

## Методические основы определения тенденций изменения параметров состояния космических аппаратов

© Н.В. Лебедева, С.В. Соловьев

ПАО РКК «Энергия», г. Королёв, Московская обл., 141070, Россия

*Рассмотрены подходы к выявлению тенденций изменения параметров состояния бортовых систем космических аппаратов в целях своевременного обнаружения и устранения причин, вызывающих неблагоприятные отклонения во время орбитального полета. Приведены результаты анализа имеющейся технологии контроля, используемой при управлении полетом космических аппаратов. Сформулированы методические основы разрабатываемой модели, формирующей вторичные признаки, которые характеризуют физическое протекание процессов, происходящих на борту КА на этапе орбитального полета. Представлена классификация телеметрических параметров бортовых систем космических аппаратов. Изложены рекомендации оперативно проводить их анализ (в сеансе связи) для выявления тенденций изменения. Приведены основные зависимости математического аппарата рассматриваемой методологии и базовые принципы автоматизации процесса выявления тенденций изменения параметров бортовых систем космических аппаратов.*

**Ключевые слова:** космический аппарат, управление полетом, контроль, анализ телеметрической информации, тенденции изменения, параметры состояния

**Введение.** Современный уровень космической техники характеризуется высокой конструктивной и функциональной сложностью параметров бортовых систем космических аппаратов (КА), длительными орбитальными полетами и, как следствие, трудоемкой технологией управления ими. Вследствие непрерывности процесса управления полетом КА основным направлением его совершенствования является автоматизация процедур управления в целях обеспечения надежности и полного выполнения плана полета [1]. Важное внимание следует уделить вторичной обработке телеметрической информации КА для формирования новых (вторичных) признаков, обеспечивающих качественно иной информацией о протекающих на борту КА процессах.

Цель работы — формулирование методических основ перспективного метода анализа телеметрической информации КА, который будет генерировать новые данные о процессах, протекающих во время их орбитальных полетов.

**Технология контроля.** Процесс управления полетом структурно [2] состоит из следующих компонент:

- планирование полета;

- выполнение разработанного плана путем формирования и выдачи на КА команд и необходимой программной информации;
- контроль выполнения разработанного плана и оценка состояния и функционирования КА в целом и его бортовых систем в частности;
- принятие и реализация решений по результатам оценки состояния и функционирования КА.

Выполнение контроля состояния КА [3] по времени подразделяется на два типа: 1) оперативный контроль состояния КА во время сеанса связи; 2) послесеансный контроль с углубленным анализом состояния КА.

Для полноты информационной модели, которая формируется эвристически каждым специалистом группы контроля индивидуально и позволяет ему выявлять аномалии в состоянии КА, предлагается рассмотреть внедрение в оперативный контроль данных анализа каждого параметра на предмет тенденций изменения. Наиболее подходящим типом параметров с точки зрения описания физических процессов, происходящих в наблюдаемых бортовых системах КА [4], следует считать аналоговые параметры, формируемые телеметрическими датчиками.

**Методические основы.** Понятие «тенденция» применительно к рассматриваемым вопросам является самостоятельной характеристикой, определяющей скорость и направление изменения значения телеметрического параметра. Телеметрические параметры характеризуют действия, происходящие на борту КА, т. е. описывают тот или иной процесс посредством измерения физических величин. Учитывая это обстоятельство, анализу с использованием методики определения тенденций подвергаются только аналоговые и температурные телеметрические параметры. Общее количество рассматриваемых параметров индивидуально для различных КА, но обычно находится в пределах 500...1000 параметров [2, 3]. Для модулей орбитальных станций количество аналоговых и температурных параметров может измеряться единицами тысяч [5].

Тенденции к выходу за пределы ожидаемых или допустимых диапазонов значений контролируемых параметров по времени, затрачиваемому на их выявление, предлагается подразделять на быстротечные и затяжные. К быстротечным можно отнести тенденции, выявляемые при изменении значений аналоговых параметров за малый промежуток времени (в пределах одного витка или до 90 мин), к затяжным — тенденции изменения значений параметров за длительный промежуток времени (в пределах от двух витков и более) с выходом за пределы ожидаемых или допустимых диапазонов.

При таком разделении требуется применение различных математических подходов к выявлению каждого типа тенденций изменения.

