

Оценка угловой скорости вращательного движения малого космического аппарата дистанционного зондирования Земли «Аист-2Д»

Е. С. Хнырева

*Самарский национальный исследовательский университет
им. акад. С. П. Королёва, Самара, 443086, Россия
E-mail: khnyryova@gmail.com*

Приводится исследование вращательного движения малого космического аппарата (КА) дистанционного зондирования Земли «Аист-2Д» под действием возмущающих факторов по данным бортовых измерений. Качество выполнения целевых задач малым КА зависит от удовлетворения требованиям по угловой скорости. Изучены различные режимы эксплуатации малого КА. В работе получена оценка угловой скорости вращательного движения малого КА «Аист-2Д» вокруг центра масс в режимах ориентации и переориентации. Для оценки были использованы измерения компонентов вектора индукции магнитного поля Земли с помощью бортовых магнитометров. Построены зависимости компонентов вектора угловой скорости от времени в режимах ориентации и переориентации. Проведён анализ данных зависимостей на предмет соответствия требованиям по угловой скорости для качественного выполнения целевых задач дистанционного зондирования Земли. Полученные результаты принципиально совпадают с данными других авторов. Они могут быть использованы при анализе требований, накладываемых на работу системы управления движением малого КА, а также параметров и состава исполнительных органов этой системы для качественного и эффективного выполнения им целевых задач дистанционного зондирования Земли.

Ключевые слова: малый космический аппарат дистанционного зондирования Земли, вращательное движение вокруг центра масс, угловая скорость вращательного движения, восстановление непрерывного сигнала

Одобрена к печати: 04.08.2023
DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-81-88

Введение

Оценка параметров вращательного движения малого космического аппарата (КА) дистанционного зондирования Земли является важной задачей, влияющей на эффективность выполнения малым КА его целевых задач (Ivanov et al., 2021; Krestina, Tkachenko, 2022; Sedelnikov, Salmin, 2022). Для малого КА «Аист-2Д» (рис. 1, см. с. 82) точность по угловой скорости в режиме ориентации составляет 0,5 град/с (Кирилин и др., 2017; Sedelnikov, 2022). Это значение гарантирует требуемое разрешение получаемого изображения при съёмке наземных объектов (рис. 2, см. 82). Эксплуатационные требования к малому КА дистанционного зондирования Земли не предусматривают жёстких ограничений на параметры вращательного движения, как для космических аппаратов технологического назначения (Anshakov et al., 2018; Sedelnikov, Orlov, 2020; Taneeva, 2021). Процесс съёмки земной поверхности представляется существенно более быстротечным, чем технологические процессы, например выращивание монокристалла (Belousov, Sedelnikov, 2014; Sedelnikov, Potienko, 2016; Zemskov et al., 2004). Однако наличие панелей солнечных батарей обуславливает необходимость их ориентации относительно Солнца, в отличие от малых КА без панелей солнечных батарей (например, КА «Аист-1» (Abrashkin et al., 2017; Sedelnikov et al., 2018b, 2019)).

Таким образом, для космического аппарата дистанционного зондирования Земли ограничения на параметры вращательного движения ниже, чем для технологического КА, и существенно выше, чем для КА другого назначения.



Рис. 1. Малый космический аппарат дистанционного зондирования Земли «Аист-2Д»

