

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ УГЛОВЫМ ДВИЖЕНИЕМ И НАВЕДЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ НА ИНТЕРВАЛАХ НАБЛЮДЕНИЯ МАРШРУТОВ

© 2016 А. С. Галкина, И. В. Платошин

Акционерное общество «РКЦ «Прогресс», г. Самара

Рассматриваются вопросы определения допустимой точности управления космического аппарата дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ) на интервалах наблюдения, учитывающие особенности работы оптико-электронного комплекса (ОЭК) с приборами зарядовой связи (ПЗС) временной задержки и накоплением (ВЗН). Требования к точности управления определяются из условия непревышения сдвига изображения допустимой величины. Допустимая точность пропорциональна времени экспонирования элемента разрешения, которое зависит от количества строк накопления в матрице ПЗС и скорости бега изображения. Несоответствие реализуемой ОЭК скорости бега изображения и скорости сканирования земной поверхности во многом зависит от точности управления КА по угловому положению и вращению вокруг центра масс. Угловое движение на интервалах наблюдения формируется из условий постоянства заданной продольной и нулевой поперечной скоростей бега изображения по центру кадра. Определена зависимость величины сдвига изображения в центре кадра от погрешностей обработки системой управления углового движения КА. На основе полученного соотношения предложен алгоритм определения допустимых погрешностей обработки углового движения. Погрешность обработки углового движения влияет на точность наведения оптической оси ОЭК на центральную линию маршрута. Приведены примеры, иллюстрирующие применение предложенного алгоритма, а также оценка точности наведения на маршруте.

Космический аппарат дистанционного зондирования Земли, угловое движение, наведение, погрешность по ориентации, погрешность по угловой скорости, оптическая система, время экспонирования, скорость бега изображения, сдвиг изображения.

В настоящее время большинство космических аппаратов дистанционного зондирования Земли имеют высокий уровень пространственного разрешения получаемой ими информации и высокую точность картографической привязки видеоданных.

Одним из показателей технического совершенства КА ДЗЗ является разрешающая способность оптико-электронного комплекса, которая зависит в первую очередь от её технических характеристик. Для реализации возможностей ОЭК по разрешению необходимо обеспечить определённые точностные характеристики системы управления КА на интервалах наблюдения земной поверхности [1].

На современных КА ДЗЗ используются оптические системы с приборами зарядовой связи с временной задержкой и накоплением. Для таких систем время экспонирования одного пикселя t_{Π} меньше, чем всего элемента разрешения t_H на количество шагов накопления n_{Π} в матрице и обратно пропорционально скорости бега изображения $V_{СК}$ в фокальной плоскости [1; 2]:

$$t_{\Pi} = \frac{\delta_{\Pi}}{V_{СК}}, \quad t_H = n_{\Pi} t_{\Pi}, \quad (1)$$

где δ_{Π} – размер пикселя приёмника изображения.

Цитирование: Галкина А.С., Платошин И.В. Анализ точности управления угловым движением и наведения космических аппаратов дистанционного зондирования Земли на интервалах наблюдения маршрутов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2016. Т. 15, № 2. С. 36-42. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-2-36-42

Скорость бега изображения должна обрабатываться с требуемой точностью. Величина её отклонения от номинальной должна удовлетворять следующим условиям [1; 2]:

$$\Delta V_{СК} \leq \frac{k_{СМ} \cdot \delta_{П}}{t_{Н}} \leq \frac{k_{СМ}}{n_{Ш}} \cdot V_{СК}, \quad (2)$$

где $\Delta V_{СК}$ – остаточное отклонение скорости бега изображения; $k_{СМ}$ – коэффициент, определяемый влиянием сдвига на качество получаемого изображения. Допустимое снижение качества изображения в результате смаза достигается при $k_{СМ} \leq k_{доп}$ [1].

Из соотношений (1) и (2) можно сделать вывод, что требования к точности обработки скорости бега изображения тем выше, чем больше время экспонирования элемента разрешения.

Время экспонирования зависит от следующих параметров:

- высоты орбиты КА;
- реализуемого диапазона скорости бега изображения в ОЭК;
- максимального значения количества шагов накопления в матрице ОЭК.

Далее рассматривается зависимость отклонения скорости бега изображения от погрешностей обработки углового движения на маршруте в центре кадра.