Возможность как быстрых, так и медленных изменений значений параметра в сторону выхода за пределы ожидаемых или допустимых диапазонов обуславливает проведение параллельных расчетов [6, 7].

Как указано выше, тенденции изменений аналоговых и температурных параметров подразделяются на два регистрируемых вида: 1) быстроразвивающиеся тенденции; 2) затяжные тенденции.

Выявление *быстроразвивающихся тенденций* изменения осуществляется при анализе динамики изменения значения каждого аналогового или температурного параметра за один виток. Для этого необходимо определить следующие показатели:

- скорость изменения значений параметра между соседними значениями;
- величина изменения шага  $\Delta$  за минуту, за виток;
- автокорреляцию аналогичных витков за предыдущий и нынешний периоды.

Скорость изменения значений параметра  $\frac{\Delta P_{\Phi}}{\Delta t}$  определяется по получении нескольких измерений (как минимум двух, например  $t_1$  и  $t_2$ ) на некоторой временной базе  $\Delta t = t_2 - t_1$ :

$$\frac{\Delta P_{\Phi}}{\Delta t} = \frac{P_{\Phi}(t_2) - P_{\Phi}(t_1)}{t_2 - t_1}.$$

Для определения величины изменения шага  $\Delta$  значение параметра за минуту и за весь виток определяем как разность.

Автокорреляция  $\rho_k$ , позволяющая оценить стационарность контролируемого процесса, вычисляем по формуле

$$\rho_k = \frac{M[(P_t - \mu)(P_{t-k} - \mu)]}{\sigma_P^2},$$

где  $\mu$  — среднее значение контролируемого параметра;  $P_t$  и  $P_{t-k}$  — значение параметра на исследуемое время  $t$  и на время со сдвигом  $k$ ;  $\sigma_P$  — дисперсия параметра  $P$ .

Корреляционный анализ с использованием автокорреляции позволяет выявить значимые процессы и периодически повторяющиеся зависимости внутри одного контролируемого агрегата. При этом осуществляются следующие сравнения:

- фактической скорости изменения параметра с допустимой для него скоростью изменения;
- величины изменения шага  $\Delta$  за текущую минуту с величиной изменения за предыдущую минуту;

- величины изменения шага  $\Delta$  за виток с допустимым его изменением за виток;
- величины автокорреляции с допуском на нее.

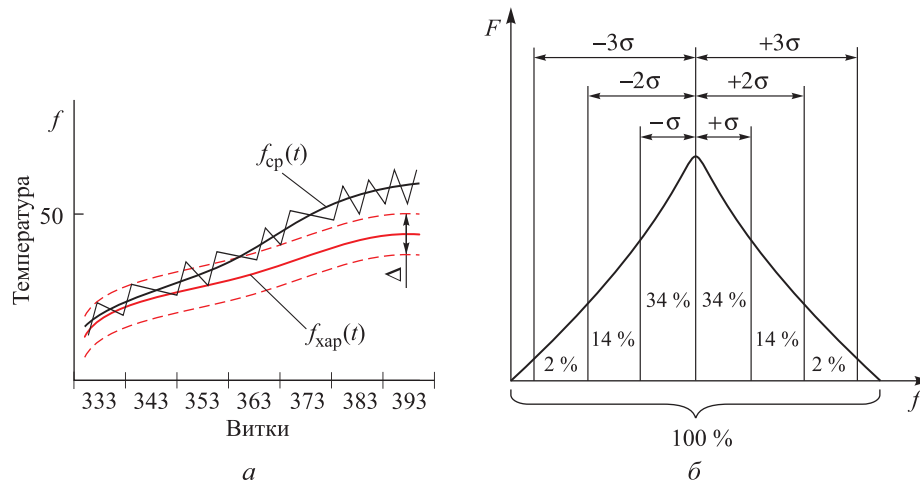
В случае отклонения любого из показателей быстро развивающейся тенденции изменения формируется новый параметр состояния «ТЕНДЕНЦИЯ \_\_\_\_». Из predetermined настроек интерфейса (построение графика, статистика по полетам и др.) формируются дополнительные отображения зафиксированного параметра с указанием того, что тенденция быстро развивающаяся.