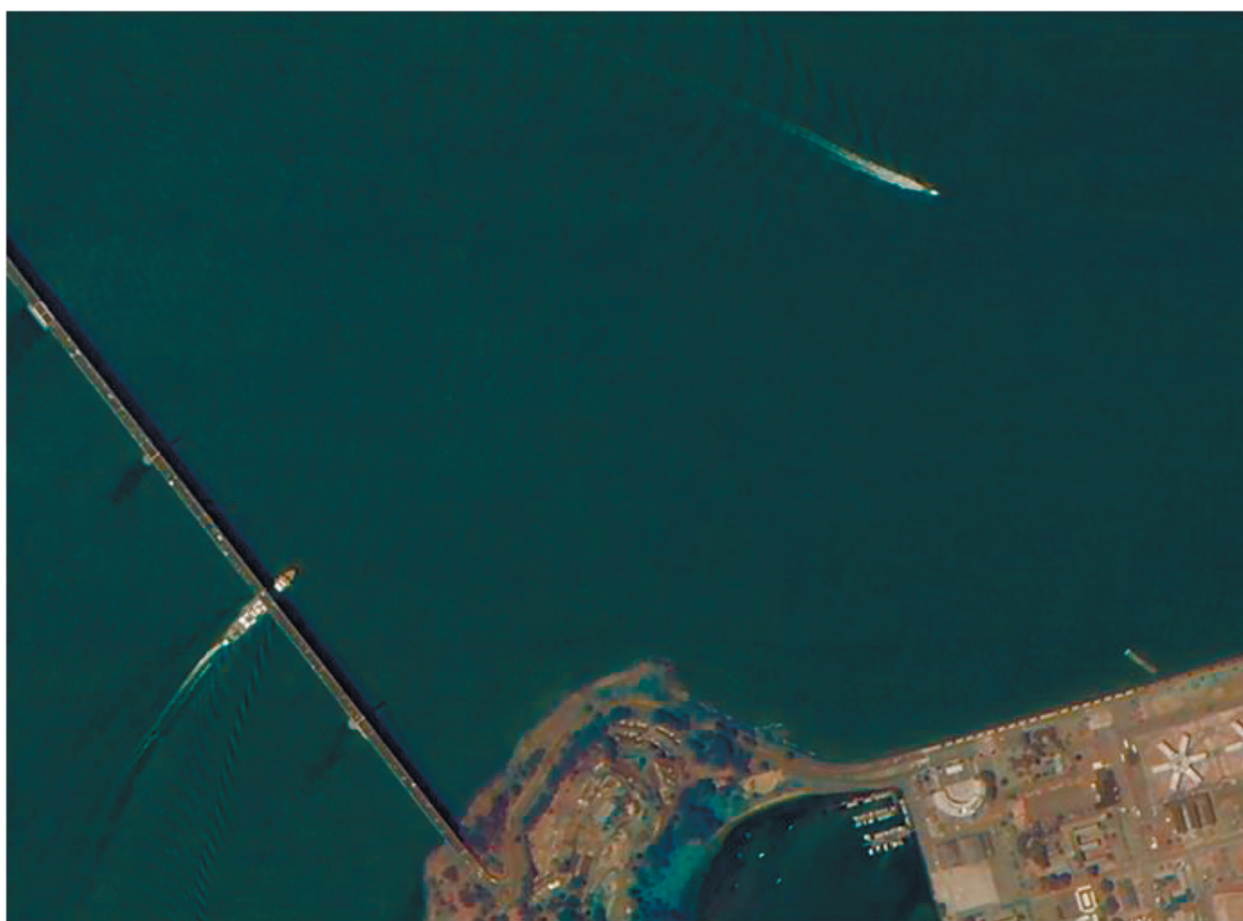


Рис. 2. Пример изображения, полученного малым космическим аппаратом дистанционного зондирования Земли «Аист-2Д» (Sedelnikov, Salmin, 2022)

Оценка угловой скорости по измерениям вектора индукции магнитного поля Земли

Малый КА «Аист-2Д» имеет в своём составе измерители угловой скорости (рис. 3, см. с. 83) и аналоговые магнитометры (рис. 4, см. с. 83).



Рис. 3. Одноосный измеритель угловой скорости, установленный на малом космическом аппарате дистанционного зондирования Земли «Аист-2Д»



Рис. 4. Аналоговый магнитометр, установленный на малом космическом аппарате дистанционного зондирования Земли «Аист-2Д»

Измерительная аппаратура КМУ-1 (компенсатор микроускорений) была аналогична аппаратуре, установленной на космических аппаратах серии «Аист-1» (Abrashkin et al., 2019; Sedelnikov et al., 2018a, b). При эксплуатации КМУ-1 был устранён ряд недостатков, о которых написано в работах (Sedelnikov, 2020; Sedelnikov et al., 2022a; Semkin et al., 2015). Однако из-за плотной компоновки целевая и обеспечивающая аппаратура по-прежнему существенно влияла на данные измерений, как это отмечается в публикациях (Anshakov et al., 2019; Ignatov, Sazonov, 2020; Sedelnikov et al., 2022a). Это подтверждается различиями в измерениях двух разных магнитометров. Пример обработки измерений компонентов вектора индукции магнитного поля Земли приведён на рис. 5.