При этом проекции скорости компенсации в инерциальной системе координат (ИСК) [3; 4] могут быть определены следующими соотношениями:

- продольная скорость бега изображения в центре кадра

$$V_{СК}^{ХП} = (W_{ХП} / D) f = \left(\frac{\bar{V} \bar{X}_{П}}{D} + \omega_{ЗП} - \frac{\bar{W}_3 \bar{X}_{П}}{D} \right) f; \quad (3)$$

- поперечная скорость бега изображения в центре кадра

$$V_{СК}^{ЗП} = (W_{ЗП} / D) f = \left(\frac{\bar{V} \bar{Z}_{П}}{D} - \omega_{ХП} - \frac{\bar{W}_3 \bar{Z}_{П}}{D} \right) f, \quad (4)$$

где f – фокусное расстояние аппаратуры зондирования; \bar{W}_3 – переносная скорость наблюдаемой точки [5]; D – дальность до точки наблюдения; \bar{V} – скорость центра масс КА; $\bar{X}_{П}$ – единичный вектор, направленный по оси $OX_{П}$ программной системы координат (ПСК); $\omega_{ХП}$, $\omega_{ЗП}$ – проекции угловой скорости КА на оси $OX_{П}$ и $OZ_{П}$ ПСК соответственно; $(W_{ХП}/D)$, $(W_{ЗП}/D)$ – параметры продольного и поперечного бега изображения соответственно. Параметры углового движения определяются в проекциях на оси инерциальной системы координат (ИСК) [3; 4].

Программная система координат задаёт требуемое положение связанной системы координат (ССК).

Под погрешностями обработки углового движения понимаются отклонение заданного положения осей ССК от измеренного, которое определяется по каналам тангажа $\delta\theta$, крена $\delta\gamma$ и рыскания $\delta\psi$ (точность обработки по ориентации КА) и разность компонентов измеренного и заданного вектора угловой скорости $\{\delta\omega_\gamma, \delta\omega_\psi, \delta\omega_\theta\}$ (точность обработки по угловой скорости).

Требуемое угловое движение КА на интервале наблюдения маршрута формируется из выполнения следующих условий для центра кадра [3]:

$$W_{ХП} / D = (W_{ХП} / D)_{Зад}, \quad (5)$$

$$W_{ЗП} / D = 0, \quad (6)$$

а также из условия наведения центральной линии визирования (ЦЛВ) на центральную линию маршрута [3].

Таким образом, сдвиг изображения с учётом выражений (2) – (6) определяется следующим образом:

$$k_{СМ} = \frac{n_{Ш}}{(W_{ХП} / D)_{Зад}} \times \sqrt{\Delta (W_{ХП} / D)^2 + \Delta (W_{ЗП} / D)^2}, \quad (7)$$

где

$$\Delta(W_{\text{ХП}} / D) = \frac{(\bar{V} - \bar{W}_3) \cdot \bar{X}_{\text{П}}^*}{D^*} - \delta\omega_\theta - \frac{(\bar{V} - \bar{W}_3) \cdot \bar{X}_{\text{П}}}{D};$$

$$\Delta(W_{\text{ЗП}} / D) = \frac{(\bar{V} - \bar{W}_3) \cdot \bar{Z}_{\text{П}}^*}{D^*} + \delta\omega_\gamma - \frac{(\bar{V} - \bar{W}_3) \cdot \bar{Z}_{\text{П}}}{D};$$

$$\delta\omega_\theta = \omega_{\text{ЗП}}^* - \omega_{\text{ЗП}}, \quad \delta\omega_\gamma = \omega_{\text{ХП}}^* - \omega_{\text{ХП}}.$$

Параметры в выражениях (7), отмеченные (*), соответствуют измеренному угловому движению КА ДЗЗ, без (*) – требуемому угловому движению.

Погрешности обработки углового движения системы управления в составе шести параметров определяются из условия неперевышения $k_{\text{СМ}}$ значения $k_{\text{ДОП}}$.