*Затяжная тенденция изменения* выявляется при анализе динамики изменения за два витка и более и анализе значений каждого аналогового или температурного параметра. Исходя из практики управления полетом, аналоговые и температурные параметры подразделяем на две категории: 1) параметры, зависящие от состояния внешней среды; 2) параметры, не зависящие от состояния внешней среды [8]. Это позволяет значительно упростить математический подход к определению тенденций изменения значений параметров, не зависящих от состояния внешней среды.

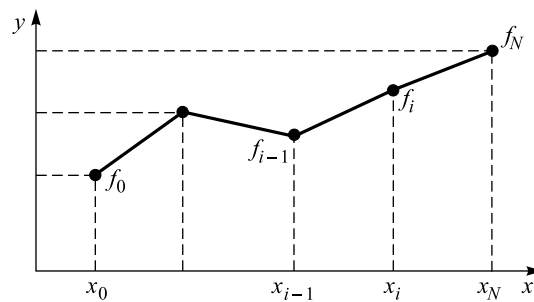
В целях выявления затяжных тенденций изменения значений параметров, зависящих от состояния внешней среды, применяется следующий подход. Для анализа динамики изменения значений параметров, зависящих от состояния внешней среды, предлагается ввести ожидаемую функцию изменения значений данного параметра от времени. Назначение такой ожидаемой функции — выявлять наметившиеся характер и тенденции изменения значений параметров (особенно при приближении к границам диапазона). Ожидаемую функцию  $f_{\text{хар}}(t)$  (рис. 1) можно получить в результате выполнения двух логических операций: 1) осреднение значений внутри сеансов связи; 2) интерполяция получившихся значений на более длительный интервал полета КА (между сеансами связи).

Параметры такого вида встречаются достаточно часто и образуют функцию изменения значений  $f_{\text{хар}}(t)$  кусочно-линейного вида (рис. 2). Для них характерно большое количество факторов, влияющих на формирование значений, поэтому тенденции изменения могут быть скрыты достаточно долго. Пример параметров, для которых характерны подобные тенденции:

- перепад давления в электронасосном агрегате;
- давление теплоносителя в магистрали;
- регулятор расхода жидкости;
- ток нагрузки;
- ток солнца.



**Рис. 1.** Контроль затяжных тенденций изменения:  
 а — пример выхода за пределы допуска; б — расшировка допуска



**Рис. 2.** Кусочно-линейная функция изменения значения параметров

Для поступающей с борта КА телеметрической информации (ТМИ) предлагается формировать функцию текущей тенденции изменений  $f_{cp}(t)$ , которую можно получить в результате трех логических операций: 1) осреднение значений внутри сеансов связи; 2) интерполяция полученных значений на более длительный интервал полета КА (между сеансами связи); 3) формирование взвешенной скользящей средней.

В целях отслеживания тенденций изменения используются также субоптимальные фильтры (следающие фильтры) для оценки положения целевого использования линейной модели. По результатам вычисления можно установить, что линейная модель представляет собой сумму предыдущей оценки разницы между последней реальной позицией и последней оценкой в постоянные промежутки времени

$$X^{\wedge} = X^{\wedge}[1] + \alpha(Z - X^{\wedge}[1]),$$

где  $X^{\wedge}$  — рассчитываемое следующее значение параметра;  $Z$  — последнее действительное значение параметра;  $X^{\wedge}[1]$  — предыдущая оценка состояния КА.

Аналогичные данные позволяют получить и экспоненциальную скользящую среднюю  $EMA$ :

$$EMA = \alpha * Price + (1 - \alpha) * EMA[1],$$

где  $EMA$  — значение экспоненциального скользящего среднего для оценки в последнее значение;  $EMA[1]$  — значение экспоненциального скользящего среднего для оценки в предыдущее значение;  $Price$  — значение исходной функции для оценки в последнее значение;  $\alpha$  (сглаживающая константа, от англ. smoothing constant) — коэффициент, характеризующий скорость уменьшения весов, принимает значение от 0 до 1 (чем меньше его значение, тем больше влияние предыдущих значений на текущую величину среднего).

Первое значение экспоненциального скользящего среднего обычно принимается равным первому значению исходной функции.

