot 100}{T_B}, \text{ \%},$$

где T_B — продолжительность одного витка.

Средняя продолжительность перерывов связи в течение одного витка

$$T_{п}^{1B} = T_B - T_{CC}^{1B}, \text{ мин.}$$

Коэффициент прерывности связи с БА в течение одного витка

$$k_{п.с}^{1B} = 100 - k_{д.с}^{1B}, \text{ \%}.$$

Коэффициент доступности витков (коэффициент, показывающий количество витков, на которых устанавливалась связь с БА) в течение одних суток

$$k_{д.в}^{1c} = \frac{N_{в.с}^{1c} \cdot 100}{N_B^{1c}}, \text{ \%},$$

где $N_{в.с}^{1c}$ — количество витков в течение одних суток, на которых устанавливалась связь; N_B^{1c} — количество витков в течение одних суток.

Коэффициент витковой прерывности (коэффициент, показывающий количество вит-

ков, на которых отсутствует связь) в течение одних суток

$$k_{п.в}^{1c} = 100 - k_{д.в}^{1c}, \%$$

Среднее время установления связи в течение одних суток

$$T_c^{1c} = T_{CC}^{1в} N_B^{1c}, \text{ мин,}$$

где N_B^{1c} — среднее количество витков в течение одних суток.

Коэффициент доступности связи (коэффициент, показывающий среднюю продолжительность установления связи) в течение одних суток

$$k_{д.с}^{1c} = \frac{T_c^{1c} \cdot 100}{T_{1c}}, \%$$

где T_{1c} — продолжительность одних суток, $T_{1c} = 1440$ мин.

Коэффициент прерывности связи (коэффициент, показывающий среднюю продолжительность отсутствия связи) в течение одних суток

$$k_{п.с}^{1c} = 100 - k_{д.с}^{1c}, \%$$

Среднее время ожидания СС в течение одного витка

$$T_{о.с}^{1в} = T_B - T_{CC}^{1в}, \text{ мин.}$$

Максимальное время ожидания СС в течение одних суток

$$T_{о.с}^{1c} = N_{в.п}^{1c} T_B, \text{ мин,}$$

где $N_{в.п}^{1c}$ — количество витков в течение одних суток, на которых отсутствовала связь.

Для примера в табл. 1 приведены результаты расчета показателей длительности связи с российским сегментом (РС) международной космической станции (МКС) с применением и без применения спутников-ретрансляторов (СР) [5–9]. В табл. 1 введены следующие обозначения: $N_{вСС}^{1c}$ — количество витков в течение одних суток, на которых есть СС; $\Delta T_{CC}^{1в}$ — рост средней продолжительности СС в течение одного витка; T_c^{1c} , ΔT_c^{1c} — средняя продолжительность СС в течение одних суток и ее рост.

Для примера в табл. 2 приведены результаты расчета показателей доступности РС МКС к проведению СС с применением и без применения СР [5–9]. Здесь введены следующие

Таблица 1

Расчетные значения показателей длительности связи с РС МКС

Режим работы	$N_{СС}^{1в}$	$N_{вСС}^{1c}$	N_B^{1c}	$T_{1СС}^{1в}$, мин	$T_{СС}^{1в}$, мин	$\Delta T_{СС}^{1в}$, %	T_B , мин	T_c^{1c} , мин	ΔT_c^{1c} , %
Без применения СР	2	10	16	10	20	–	90	200	–
С применением СР	1	16	16	90	90	77,8	90	1440	86,1

Таблица 2

Расчетные значения показателей доступности РС МКС к проведению СС

Режим работы	$k_{д.с}^{1в}$	$\Delta k_{д.с}^{1в}$	$k_{д.с}^{1c}$	$\Delta k_{д.с}^{1c}$	$k_{д.в}^{1c}$	$\Delta k_{д.в}^{1c}$
	%					
Без применения СР	22,2	–	13,9	–	62,5	–
С применением СР	100,0	78,0	100,0	86,0	100,0	38,0

Таблица 3

Расчетные значения показателей прерывности связи с РС МКС

Режим работы	$k_{п.с}^{1в}$	$\Delta k_{п.с}^{1в}$	$k_{п.с}^{1c}$	$\Delta k_{п.с}^{1c}$	$k_{п.в}^{1c}$	$\Delta k_{п.в}^{1c}$
	%					
Без применения СР	77,8	–	86,1	–	37,5	–
С применением СР	0	78,0	0	86,0	0	38,0

щие обозначения: $\Delta k_{д,с}^{1в}$ и $\Delta k_{д,с}^{1с}$ — рост коэффициента доступности связи в течение одного витка и одних суток, %; $\Delta k_{д,в}^{1с}$ — рост коэффициента доступности витков в течение одних суток, %.