Вводятся соотношения между параметрами $\delta\theta$, $\delta\gamma$, $\delta\psi$ и $\delta\omega_\gamma$, $\delta\omega_\psi$, $\delta\omega_\theta$ для определения допустимых значений:

$$\begin{aligned} \Delta\theta = \delta\omega_\theta \tau_M, \quad \delta\gamma = \delta\theta, \quad \delta\psi = k \cdot \delta\theta, \\ \delta\omega_\gamma = \delta\omega_\theta = \delta\omega, \quad \delta\omega_\psi = \delta\psi / \tau_M, \end{aligned} \quad (8)$$

где k – коэффициент, определяющий соотношение между погрешностью по каналу рыскания и погрешностью по каналу тангажа ($0 < k \leq 1$); τ_M – максимальная длительность интервала наблюдения.

Выражение (7) можно преобразовать к квадратному уравнению по пере-

менной $\delta\omega$ и определить её величину относительно погрешностей по ориентации при заданном угловом положении:

$$\delta\omega = F(\delta\theta, \delta\gamma, \delta\psi, \theta, \gamma, \psi, k_{\text{ДОП}}). \quad (9)$$

Поскольку погрешности по ориентации входят в выражение (7) нелинейно, их величины можно определить итерационным методом с помощью соотношений (8) – (9).

Погрешности обработки углового движения на маршруте оказывают на величину сдвига изображения наибольшее влияние при максимальных дальностях наблюдения. Поэтому поиск решения можно осуществить при максимальных углах отклонения ЦЛВ от положения надира в некотором диапазоне по углу рыскания по следующей схеме, приведённой на рис. 1:

1. Задание первого приближения параметров $\delta\theta$, $\delta\gamma$, $\delta\psi$, $\delta\omega$.
2. Поиск $\delta\omega^*$ при максимальных углах отклонения ЦЛВ (9).
3. Определение максимального сдвига изображения (7) в зависимости от $\delta\theta$, $\delta\gamma$, $\delta\psi$ и $\delta\omega$.
4. Вычисление новых значений на i -м шаге: $\delta\omega^{(i)} = \delta\omega^{(i-1)} + h(\delta\omega^* - \delta\omega^{(i-1)})$, а остальных пяти параметров – по соотношениям (8) (h – коэффициент приращения $\delta\omega$).
5. Повтор пунктов 2-4 до тех пор, пока разность между $|\delta\omega^{(i)} - \delta\omega^*|$ больше заданной погрешности ε .

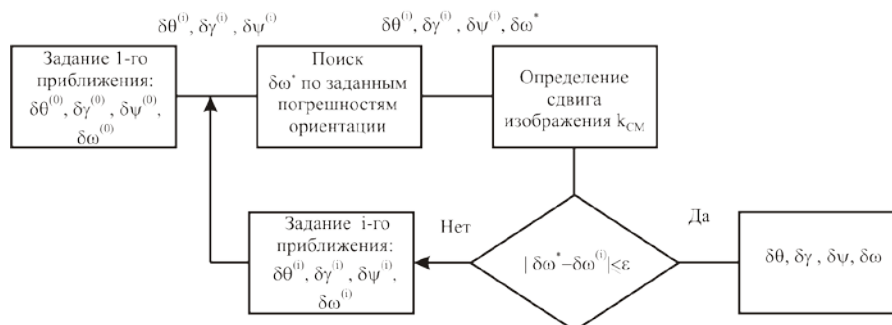


Рис. 1. Блок-схема алгоритма определения точности управления на интервале наблюдения

Для исследования влияния погрешности ε и коэффициента h на точность вычисления по предложенному алгоритму принято $\varepsilon = 0,1 \cdot 10^{-7}$ и $h = 0,25$.

На рис. 2, 3 приведён пример углового движения на маршруте и изменения сдвига изображения по центру кадра на интервале наблюдения с погрешностями,

рассчитанными по предложенному алгоритму:

$$\delta\theta = 0,807', \delta\gamma = 0,807', \delta\psi = 0,565'; \quad (10)$$

$$\delta\omega_\theta = 0,00096^\circ/\text{с}, \delta\omega_\gamma = 0,00096^\circ/\text{с}, \delta\omega_\psi = 0,00067^\circ/\text{с}. \quad (11)$$