Коэффициент  $\alpha$  следует выбирать для каждого параметра в пределах от 0 до 1 и выразить через величину окна усреднения:

$$\alpha = \frac{2}{n+1}.$$

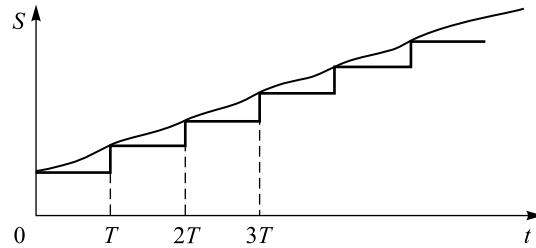
Проведем сравнение получаемых функций. Поскольку функция текущего изменения параметра будет иметь вид взвешенной скользящей средней, то ее вид для оценки в следующее измеренное значение несколько изменится, приблизившись к текущему, но не достигнув его значения. Сравнение ожидаемой функции с учетом допуска с функцией текущего изменения параметра позволяет оперативно констатировать наличие затяжной тенденции изменений.

Для определения затяжной тенденции изменений значений параметров, не зависящих от состояния внешней среды, необходимо обратить внимание на то, что обычно эти параметры либо не изменяют значения с течением времени, либо изменяют с выделенной заранее закономерностью [9].

Параметрам обычно свойственна функция изменения значений кучно-постоянного вида (рис. 3). Для таких параметров характерны постепенное изменение значения в сторону выхода за пределы диапазона и малая температурная зависимость. Перечислим эти параметры:

- напряжение на буферной батарее;
- напряжение на резервной батарее;
- температура поверхности второго бака на СИОС (системе исполнительных органов спуска);
- температура поверхности первого бака на системе исполнительных органов спуска (непрерывное значение поддерживается специальным агрегатом системы термоэлектрического охлаждения);
- давление в шар-баллоне (аналоговые параметры комбинированной двигательной установки в период отсутствия работы);

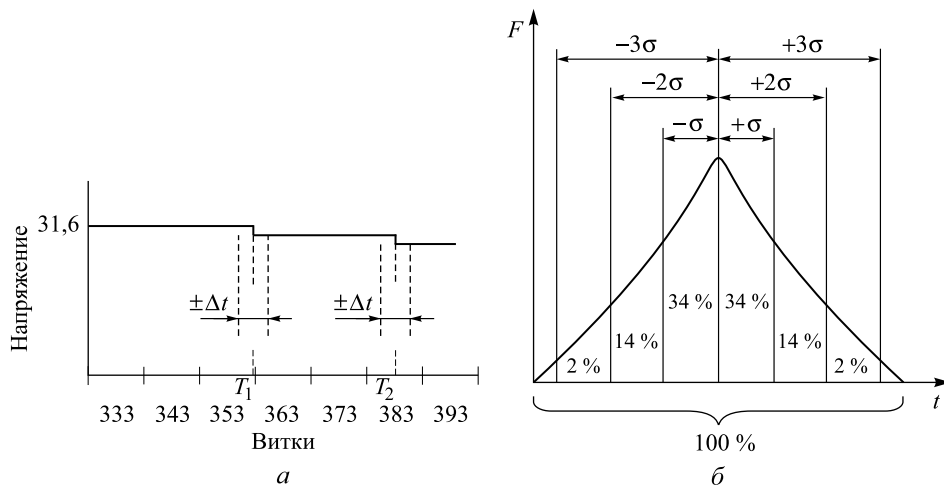
- температура поверхности фланца иллюминатора;
- температура боковой поверхности корпуса иллюминатора.



**Рис. 3.** Кусочно-постоянная функция изменения значений параметров

Для правильности оценки изменения значений параметров введем понятие «ожидаемое время изменения», т. е. время, смоделированное заранее, до полета данного контролируемого КА, или вычисленное статистически при оценке работы аналогичных КА. Для возможности своевременного распознавания затяжных тенденций изменения таких параметров введем нормальное распределение вероятности для каждого времени —  $\pm 3\sigma$  (рис. 4).

Если время изменения значения параметра попадает в ожидаемое время изменения с допустимой погрешностью, это означает, что контролируемая аппаратура функционирует правильно и контролируемый датчик исправен. Параметр «ТЕНДЕНЦИЯ \_\_» должен появиться на экранах специалистов в случае второго преждевременного изменения значения.