Для примера в табл. 3 приведены результаты расчета показателей прерывности связи с РС МКС с применением и без применения СР [5–9]. Здесь введены следующие обозначения: $\Delta k_{п,с}^{1в}$ — рост коэффициента прерывности связи с БА КА в течение одного витка, %; $\Delta k_{п,в}^{1с}$ — рост коэффициента витковой прерывности в течение одних суток; $\Delta k_{п,с}^{1с}$ — рост коэффициента прерывности связи с БА КА в течение одних суток, %.

Расчет показателей оперативности управления БА КА оператором ЦУП. Показателем оперативности управления БА КА оператором ЦУП является время оперативного реагирования

$$T_{\text{опер}} = T_{\text{прмТМИ}} + T_{\text{аналТМИ}} + T_{\text{планКПИ}} + T_{\text{выдУВ}},$$

где $T_{\text{прмТМИ}}$ — время, затраченное на получение информации о состоянии БА КА, мин; $T_{\text{аналТМИ}}$ — время проведения анализа телеметрической информации (ТМИ), мин; $T_{\text{планКПИ}}$ — время составления (планирования) командно-программной информации (КПИ), мин; $T_{\text{выдУВ}}$ — время выдачи управляющих воздействий (УВ).

Для примера в табл. 4 приведены результаты расчета показателей оперативности управления РС МКС с применением и без применения СР [5–9]. Здесь введены следующие обозначения: $T_{\text{выдУВ}}$ — среднее время выдачи УВ текстовом и графическом режимах; $\Delta T_{\text{опер}}$ — рост времени оперативного реагирования.

Расчет показателей трудозатрат на подготовку и проведение СС и управления. В общем случае трудозатраты (ТЗ) определяются выражением

$$A_{\text{ТЗ}} = N_{\text{перс}} T_3, \text{ чел./ч,}$$

где $N_{\text{перс}}$ — количество задействованного персонала; T_3 — время, затраченное на производство работ.

Вычисление показателей ТЗ целесообразно осуществлять в масштабе одних суток, так как программа работ задается на одни сутки, и они ведутся одним дежурным расчетом в течение одних суток.

Трудозатраты на подготовку и проведение СС в течение одних суток

$$A_{\text{ТЗ}}^{1с} = A_{\text{подг}}^{1с} + A_{\text{пров}}^{1с}, \text{ чел./ч,}$$

где $A_{\text{подг}}^{1с}$ — ТЗ на подготовку СС в течение одних суток; $A_{\text{пров}}^{1с}$ — ТЗ на проведение СС в течение одних суток.

Расчет показателей ТЗ на подготовку СС и управления. Трудозатраты на подготовку к проведению работ по КА определяются выражением

$$A_{\text{подг}} = A_{\text{БО}} + A_{\text{пл}}, \text{ чел./ч.}$$

Здесь $A_{\text{БО}}$ — ТЗ на расчет баллистического обеспечения (БО); $A_{\text{пл}}$ — ТЗ на планирование работ,

$$A_{\text{пл}} = A_{\text{пл,д}} + A_{\text{пл}}^{1с}, \text{ чел./ч,}$$

где $A_{\text{пл,д}}$ — ТЗ на долгосрочное планирование работ; $A_{\text{пл}}^{1с}$ — ТЗ по планированию работ на одни сутки,

$$A_{\text{пл,д}} = A_{\text{плСАС}} + A_{\text{пл}}^{1г} + A_{\text{пл}}^{1м} + A_{\text{пл}}^{1н}, \text{ чел./ч,}$$

где $A_{\text{плСАС}}$, $A_{\text{пл}}^{1г}$, $A_{\text{пл}}^{1м}$ и $A_{\text{пл}}^{1н}$ — ТЗ по планированию работ на весь срок активного существования (САС), на один год, один месяц и одну неделю соответственно.

Трудозатраты по планированию работ на одни сутки

$$A_{\text{пл}}^{1с} = A_{\text{ПЗС}}^{1с} + A_{\text{КПО}}^{1с}.$$

Таблица 4

Расчетные значения показателей оперативности управления РС МКС

Режим работы	$T_{\text{прмТМИ}}$, мин	$T_{\text{аналТМИ}}$, мин	$T_{\text{планКПИ}}$, мин	$T_{\text{текст}}^{\text{выдУВ}}$, с	$T_{\text{граф}}^{\text{выдУВ}}$, с	$T_{\text{опер}}$, мин	$\Delta T_{\text{опер}}$, %
Без применения СР	$\frac{80}{540}$	$\frac{30}{30}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{6}{6}$	$\frac{5}{5}$	$\frac{110}{570}$	–
С применением СР	$\frac{0}{0}$	$\frac{30}{30}$	$\frac{10}{10}$	$\frac{6}{6}$	$\frac{5}{5}$	$\frac{10}{10}$	$\frac{90,9}{98,2}$

Примечание. В числителе дроби указаны значения для полета КА над территорией РФ, в знаменателе — за пределами РФ.