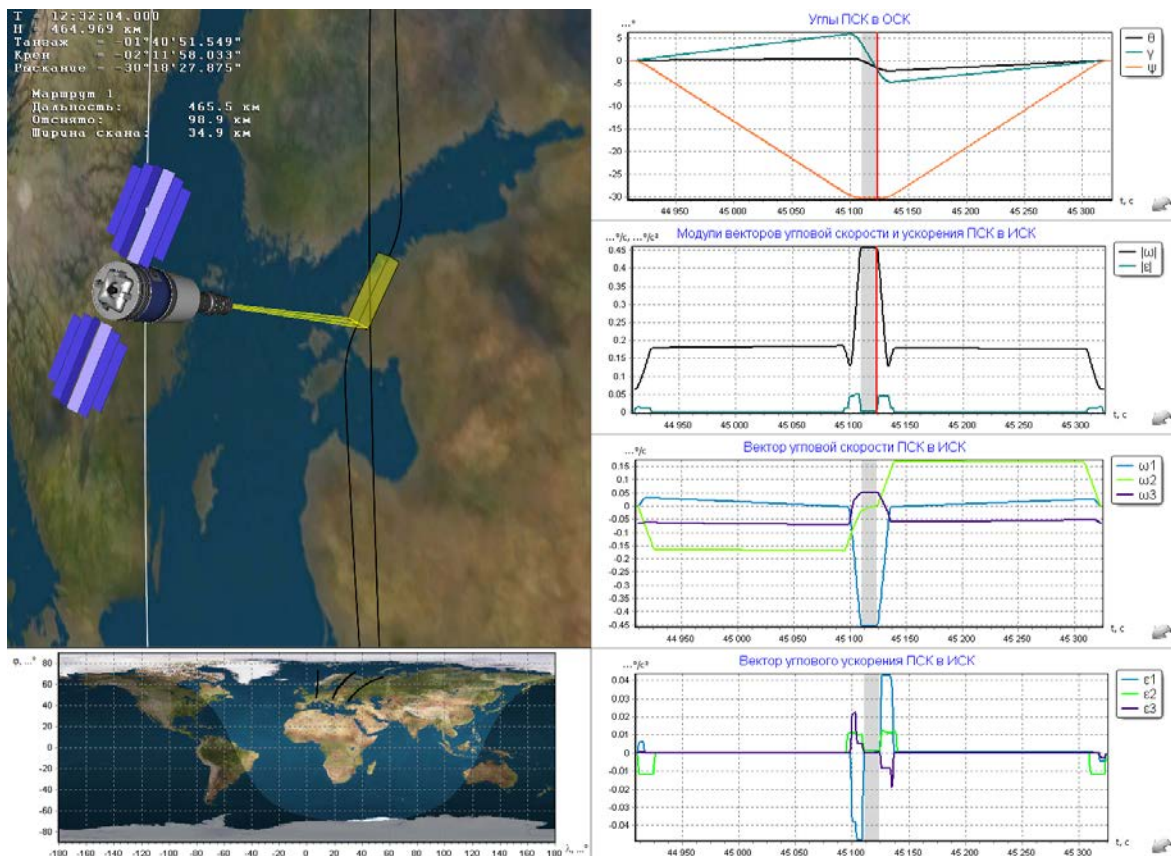


Рис. 2. Пример углового движения на интервале наблюдения маршрута

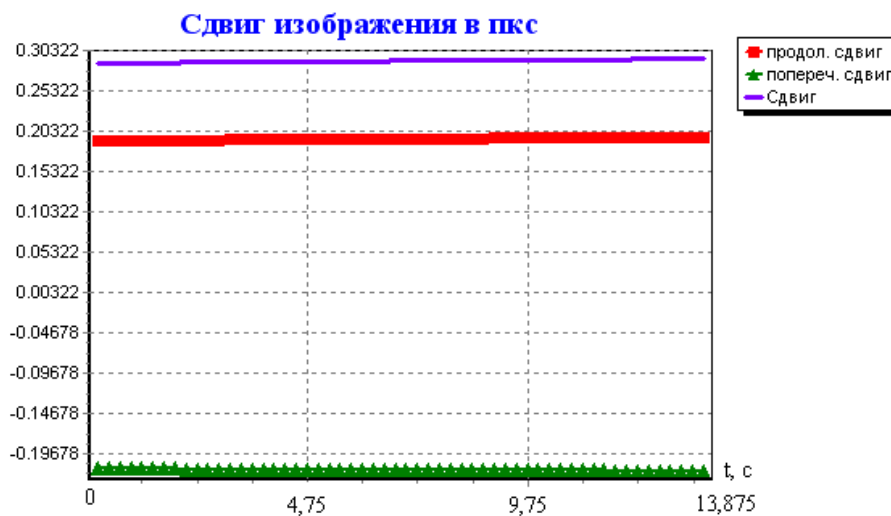


Рис. 3. Величина сдвига изображения по центру кадру на маршруте

КА движется на околокруговой орбите с высотой 450 км, параметр продольного бега изображения равен 0,0154 1/с (5), параметр поперечного бега изображения равен нулю для центра кадра, диапазон изменения угла рыскания 30° , максимальный угол отклонения ЦЛВ от положения надира 4° , длительность интервала наблюдения 14 с, количество строк накопления 192, допустимый сдвиг изображения 1/3 пкс.