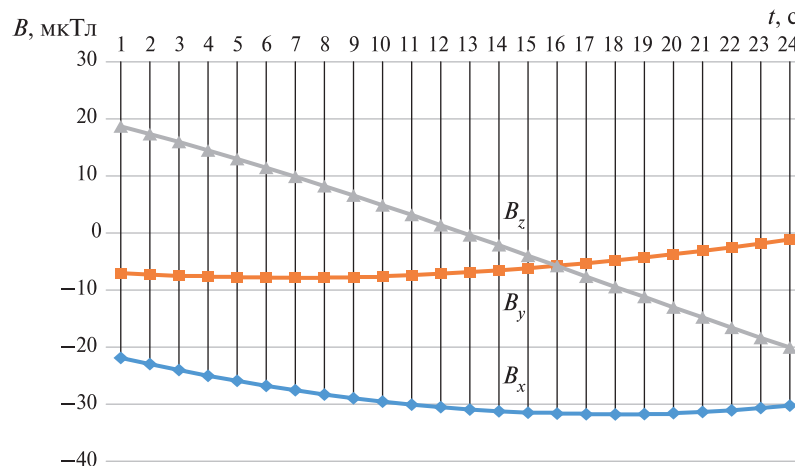


Рис. 5. Данные измерений компонентов вектора индукции магнитного поля Земли в режиме ориентации от 30.06.2016 (значение $t = 0$ соответствует 22:29:50 московского времени)

Для оценки угловой скорости с помощью измерений компонентов вектора индукции магнитного поля Земли использовалась формула Бура (Lapshin, 2021; Sedelnikov, 2018; Semkin et al., 2015):

$$\vec{\omega} = \frac{\mathbf{B} \times \left(\dot{\mathbf{B}} - \frac{d\tilde{\mathbf{B}}}{dt} \right)}{B^2}, \quad (1)$$

где $\vec{\omega}$ — вектор угловой скорости малого космического аппарата; \mathbf{B} — вектор индукции магнитного поля Земли; $\dot{\mathbf{B}}$, $\frac{d\tilde{\mathbf{B}}}{dt}$ — соответственно полная и локальная производные по времени вектора индукции магнитного поля Земли.

Пренебрегая полной производной по сравнению с локальной, получим в связанной с магнитометром строительной системе координат:

$$\begin{aligned} \omega_{x_i} &= \left(\frac{B_{y_i} - B_{y_{i-1}}}{\Delta t_i} B_{z_i} - \frac{B_{z_i} - B_{z_{i-1}}}{\Delta t_i} B_{y_i} \right) \frac{1}{B_{x_i}^2 + B_{y_i}^2 + B_{z_i}^2}; \\ \omega_{y_i} &= \left(\frac{B_{z_i} - B_{z_{i-1}}}{\Delta t_i} B_{x_i} - \frac{B_{x_i} - B_{x_{i-1}}}{\Delta t_i} B_{z_i} \right) \frac{1}{B_{x_i}^2 + B_{y_i}^2 + B_{z_i}^2}; \\ \omega_{z_i} &= \left(\frac{B_{x_i} - B_{x_{i-1}}}{\Delta t_i} B_{y_i} - \frac{B_{y_i} - B_{y_{i-1}}}{\Delta t_i} B_{x_i} \right) \frac{1}{B_{x_i}^2 + B_{y_i}^2 + B_{z_i}^2}, \end{aligned} \tag{2}$$

где $\mathbf{B}_i(B_{x_i}, B_{y_i}, B_{z_i})$ и $\mathbf{B}_{i-1}(B_{x_{i-1}}, B_{y_{i-1}}, B_{z_{i-1}})$ — векторы индукции магнитного поля Земли, измеренные соответственно в моменты времени t_i и t_{i-1} ; $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ — временной интервал между двумя измерениями (Sedelnikov, Salmin, 2022).

Результаты моделирования

Для численного моделирования был выбран малый космический аппарат дистанционного зондирования Земли «Аист-2Д» (см. рис. 1), основные характеристики которого приведены в таблице (Sedelnikov et al., 2022b).