Здесь $A_{ПЗС}^{1c}$ — ТЗ на составление плана за- действия средств (ПЗС) в течение одних суток; $A_{КПО}^{1c}$ — ТЗ на задание командно- программно обеспечения (КПО) в течение одних суток,

$$A_{КПО}^{1c} = A_{СРК}^{1c} + A_{ВПУ}^{1c}, \text{ чел./ч,}$$

где $A_{СРК}^{1c}$ — ТЗ на составление списка разовых команд (СРК) для командно-измерительных станций (КИС) в течение одних суток; $A_{ВПУ}^{1c}$ — ТЗ на создание временной программы управления (ВПУ) работой БА в течение одних суток.

Трудозатраты на подготовку к проведению СС в течение одних суток определяются выра- жением

$$A_{подг}^{1c} = A_{пл}^{1c} + A_{БО}^{1c}, \text{ чел./ч.}$$

Здесь $A_{пл}^{1c}$ — ТЗ по планированию работ на одни сутки; $A_{БО}^{1c}$ — ТЗ на расчет БО в течение одних суток,

$$A_{БО}^{1c} = A_{НУ}^{1c} + A_{ЗРВ}^{1c} + A_{ЦУ}^{1c} + A_{откл}^{1c}, \text{ чел./ч,}$$

где $A_{НУ}^{1c}$, $A_{ЗРВ}^{1c}$, $A_{ЦУ}^{1c}$ — ТЗ на расчет начальных условий (НУ), зон радиовидимости (ЗРВ) ко- мандно-измерительного пункта, целеуказаний (ЦУ) для антенных систем КИС и отклонений в течение одних суток соответственно.

Кроме того, не чаще одного раз в месяц по- являются ТЗ на расчет прогноза зон освещен- ности (ПЗО) $A_{ПЗО}$ и один раз в три месяца — ТЗ на расчет маневрирования A_M , т. е. допол- нительные ТЗ на расчет баллистического обес- печения

$$A_{допБО} = A_{ПЗО} + A_M, \text{ чел./ч.}$$

Трудозатраты на расчет СРК в течение од- них суток

$$A_{СРК}^{1c} = N_{СС}^{1c} A_{СРК}^{1CC}, \text{ чел./ч,}$$

где $N_{СС}^{1c}$ — количество СС в одних сутках; $A_{СРК}^{1CC}$ — ТЗ по составлению СРК на один СС.

ВПУ рассчитывается, как правило, один раз в сутки, и ТЗ на ее создание $A_{ВПУ}^{1c}$ определяются выражением

$$A_{ВПУ}^{1c} = A_{ВПСЛА}^{1c} + A_{ВПСПА}^{1c}, \text{ чел./ч,}$$

где $A_{ВПСЛА}^{1c}$ и $A_{ВПСПА}^{1c}$ — ТЗ на создание времен- ной программы управления работой служебной (ВПСЛА) и специальной (ВПСПА) аппаратуры.

Среднее время, затраченное на составление ПЗС в течение одних суток,

$$T_{ПЗС}^{1c} = N_{СС}^{1c} T_{ПЗС}^{1CC}, \text{ мин.}$$

Здесь $T_{ПЗС}^{1CC}$ — среднее время, затраченное на составление ПЗС в течение одного СС,

Таблица 5

Результаты расчета затрат на подготовку к проведению сеансов управления РС МКС без применения СР

Параметр	Составление					Расчет БО	Подготовка к проведению СС
	ПЗС	СРК	ВПСЛА	ВПСПА	ВПУ		
Количество персонала, чел.	2	2	2	2	2	2	12
Количество СС в одних сутках	10	10	1	1	1	–	–
Количество КА	–	–	6	6	6	6	–
Количество задействованных КИС и ЗС в одном СС	6	–	–	–	–	–	–
Количество задействованных КИС в одном СС	–	2	–	–	–	–	–
Среднее время, затраченное на один КА	–	–	60	60	120	180	–
Среднее время, затраченное на все КА	–	–	360	360	720	180	900
Среднее время, затраченное на одну КИС или ЗС	1	–	–	–	–	–	–
Среднее время, затраченное на одну КИС в одном СС	–	30	–	–	–	–	–
Среднее время, затраченное на все КИС на всех СС	60	600	–	–	–	–	600
Трудозатраты, чел./мин	120	1200	720	720	1440	360	4560
чел./ч	2	20	12	12	24	6	76

$$T_{ПЗС}^{1СС} = N_{ЗС}^{1СС} T_{ПЗС}^{1ЗС},$$

где $N_{ЗС}^{1СС}$ — количество задействованных земных станций (ЗС) в течение одного СС; $T_{ПЗС}^{1ЗС}$ — среднее время, затраченное на составление ПЗС одной ЗС в течение одного СС.