**Рис. 4.** Вид затяжной тенденции изменений:  
 а — пример выхода за пределы допуска; б — расшифровка допуска

В результате обработки параметров, в соответствии с алгоритмом, позволяющим выявлять наличие тенденции изменений к выходу за пределы ожидаемых и допустимых значений, формируется параметр «ТЕНДЕНЦИЯ \_\_\_» с указанием времени (время фиксируется на момент определения) определения ее наличия. Параметр, по которому определена тенденция изменений к выходу за пределы ожидаемых значений, отображается на формате соответствующей системы крупнее, чем все другие параметры, и имеет желтый цвет.

При автоматизации процесса выявления тенденций изменений необходимо выполнить следующие основные шаги.

1. Выделить функции нормального изменения значений каждого параметра КА [10]. Для его выполнения необходима статистика по аналогичным приборам/агрегатам или предполагаемая на этапе проектирования характеристика изменения их параметров, по которой можно было бы сформировать статистическую модель КА.

2. Установить минимальное количество значений, поступивших от прибора/агрегата, достаточного для подтверждения тенденции изменений в состоянии бортовых систем КА.

3. Определить соотношение видов тенденций изменений к каждой описанной нештатной ситуации для автоматического отображения этой связи на экраны специалистов группы контроля.

4. Предопределить настройки интерфейса (построение графика, статистика по полетам и др.), позволяющие специалисту группы контроля оперативно отображать максимально удобную форму представления информации.

Таким образом, с учетом анализа физических процессов, протекающих в бортовых системах КА, аналоговые параметры состояния КА, количественно определяющие эти физические процессы, можно классифицировать по критерию возможных изменений (или тенденций изменений) их значений.

Математический аппарат, необходимый для автоматизированного определения тенденций, с учетом принятой классификации параметров состояния и видов тенденций изменения достаточно прост, что позволяет использовать его в процессе поступления ТМИ от КА для оперативного контроля при управлении полетом КА. Автоматизированное выявление тенденций и формирование для оператора специализированного параметра «ТЕНДЕНЦИЯ \_\_\_» существенно расширяет возможности заблаговременной идентификации потенциально опасных состояний бортовой системы КА и оперативного вмешательства в целях недопущения перехода подобного состояния в нештатное или критическое.

**Заключение.** Получены важные результаты автоматизированного анализа тенденций изменения состояния бортовых систем КА с точки зрения задач оперативного контроля при управлении полета-



ми. В частности, определены потенциально проблемные агрегаты/приборы, параметры которых имеют опасную тенденцию изменений к выходу за допустимые значения, и установлено располагаемое время для принятия необходимых мер по предотвращению выхода значения параметра за допустимые пределы.

Применение подобной методики на практике при управлении полетами КА придаст новое качество квалификации персонала службы управления.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Соловьев В.А., Любинский В.Е., Жук Е.И. Текущее состояние и перспективы развития системы управления полетами космических аппаратов. *Пилотируемые полеты в космос*, 2012, № 1 (3), с. 15–26.
- [2] Соловьев В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е. *Управление космическими полетами*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009, 446 с.
- [3] Кравец В.Г., Любинский В.Е. *Основы управления космическими полетами*. Москва, Машиностроение, 1983, 256 с.
- [4] Wertz J.R., Puschell J.J., Everett D.F. *Space mission engineering. The new SMAD*. N. Y. Microcosm system corp., 2011, 1033 p.
- [5] Соловьев С.В., Мишурова Н.В. Анализ текущего состояния процесса контроля при управлении полетом космических аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 3. DOI: 10.18698/2308-6033-2016-3-1474
- [6] Иванов Д.С. Управление полетом космического аппарата. *Космос-Журнал*. URL: <http://cosmos-journal.ru/articles/936/> (дата обращения 10.10.2017).
- [7] Elber B. *The Satellite Communication Ground Segment and Earth Station Handbook*. 2nd Ed. Boston, London, Artech House Publishers, 2014, 444 p.
- [8] Кирилин А.Н., Ахметов Р.Н., Соллогуб А.В. *Методы обеспечения живучести низкоорбитальных автоматических КА зондирования Земли*. Москва, Машиностроение, 2010, 384 с.
- [9] Дмитриев А.К. *Модели и методы анализа технического состояния бортовых систем*. Москва, МО РФ, 1999, 171 с.
- [10] Соловьев С.В. Интеллектуальный метод анализа для автоматизированного прогнозирования состояния КА. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 2. DOI: 10.18698/2308-6033-2016-2-1469