Основные параметры малого КА «Аист-2Д» (Sedelnikov et al., 2022b)

Масса	530 кг
Количество больших упругих элементов	2
Высота орбиты	490 км
Погрешность стабилизации: <ul style="list-style-type: none"> • по углу • по угловой скорости 	0,004 град 0,0002 град/с
Обеспечение одноосной солнечной ориентации с погрешностью, не превышающей $P = 0,96$: <ul style="list-style-type: none"> • по угловому положению • по угловой скорости 	3 град 0,5 град/с
Максимальная угловая скорость	1 град/с
Максимальное угловое ускорение	0,15 град/с ²

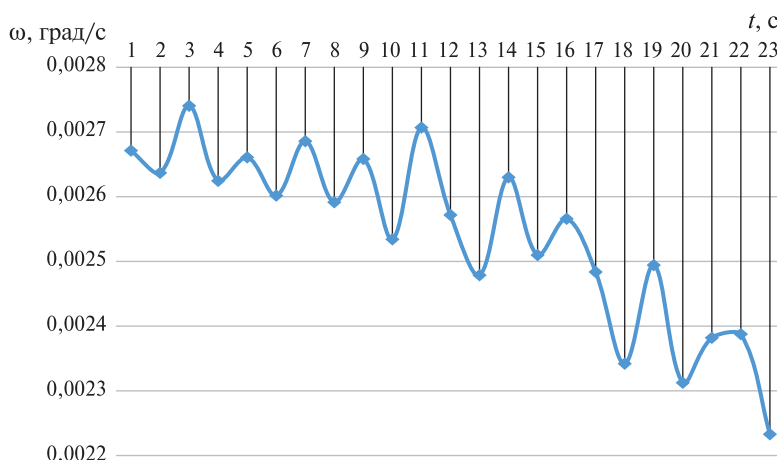


Рис. 6. Динамика модуля угловой скорости малого космического аппарата дистанционного зондирования Земли «Аист-2Д», соответствующая измерениям компонентов вектора индукции магнитного поля Земли (см. рис. 5) от 30.06.2016 (значение $t = 0$ соответствует 22:29:50 московского времени)

Оценка модуля угловой скорости для участка измерений, представленных на *рис. 5*, с помощью формул (2) показана на *рис. 6* (см. с. 84).

Полученный результат совпадает с измерениями угловой скорости с помощью датчиков угловых скоростей (Кирилин и др., 2017), а также с результатами других авторов (Abrashkin et al., 2019; Ivliev et al., 2022; Kazanskiy et al., 2020; Sedelnikov et al., 2022b; Skidanov et al., 2020). Данный результат полностью подтверждает заявленные в *таблице* основные характеристики малого космического аппарата дистанционного зондирования Земли «Аист-2Д».

Заключение

В работе рассмотрены вопросы оценки угловой скорости вращательного движения малого космического аппарата дистанционного зондирования Земли «Аист-2Д» с помощью измерений компонентов вектора индукции магнитного поля Земли. Полученная оценка подтверждает заявленные характеристики малого КА и соответствует результатам других авторов. Такой подход может быть использован для оценки угловой скорости вращения малого космического аппарата в случае отсутствия более точных средств измерения.

Работа выполнена в рамках госзадания, проект FSSS-2023-0007.