Среднее время, затраченное на составление СРК в течение одних суток,

$$T_{СРК}^{1С} = N_{СС}^{1С} T_{СРК}^{1СС}, \text{ мин.}$$

Здесь $T_{СРК}^{1СС}$ — среднее время, затраченное на составление СРК для КИС в течение одного СС,

$$T_{СРК}^{1СС} = N_{КИС}^{1СС} T_{СРК}^{1КИС}, \text{ мин.}$$

где $N_{КИС}^{1СС}$ — количество задействованных КИС в одном СС; $T_{СРК}^{1КИС}$ — среднее время, затраченное на составление СРК для одной КИС.

Среднее время, затраченное на создание ВПУ в течение одних суток

$$T_{ВПУ}^{1С} = T_{ВПСЛА} + T_{ВПСПА}, \text{ мин.}$$

где $T_{ВПСЛА}$ и $T_{ВПСПА}$ — среднее время, затраченное на составление ВПСЛА и ВПСПА для одного КА в течение одного СС.

В качестве примера в табл. 5 приведены результаты расчета затрат на подготовку к проведению сеансов управления РС МКС без применения СР, а в табл. 6 — с применением СР [5–9].

Расчет показателей трудозатрат на проведение сеансов связи и управления. Трудозатраты на проведение СС в течение одних суток

$$A_{пр}^{1С} = A_{пр}^{1СС} N_{СС}^{1С}, \text{ чел./ч.}$$

Здесь $A_{пр}^{1СС}$ — ТЗ на проведение одного СС,

$$A_{пр}^{1СС} = A_{ОР}^{1С} + A_{ТМИ}^{1СС}, \text{ чел./ч.}$$

где $A_{ОР}^{1С}$ — ТЗ на проведение оперативной работы (ОР); $A_{ТМИ}^{1СС}$ — ТЗ на анализ ТМИ.

Трудозатраты на проведение оперативной работы в одном СС

$$A_{ОР}^{1СС} = A_{КПИ}^{1СС} + A_{упрЗС}^{1СС} + A_{анТМИ}^{1СС}, \text{ чел./ч.}$$

Здесь $A_{КПИ}^{1СС}$ — ТЗ на выдачу КПИ на БА КА; $A_{упрЗС}^{1СС}$ — ТЗ на управление работой ЗС по приему ТМИ, измерению текущих навигационных параметров (ИТНП) и приему/передаче другой информации; $A_{анТМИ}^{1СС}$ — ТЗ на анализ ТМИ и подготовку предложений по изменению СРК.

Трудозатраты на выдачу КПИ на БА КА в одном СС

$$A_{КПИ}^{1СС} = A_{КПИ}^{1КИС} N_{КИС}^{1СС}, \text{ чел./ч.}$$

где $A_{КПИ}^{1КИС}$ — ТЗ на выдачу КПИ одной КИС на БА КА; $N_{КИС}^{1СС}$ — количество задействованных в сеансе связи КИС.

Таблица 6

Результаты расчета затрат на подготовку к проведению сеансов управления РС МКС с применением СР

Параметр	Составление					Расчет БО	Подготовка к проведению СС
	ПЗС	плана работ	ВПСЛА	ВПСПА	ВПУ		
Количество персонала, чел.	0	2	2	2	2	2	10
Количество СС в одних сутках	0	1	1	1	1	-	-
Количество КА	-	6	6	6	6	6	-
Количество задействованных КИС/ЗС в одном СС	0	3	-	-	-	-	-
Количество задействованных КИС в 1 СС	-	2	-	-	-	-	-
Продолжительность 1 СС	-	1440	-	-	-	-	-
Среднее время, затраченное на 1 КА	-	30	30	60	90	180	-
Среднее время, затраченное на все КА	-	180	180	360	540	180	720
Трудозатраты, чел./мин	0	360	360	720	1080	360	2880
чел./ч	0	6	6	12	18	6	48