Величина сдвига изображения на интервале наблюдения, определённая по заданным погрешностям (10) – (11), не превышает 1/3 пкс (рис. 3).

Погрешность отработки углового движения по каналам тангажа $\delta\theta$ и крена $\delta\gamma$ влияет на точность наведения центральной линии визирования на центральную линию маршрута.

Для приведённого примера углового движения максимальная погрешность наведения ЦЛВ на маршрут составляет 0,154 км.

На рис. 4 приведён пример изменения точности наведения в зависимости от угла отклонения ЦЛВ от положения надира β для заданной околокруговой орбиты с погрешностями отработки (10) – (11).

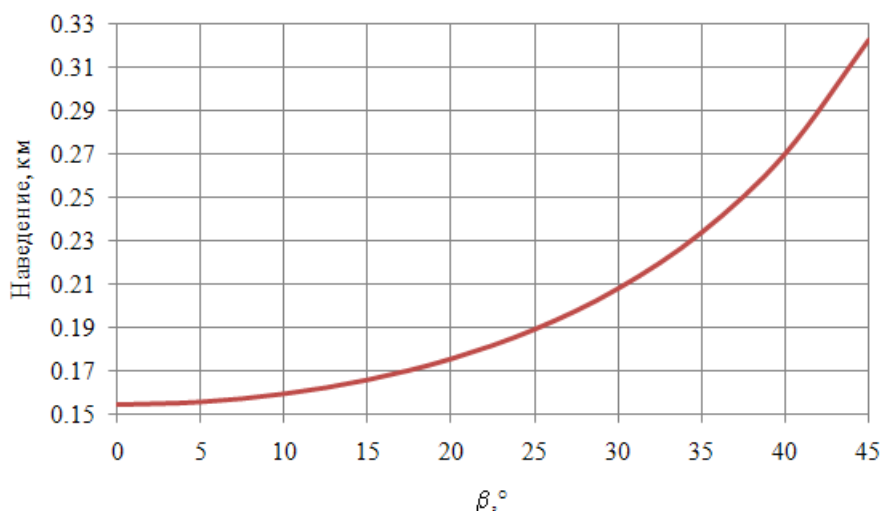


Рис. 4. Точность наведения в зависимости от угла отклонения ЦЛВ от положения надира

Предложенный алгоритм оценивает влияние погрешностей управления на параметры, вычисленные относительно центральной линии визирования, при этом погрешность отработки угловой скорости по каналу рыскания не учитывается. Для оценки влияния характеристик системы управления на величину сдвига изображения по ширине полосы захвата требуется ввести дополнительные соотношения в предложенный алгоритм.

Требования к точности отработки углового движения зависят от высоты орбиты КА, диапазона параметра бега изоб-

ражения, количества шагов накопления. Требования к точности отработки углового движения становятся более жёсткими при увеличении высоты орбиты КА, количества шагов накопления и выборе диапазона скоростей бега изображения, при котором наблюдение земной поверхности осуществляется с тангажным замедлением. При увеличении отклонения ЦЛВ от положения надира погрешность наведения на маршрут увеличивается при управлении на интервале наблюдения с одинаковой точностью.

Библиографический список

1. Занин К.А., Хайлов М.Н. Формирование требований к динамике космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Полёт. Общероссийский научно-технический журнал. 2009. № 5. С. 32-37.
2. Кузнецов П.К., Мартемьянов Б.В. Математическая модель формирования видеоданных, получаемых с использованием сканирующей съёмки // Известия Самарского научного центра РАН. 2014. Т. 16, № 6-1. С. 292-299.
3. Аншаков Г.П., Мантуров А.И., Усталов Ю.М., Горелов Ю.Н. Управление угловым движением КА ДЗЗ // Полёт. Общероссийский научно-технический журнал. 2006. № 6. С. 12-18.
4. Бородин М.С. Технология трёхосного сканирования в оптикоэлектронной космической съёмке // Космонавтика и ракетостроение. 2008. № 2(51). С. 75-83.
5. Маркеев А.П. Теоретическая механика: учебник для университетов. М.: ЧеРо, 1999. 569 с.