Литература

1. Кирилин А. Н., Ахметов Р. Н., Шахматов Е. В., Ткаченко С. И., Бакланов А. И., Салмин В. В., Семкин Н. Д., Ткаченко И. С., Горячкин О. В. Опыттно-технологический малый космический аппарат «Аист-2Д». Самара: СамНИЦ РАН, 2017. 324 с.
2. Abrashkin V.I., Voronov K.E., Piyakov A.V. et al. Uncontrolled rotary motion of the AIST small spacecraft prototype // *Cosmic Research*. 2017. V. 55. No. 2. P. 128–141. DOI: 10.1134/S0010952517020010.
3. Abrashkin V.I., Puzin Y.Y., Filippov A.S. et al. Detection of the rotational motion of the AIST-2D small spacecraft by magnetic measurements // *Cosmic Research*. 2019. V. 57. No. 1. P. 48–60. DOI: 10.1134/S0010952519010015.
4. Anshakov G.P., Belousov A.I., Sedelnikov A.V., Gorozhankina A.S. Efficiency estimation of electrothermal thrusters use in the control system of the technological spacecraft motion // *Russian Aeronautics*. 2018. V. 61. No. 3. P. 347–354. DOI: 10.3103/S1068799818030054.
5. Anshakov G.P., Belousov A.I., Sedelnikov A.V., Puzin Yu. Ya. Effect of the mission and supporting equipment on operation of the magnetometer sensors of the Foton-M No. 2 spacecraft // *Russian Aeronautics*. 2019. V. 62. No. 4. P. 571–576. DOI: 10.3103/S1068799819040068.
6. Belousov A.I., Sedelnikov A.V. Problems in formation and control of a required microacceleration level at spacecraft design, tests, and operation // *Russian Aeronautics*. 2014. V. 57. No. 2. P. 111–117. DOI: 10.3103/S1068799814020019.
7. Ignatov A.I., Sazonov V.V. Stabilization of the gravitational orientation mode of an artificial Earth satellite by the electromagnetic control system // *Cosmic Research*. 2020. V. 58. No. 1. P. 33–41. DOI: 10.1134/S0010952520010037.
8. Ivanov D., Roldugin D., Tkachev S. et al. Attitude motion and sensor bias estimation onboard the SiriusSat-1 nanosatellite using magnetometer only // *Acta Astronautica*. 2021. V. 188. P. 295–307. DOI: 10.1016/j.actaastro.2021.07.038.
9. Ivliev N., Evdokimova V., Podlipnov V. et al. First Earth-imaging CubeSat with harmonic diffractive lens // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. No. 9. Article 2230. DOI: 10.3390/rs14092230.
10. Kazanskiy N., Ivliev N., Podlipnov V., Skidanov R. An airborne offner imaging hyperspectrometer with radially-fastened primary elements // *Sensors*. 2020. V. 20. No. 12. Article 3411. DOI: 10.3390/s20123411.
11. Krestina A.S., Tkachenko I.S. Efficiency Assessment of the deorbiting systems for small satellite // *J. Aeronautics, Astronautics, and Aviation*. 2022. V. 54. No. 2. P. 227–239.
12. Lapshin V.V. The equations of a solid body motion // *IOP Conf. Series Materials Science and Engineering*. 2021. V. 1191. Article 012011. DOI: 10.1088/1757-899X/1191/1/012011.
13. Sedelnikov A.V. Fast analysis of onboard measurements of the Earth magnetic field for the purpose of microaccelerations decrement on board of the “AIST” small spacecraft during its uncontrolled orbital flight // *Intern. Review of Aerospace Engineering*. 2018. V. 11. No. 2. P. 76–83. DOI: 10.15866/irease.v11i2.13238.