Таблица 7

Расчетные значения затрат на проведение сеансов управления РС МКС

Параметр	Выдача КПИ	Управление ЗС	Анализ ТМИ	Проведение СС
Количество персонала $N_{перс}$, чел.	2/2	2/1	2/2	-/5
Количество СС в одних сутках $N_{СС}^{1СС}$	10/4	10/1	10/2	-
Количество ЗС в одном СС $N_{ЗС}^{1СС}$	-	6/3	-	-
Количество задействованных КИС в одном СС $N_{КИС}^{1СС}$	2/1	-	-	-
Количество потоков ТМИ в одном СС $N_{потТМИ}^{1СС}$	-/4	-	4/4	-
Среднее время проведения одного СС $T_{СС}$, мин	10/360	10/10	-	-
Среднее время анализа одного потока ТМИ $T_{ТМИ}^{1пот}$, мин	-	-	30/5	-
Среднее время проведения всех СС в течение одних суток $T_{СС}^{1С}$, мин	100/1440	100/1440	1200/1440	-
Трудозатраты $A_{ПЗС}^{1С}$, чел./мин (чел./ч)	200/2880 3,3/48,0	200/1440 3,3/24,0	2400/2880 40,0/48,0	2800/7200 46,7/120,0

Примечание. В числителе дроби указаны значения без применения СР, в знаменателе — с применением СР.

Трудозатраты на управление работой ЗС по приему ТМИ, измерению ИТНП и приему/передаче другой информации в одном СС

$$A_{упрЗС}^{1СС} = A_{упрЗС}^{13С} N_{ЗС}^{1СС}, \text{ чел./ч.}$$

Здесь $A_{упр}^{13С}$ — ТЗ на управление работой одной ЗС; $N_{ЗС}^{1СС}$ — количество ЗС в одном СС.

Трудозатраты на анализ ТМИ и подготовку предложений по изменению СРК в одном СС

$$A_{анТМИ}^{1СС} = A_{анТМИ}^{1пот} N_{потТМИ}^{1СС},$$

где $A_{анТМИ}^{1пот}$ — ТЗ на анализ одного потока ТМИ; $N_{потТМИ}^{1СС}$ — количество потоков ТМИ, принимаемых в одном СС.

Следует отметить, что работы по обработке результатов ИТНП включены в перечень мероприятий по подготовке к проведению СС как расчет БО.

Показателями временных затрат на выполнение СС являются среднее время проведения одного сеанса связи $T_{СС}$, среднее время выполнения анализа одного потока ТМИ $T_{ТМИ}^{1пот}$ и среднее время проведения всех СС в течение одних суток $T_{СС}^{1С} = T_{СС} N_{СС}^{1СС}$.

Для примера в табл. 7 приведены результаты расчета затрат на проведение сеансов управления РС МКС с применением и без применения СР [5–9].

Итоговый расчет показателей трудозатрат на подготовку и проведение сеансов

связи и управления. Суммарные затраты на подготовку и проведение сеансов управления и связи по РС МКС без применения и с применением СР приведены в табл. 8 [5–9].

Анализ результатов расчетов ТЗ в течение суток показывает, что суммарные трудозатраты при применении СР растут на 27 %, а общее количество задействованного персонала уменьшается на 16,7 %, причем персонал дежурной смены задействован более равномерно.

Расчет показателей надежности системы связи. При пролете КА над зоной радиовидимости ЗС вероятность установления связи в радиолинии Земля — борт (фидерной линии связи — ФЛС) $p_{ф}$ должна быть не менее 0,9. Тогда вероятность невхождения в связь

Таблица 8

Суммарные затраты на подготовку и проведение сеансов управления и связи по РС МКС

Этап сеансов управления и связи	Количество персонала, чел.	Трудозатраты, чел./ч
Подготовка	12/10	76,0/48,0
Проведение	6/5	46,7/120,0
Всего	18/15	122,7/168,0
Изменение, %	16,7/-	-/27,0

Примечание. В числителе дроби указаны значения без применения СР, в знаменателе — с применением СР.

Таблица 9

**Значения вероятности установления связи
без применения ОГ СР**

Местоположение КА	Количество ЗС	q	p
За пределами РФ	0	1	0
Над территорией РФ	1	0,1	0,9
	2	0,01	0,99
	3	0,001	0,999
	4	0,0001	0,9999

Таблица 10

**Значения вероятности установления связи
с применением ОГ ГСР**

Местоположение КА	Количество ЛС			q	p
	ФЛС	МЛС	Общее		
За пределами РФ	0	1	1	0,1	0,9
	0	2	2	0,01	0,99
Над территорией РФ	1	1	2	0,01	0,99
	1	2	3	0,001	0,999
	2	1	3	0,001	0,999
	2	2	4	0,0001	0,9999
	3	1	4	0,0001	0,9999
	3	2	5	0,00001	0,99999
	4	1	5	0,00001	0,99999
	4	2	6	0,000001	0,999999

$$q_{\Phi} = 1 - p_{\Phi} = 1 - 0,9 = 0,1.$$

При пролете КА над территорией РФ связь с ним на одном и том же витке могут установить не менее одной и не более четырех ЗС.