Информация об авторах

Галкина Анастасия Сергеевна, кандидат технических наук, ведущий инженер-конструктор, акционерное общество «РКЦ «Прогресс», г. Самара. E-mail: galkinaas_43@mail.ru. Область научных интересов: управление угловым движением космических аппаратов.

Платошин Игорь Вячеславович, инженер-конструктор 3 категории, акционерное общество «РКЦ «Прогресс», г. Самара. E-mail: mail@samspace.ru. Область научных интересов: управление угловым движением космических аппаратов.

ANALYSIS OF THE ACCURACY OF EARTH REMOTE SENSING SATELLITE ANGULAR MOTION CONTROL AND TRACK GUIDANCE DURING ROUTE OBSERVATION INTERVALS

© 2016 A. S. Galkina, I. V. Platoshin

JSC Space Rocket Center «Progress», Samara, Russian Federation

The article deals with problems associated with determining permissible accuracy of Earth remote sensing satellite control over observation intervals taking into account the interaction of optronics and charge-coupled devices with time-delay and integration (CCD TDI). The control accuracy requirements are determined for the condition that the allowable image shift value should not be exceeded. The allowable accuracy is proportional to the time of exposure of a resolution cell which depends on the number of CCD array storage rows and image motion velocity. The discrepancy between the image motion velocity supported by the optronics and the Earth surface scanning velocity depends to a large extent on the satellite control accuracy regarding its angular position and rotation about the centre of mass. Angular motion over observation intervals is formed based on the condition of constant specified longitudinal velocity and zero transverse velocity of image motion relative to the frame centre. The dependence of the frame-centre image shift value on the spacecraft angular motion control system follow-up errors is determined. Based on the obtained relation, an algorithm of determining allowable angular motion follow-up errors is proposed. The angular motion follow-up error influences the accuracy of the optronics optic axis pointing at the central route line. The article gives examples illustrating application of the proposed algorithm as well as assessment of en-route targeting accuracy.

Earth remote sensing satellite, angular motion, targeting, attitude error, angular velocity error, optical system, exposure interval, image motion rate, image shift.

Citation: Galkina A.S., Platoshin I.V. Analysis of the accuracy of Earth remote sensing satellite angular motion control and track guidance during route observation intervals. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2016. V. 15, no. 2. P. 36-42. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-2-36-42

References

1. Zanin K.A., Khailov M.N. Estimation the dynamic of spacevehicles for the distance earthexploring. *All-Russian Scientific-Technical Journal «Polyot»*. 2009. No. 5. P. 32-37. (In Russ.)
2. Kuznetsov P.K., Martemyanov B.V. Mathematical model of video data acquisition with the application of scanning CCD mode. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2014. V. 16, no. 6-1. P. 292-299. (In Russ.)
3. Anshakov G.P., Manturov A.I., Ustalov Y.M., Gorelov Y.N. Earth remote sensing satellite angular motion control. *All-Russian Scientific-Technical Journal «Polyot»*. 2006. No. 6. P. 12-18. (In Russ.)
4. Borodin M.S. Technology of Three-Axis Scanning by Optronic Space Imaging Systems. *Cosmonautics and Rocket Engineering*. 2008. No. 2(51). P. 75-83. (In Russ.)
5. Markeev A.P. *Teoreticheskaya mekhanika: uch. dlya universitetov* [Theoretical mechanics. Textbook for universities]. Moscow: CheRo Publ., 1999. 569 p.

About the authors

Galkina Anastasia Sergeevna, Candidate of Science (Engineering), Leading Design Engineer, JSC Space Rocket Center «Progress», Samara, Russian Federation. E-mail: galkinaas_43@mail.ru. Area of Research: spacecraft angular motion control.

Platoshin Igor Vyacheslavovich, Design Engineer, JSC Space Rocket Center «Progress», Samara, Russian Federation. E-mail: mail@samspace.ru. Area of Research: spacecraft angular motion control.