Статья поступила в редакцию 25.10. 2018

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Лебедева Н.В., Соловьев С.В. Методические основы определения тенденций изменения параметров состояния космических аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 12. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-12-1832>

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XLII Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства, Москва, 23–26 января 2018 года*

**Лебедева Наталья Валерьевна** — инженер ПАО РКК «Энергия» им. С.П. Королёва. Область научных интересов: управление полетом. e-mail: [trigonella@mail.ru](mailto:trigonella@mail.ru)

**Соловьев Сергей Владимирович** — канд. техн. наук, ведущий конструктор ПАО РКК «Энергия» им. С.П. Королёва. Область научных интересов: проектирование автоматических КА, управление полетом. e-mail: [sergey.soloviev@scsc.ru](mailto:sergey.soloviev@scsc.ru)

## Methodological principles of determining trends in spacecraft parameter changes

© N.V. Lebedeva, S.V. Soloviev

S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia,  
Korolyov, Moscow Region, 141070, Russia

*The paper examines the approaches to identifying trends in changes of onboard spacecraft (SC) systems parameters, so that adverse processes can be identified and eliminated in time. The study analyzes the existing control technology implemented in spacecraft flight control, and shows the results of this analysis. In our research, we established the methodological principles of the space vehicle developed that implements the formation of a secondary feature characterizing the physical processes when the spacecraft operates in the orbital flight phase. Furthermore, we classified the telemetric parameters of the onboard spacecraft systems, which should be analyzed promptly (in a communication session with the spacecraft) to identify trends in their changes. Findings of the research lead us to the main dependences of the mathematical apparatus of the considered methodology and to the basic principles of automating the process of identifying trends.*

**Keywords:** spacecraft, flight control, control, analysis of telemetric information, trends, state parameters

### REFERENCES

- [1] Soloviev V.A., Lubinskiy V.E., Zhuk E.I. *Pilotiruemye polity v kosmos (Manned space flight)*, 2012, no. 1(3), pp. 15–26.
- [2] Soloviev V.A., Lysenko L.N., Lubinskiy V.E. *Upravlenie kosmicheskimi poletami* [Space flight control]. Moscow, BMSTU Publ., 2009, 446 p.
- [3] Kravetch V.G., Lubinskiy V.E. *Osnovy upravleniya kosmicheskimi poletami* [Fundamentals of space flight control]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1983, 256 p.
- [4] Wertz J.R., Puschell J.J., Everett D.F. *Space mission engineering: The new SMAD*. Microcosm corp., 2011, 1033 p.
- [5] Soloviev S.V., Mishurova N.V. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2016, issue 3.  
DOI: 10.18698/2308-6033-2016-3-1474
- [6] Ivanov D.S. *Upravlenie poletom kosmicheskogo apparata* [Spacecraft flight control]. Available at: <http://cosmos-journal.ru/articles/936/> (accessed October 10, 2017).
- [7] Elber B. *The Satellite Communication Ground Segment and Earth Station Handbook*. 2nd Ed. Boston, London, Artech House Publishers, 2014, 444 p.
- [8] Kirilin A.N., Ahmetob R.N., Sollogub A.V. *Metody obespecheniya zhivuchesti nizkoorbitalnykh avtomaticheskikh KA zondirivaniya Zemli* [Methods to ensure the survivability of low-orbiting automatic Earth observation spacecraft]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2010, 384 p.
- [9] Dmitriev A.K. *Modeli i metody analiza technicheskogo sostoyaniya bortovykh system* [Models and methods for analyzing the technical condition of onboard systems]. Ministry of Defence of the Russian Federation, 1999, 171 p.
- [10] Soloviev S.V. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2016, issue 2 (50).  
DOI: 10.18698/2308-6033-2016-2-1469

**Lebedeva N.V.**, engineer, S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia. Research interests: space flight control. e-mail: [trigonella@mail.ru](mailto:trigonella@mail.ru)

**Soloviev S.V.**, Cand. Sc. (Eng.), Lead Designer, S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia. Research interests: automatic space vehicles engineering, flight control. e-mail: [sergey.soloviev@scsc.ru](mailto:sergey.soloviev@scsc.ru)