Таблица 11

Результаты расчета вероятности установления связи с применением ОГ ССР или НСР

Местоположение КА	Количество ЛС			q	p	
	ФЛС	МЛС	Общее		Значение	Рост, %
За пределами РФ	0	1	1	0,1	0,9	100
	0	2	2	0,01	0,99	100
Над территорией РФ	1	1	2	0,01	0,99	9,09090909
	1	2	3	0,001	0,999	9,90990991
	2	1	3	0,001	0,999	0,90090090
	2	2	4	0,0001	0,9999	0,99009901
	3	1	4	0,0001	0,9999	0,09000900
	3	2	5	0,00001	0,99999	0,09900099
	4	1	5	0,00001	0,99999	0,00900009
	4	2	6	0,000001	0,999999	0,00990001

Вероятность невхождения в связь q_{Φ} при пролете КА над N ЗС определяется как

$$p_i = 1 - \prod_{i=1}^N q_i.$$

При $i = 4$ $p_4 = 1 - q_1 q_2 q_3 q_4$.

Результаты расчета вероятности установления связи в ФЛС в зависимости от количества ЗС приведены в табл. 9 [7, 8].

Из табл. 9 видно, что количество девяток после запятой у значений вероятности установления связи равно количеству имеющихся линий связи.

При наличии ОГ геостационарных спутников-ретрансляторов (ГСР) КА на любом участке траектории полета может установить связь не менее чем с одним СР и не более чем с двумя ближайшими СР. Таким образом, имеются дополнительно одна-две линии связи с КА.

Результаты расчета вероятности установления связи с КА в зависимости от количества линий связи (ЛС) с применением ОГ ГСР приведены в табл. 10 [7, 8], где МЛС — межспутниковые ЛС.

При наличии ОГ низко- (НСР) или среднеорбитальных спутников-ретрансляторов (ССР) КА на любом участке траектории полета может установить связь с четырьмя ближайшими СР. Таким образом, дополнительно имеются четыре ЛС с КА.

Результаты расчета вероятности установления связи с КА в зависимости от количества ЛС с применением ОГ ССР или НСР приведены в табл. 11 [7, 8].

Таблица 12

Результаты итогового сравнения показателей эффективности систем управления и связи

Режим работы	$k_{п.с.}^{lv}$, %	$k_{п.с.}^{lc}$, %	$T_{опер}$, мин	$A_{ТЗ}^{lc}$, чел./ч	$N_{перс}$, чел.	p_{min}	p_{max}
Без применения СР	$\frac{22,2}{22,2}$	$\frac{13,9}{13,9}$	$\frac{110}{570}$	$\frac{122,7}{122,7}$	$\frac{18}{18}$	$\frac{0,9}{0}$	$\frac{0,9999}{0}$
С применением СР	$\frac{100}{100}$	$\frac{100}{100}$	$\frac{10}{10}$	$\frac{168}{168}$	$\frac{15}{15}$	$\frac{0,990,9}{0,9999}$	$\frac{0,99999999}{0,9999}$

Примечание. В числителе дроби указаны значения для полета КА над территорией РФ, в знаменателе — за пределами РФ.

Таблица 13

Динамика роста показателей эффективности систем управления и связи

Режим работы	Изменение показателей эффективности						
	$k_{п.с.}^{lv}$, %	$k_{п.с.}^{lc}$, %	$T_{опер}$, мин	$A_{ТЗ}^{lc}$, чел./ч	$N_{перс}$, чел.	p_{min}	p_{max}
Без применения СР	—	—	—	—	$\frac{16,7}{16,7}$	—	—
С применением СР	$\frac{77,8}{77,8}$	$\frac{86,1}{86,1}$	$\frac{90,9}{98,2}$	$\frac{27}{27}$	—	$\frac{0,0099000099}{100}$	$\frac{0,99009901}{100}$

Примечание. В числителе дроби указаны значения для полета КА над территорией РФ, в знаменателе — за пределами РФ.

Анализ результатов расчета показывает, что применение ОГ СР гарантирует установление связи на всей траектории полета КА с вероятностью не менее 0,9, а использование ОГ ССР или НСР — с вероятностью не менее 0,9999.

Сравнительный анализ эффективности космических систем. Анализ выполним с использованием рассмотренных показателей эффективности на примере сравнения систем связи и управления полетом МКС без применения и с применением СР.

Результаты итогового сравнения показателей эффективности систем управления и связи без применения и с применением СР приведены в табл. 12, а динамика роста показателей эффективности систем управления и связи — в табл. 13 [5–9]. Здесь введены следующие обо-

значения: p_{min} и p_{max} — минимальная и максимальная вероятность безотказной работы.

Выводы

1. Предложенная методика дает возможность оценивать эффективность систем управления космическими системами в полете и может быть полезной при их разработке.

2. Выбранные показатели эффективности позволяют проводить сравнительный анализ систем управления КА космических систем.

3. Приведенные в тексте примеры наглядно показывают применимость предлагаемой методики оценки для сравнения систем управления КА.

4. Разработан оригинальный и простой математический аппарат расчета критериев эффективности систем управления КА.

Литература

- [1] Макаренко Д.М., Потюпкин А.Ю. *Системный анализ космических аппаратов*. Москва, МО РФ, 2007. 331 с.
- [2] Васильев В.В., Потюпкин А.Ю. *Особенности оценивания состояния сложных систем*. Москва, ВА РВСН, 2005. 255 с.
- [3] Павлов В.М. *Методические основы системных исследований военно-космических средств*. Москва, РВСН, 1998. 235 с.
- [4] Васильев В.В., Резвцов Н.Б., Аношкин А.В., Мороз В.И., Куприйчук Д.И., Ромашенко Е.К., Еременко В.А., Дубовик Н.Н. *Системный анализ измерительных комплексов*. Москва, РВСН, 1994. 500 с.
- [5] Васильев В.В., Жданов С.Г., Потюпкин А.Ю. *Особенности управления бортовыми системами летательных аппаратов*. Москва, ВА РВСН, 1998. 72 с.

- [6] Козлов Д.И., ред. *Управление космическими аппаратами зондирования Земли. Компьютерные технологии*. Москва, Машиностроение, 1998. 356 с.
- [7] Пантелеймонов И.Н. Перспективные алгоритмы управления полетом космического аппарата. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, 2014, т. 1, вып. 4, с. 57–68.
- [8] Пантелеймонов И.Н., Корниенко В.И. Архитектурные решения построения бортовой аппаратуры космического аппарата и перспективная методика управления полетом космического аппарата с применением сетевых технологий. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные технологии. Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий. Сб. тр. VII Всерос. науч.-техн. конф.*, Москва, 2–4 июня 2015 г., Москва, АО «РКС», 2015. 584 с.
- [9] Пантелеймонов И.Н., Скрыль О.А. О развитии систем передачи информации командно-измерительного комплекса при управлении Российским сегментом МКС (к 20-летию МКС). *Сб. тез. XLIII академических чтений по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства*, Москва, 29 января–1 февраля 2019. В 2 т. Т. 1. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, с. 21.

References

- [1] Makarenko D.M., Potyupkin A.Yu. *Sistemnyy analiz kosmicheskikh apparatov* [Spacecraft system analysis]. Moscow, VA RVSNI publ., 2007. 331 p.
- [2] Vasil'yev V.V., Potyupkin A.Yu. *Osobennosti otsenivaniya sostoyaniya slozhnykh sistem* [Features of evaluation of the state of complex systems]. Moscow, VA RVSNI publ., 2005. 255 p.
- [3] Pavlov V.M. *Metodicheskiye osnovy sistemnykh issledovaniy voyenno-kosmicheskikh sredstv* [Methodical bases of system researches of military space means]. Moscow, RVSNI publ., 1998. 235 p.
- [4] Vasil'yev V.V., Rezvetsov N.B., Anoshkin A.V., Moroz V.I., Kupriyuchuk D.I., Romashenko E.K., Eremenko V.A., Dubovik N.N. *Sistemnyy analiz izmeritel'nykh kompleksov* [System analysis of measuring systems]. Moscow, RVSNI publ., 1994.
- [5] Vasil'yev V.V., Zhdanov S.G., Potyupkin A.Yu. *Osobennosti upravleniya bortovymi sistemami letatel'nykh apparatov* [Features of control of onboard systems of aircraft]. Moscow, VA RVSNI publ., 1998. 72 p.
- [6] *Upravleniye kosmicheskimi apparatami zondirovaniya Zemli. Komp'yuternyye tekhnologii* [Management of spacecraft earth sensing. Computer technology]. Ed. Kozlov D.I. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1998. 356 p.
- [7] Panteleymonov I.N. Perspective Algorithms for Spacecraft Missions Control. *Rocket-space device engineering and information systems*, 2014, vol. 1, iss. 4, pp. 57–68 (in Russ.).
- [8] Panteleymonov I.N., Korniyenko V.I. Architectural solutions building on-Board equipment of the spacecraft and promising method of flight control of spacecraft with application of network technologies. *Raketno-kosmicheskoye priborostroyeniye i informatsionnyye tekhnologii. Aktual'nyye problemy raketno-kosmicheskogo priborostroyeniya i informatsionnykh tekhnologiy. Sb. tr. VII Vseross. nauch.-tekhnich. konf.* [Rocket and space instrumentation and information technology. Actual problems of rocket and space instrument-making and information technologies. Proceedings of the VII all-Russian scientific and technical conference]. Moscow, 2015, pp. 254–265.
- [9] Panteleymonov I.N., Skryl' O.A. On the development of information transmission systems of the command and measurement complex in the management of the Russian segment of the ISS (to the 20th anniversary of the ISS). *XLIII akademicheskiye chteniya po kosmonavtike, posvyashchennykh pamyati akademika S.P. Koroleva i drugikh vydayushchikhsya otechestvennykh uchennykh — pionerov osvoyeniya kosmicheskogo prostranstva. Sb. tez.* [XLIII Academic Space Conference, dedicated to the memory of academician S.P. Korolev and other outstanding national scientists — pioneers of space exploration]. Moscow, vol. 1, p. 21.

Информация об авторах

ПАНТЕЛЕЙМОНОВ Игорь Николаевич — главный специалист центра спутниковых систем связи. АО «Российские космические системы» (111024, Москва, Российская Федерация, ул. Авиамоторная д. 53, e-mail: panteleymonov@yandex.ru).

ПОТЮПКИН Александр Юрьевич — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Ц13. АО «Российские космические системы» (111024, Москва, Российская Федерация, ул. Авиамоторная д. 53, e-mail: Fotin853@mail.ru).

ТРАНЬКОВ Вячеслав Михайлович — начальник проектной группы центра спутниковых систем связи. АО «Российские космические системы» (111024, Москва, Российская Федерация, ул. Авиамоторная д. 53, e-mail: v.trankov@mail.ru).

ПАНТЕЛЕЙМОНОВА Анна Валентиновна — кандидат педагогических наук, доцент кафедры вычислительной математики и методики преподавания информатики. ГОУ ВО Московской области «Московский государственный областной университет» (141014, Москва, Российская Федерация, ул. Радио 10А, ул. Веры Волошиной, д. 24, e-mail: annapant@yandex.ru).

ФИЛАТОВ Владимир Витальевич — главный специалист службы управления проектами и инновационной деятельностью. АО «НПК СПП» (111024, Москва, Российская Федерация, ул. Авиамоторная д. 53, e-mail: noa@bk.ru).

ТОДУРКИН Владимир Владиславович — преподаватель структурного подразделения. Санкт-Петербургский техникум железнодорожного транспорта — структурное подразделение ФГБОУ ВПО Петербургский государственный университет путей сообщения им. Александра 1 (191180, Санкт-Петербург, Российская Федерация, ул. Бородинская, д. 6).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Пантелеймонов И.Н., Потюпкин А.Ю., Траньков В.М., Пантелеймонова А.В., Филатов В.В., Тодуркин В.В. Методика расчета показателей эффективности системы управления полетом космических аппаратов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 11, с. 55–65, doi: 10.18698/0536-1044-2019-11-55-65

Please cite this article in English as:

Panteleymonov I.N., Potyupkin A.Y., Trankov V.M., Panteleymonova A.V., Filatov V.V., Todurkin V.V. Methods of Calculation of Performance Indicators of Spacecraft Flight Control Systems. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2019, no. 11, pp. 55–65, doi: 10.18698/0536-1044-2019-11-55-65

Information about the authors

PANTELEIMONOV Igor Nikolaevich — Chief Specialist, Center of Satellite Communication Systems. AO Russian Space Systems (111024, Moscow, Russian Federation, Aviamotornaya St., Bldg. 53, e-mail: panteleymonov@yandex.ru).

POTYUPKIN Aleksandr Yurievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Senior Researcher, Ts13. AO Russian Space Systems (111024, Moscow, Russian Federation, Aviamotornaya St., Bldg. 53, e-mail: Fotin853@mail.ru).

TRANKOV Vyacheslav Mikhailovich — Head of Project Team, Center of Satellite Communication Systems. AO Russian Space Systems (111024, Moscow, Russian Federation, Aviamotornaya St., Bldg. 53, e-mail: v.trankov@mail.ru).

PANTELEYMONOVA Anna Valentinovna — Candidate of Science (Pedagogy), Associate Professor, Department of Computational Mathematics and Methods of Teaching Computer Science. State Educational Institution of Higher Education of Moscow region — Moscow State Regional University (141014, Moscow, Russian Federation, Radio St., Bldg. 10A, e-mail: annapant@yandex.ru).

FILATOV Vladimir Vitalievich — Chief Specialist, Project Management and Innovation. AO NPK SPP (111024, Moscow, Russian Federation, Aviamotornaya St., Bldg. 53, e-mail: noa@bk.ru).

TODURKIN Vladimir Vladislavovich — Lecturer. St. Petersburg Vocational College of Railway Transport, Division of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education — Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (191180, St. Petersburg, Russian Federation, Borodinskaya St., Bldg. 6).