14. *Sedelnikov A. V.* Accuracy assessment of microaccelerations simulation on the spacecraft “Foton-M” no. 2 according to magnetic measuring instruments data // *Microgravity Science and Technology*. 2020. V. 32. No. 3. P. 259–264. DOI: 10.1007/s12217-019-09766-y.
15. *Sedelnikov A. V.* Algorithm for restoring information of current from solar panels of a small spacecraft prototype “Aist” with help of normality conditions // *J. Aeronautics, Astronautics, and Aviation*. 2022. V. 54. No. 1. P. 67–76.
16. *Sedelnikov A. V., Orlov D. I.* Development of control algorithms for the orbital motion of a small technological spacecraft with a shadow portion of the orbit // *Microgravity Science and Technology*. 2020. V. 32. No. 5. P. 941–951. DOI: 10.1007/s12217-020-09822-y.
17. *Sedelnikov A. V., Potienko K. I.* How to estimate microaccelerations for spacecraft with elliptical orbit // *Microgravity Science and Technology*. 2016. V. 28. No. 1. P. 41–48. DOI: 10.1007/s12217-015-9468-3.
18. *Sedelnikov A. V., Salmin V. V.* Modeling the disturbing effect on the AIST small spacecraft based on the measurements data // *Scientific Reports*. 2022. V. 12. Article 1300. DOI: 10.1038/s41598-022-05367-9.
19. *Sedelnikov A. V., Filippov A. S., Gorozhakina A. S.* (2018a) Evaluation of calibration accuracy of magnetometer sensors of Aist small spacecraft // *J. Physics: Conf. Series*. 2018. V. 1015. Article 032045. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/3/032045.
20. *Sedelnikov A. V., Filippov A. S., Ivashova T. A.* (2018b) Earth’s magnetic field measurements data accuracy evaluation on board of the small spacecraft “Aist” flight model // *Jordan J. Mechanical and Industrial Engineering*. 2018. V. 12. No. 4. P. 253–260.
21. *Sedelnikov A. V., Khnyryova E. S., Filippov A. S., Ivashova T. A.* Measurements analysis of the Earth’s magnetic field data obtained from the flight model of AIST small spacecraft // *Intern. J. Mechanical Engineering and Robotic Research*. 2019. V. 8. No. 4. P. 542–546. DOI: 10.18178/ijmerr.8.4.542-546.
22. *Sedelnikov A., Orlov D., Khnyryova E. et al.* (2022a) Using the -Bdot algorithm to reduce the angular velocity of rotation for the Aist small spacecraft pilot model // *Advances in Machinery, Materials Science and Engineering Application*. 2022. P. 239–249. DOI: 10.3233/ATDE220444.
23. *Sedelnikov A. V., Orlov D. I., Serdakova V. V. et al.* (2022b) Investigating the temperature field of large elastic elements of a small spacecraft for the Earth remote sensing to assess the effect of a temperature shock on its rotational motion // 2022 8th Intern. Conf. Information Technology and Nanotechnology (ITNT). 2022. 4 p. DOI: 10.1109/ITNT55410.2022.9848563.
24. *Semkin N. D., Sazonov V. V., Voronov K. E., Piyakov A. V., Dorofeev A. S., Ilyin A. B., Puzin Y. Y., Vidmanov A. S.* Magnetic field measurements at small spacecraft “Aist” // *Physics of Wave Processes and Radio Systems*. 2015. V. 18. No. 4. P. 67–73.
25. *Skidanov R., Strelkov Y., Volotovskiy S. et al.* Compact imaging systems based on annular harmonic lenses // *Sensors*. 2020. V. 20. No. 14. Article 3914. DOI: 10.3390/s20143914.
26. *Taneeva A. S.* The formation of the target function in the design of a small spacecraft for technological purposes // *J. Physics: Conf. Series*. 2021. V. 1901. No. 1. Article 012026. DOI: 10.1088/1742-6596/1901/1/012026.
27. *Zemskov V. S., Raukhan M. R., Shalimov V. P. et al.* Influence of an arrangement of growth installations on board the spacecraft on microgravitational conditions of carrying out experiments (on the example of bestigelny zonal melting InSb:Te on FOTON-3 artificial satellite) // *Cosmic Research*. 2004. V. 42. No. 2. P. 144–154. DOI: 10.1023/B:COSM.0000025977.45022.f3.

Estimation of the angular velocity of rotation of the Aist-2D small spacecraft for remote sensing of the Earth

E. S. Khnyryova

*Samara National Research University, Samara 443086, Russia
E-mail: khnyryova@gmail.com*

In this paper, a study is made of rotational motion of a small spacecraft for remote sensing of the Earth called Aist-2D under the influence of disturbing factors, according to the data of onboard measurements. The quality of performance of target tasks by a small spacecraft depends on the fulfillment of the requirements for angular velocity. Various modes of operation of a small spacecraft have been studied. In this paper, an estimate of the angular velocity of rotational motion of Aist-2D around the center

of mass in the modes of orientation and reorientation is obtained. Measurements of the components of the Earth's magnetic field induction vector with the help of onboard magnetometers were used for the evaluation. Dependences of the components of the angular velocity vector on time are constructed in the orientation and reorientation modes. An analysis of these dependences was carried out in order to meet the requirements for angular velocity in order to succeed in fulfilling Earth remote sensing tasks. The results obtained fundamentally coincide with the data of other authors. They can be used in the analysis of the requirements imposed on the operation of the motion control system of a small spacecraft, as well as parameters and composition of the executive bodies of this system for high-quality and efficient performance of Earth remote sensing tasks.

Keywords: small spacecraft for remote sensing of the Earth, rotational motion around the center of mass, angular velocity of rotational motion, restoration of a continuous signal

Accepted: 04.08.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-81-88

References

1. Kirilin A. N., Akhmetov R. N., Shakhmatov E. V., Tkachenko S. I., Baklanov A. I., Salmin V. V., Semkin N. D., Tkachenko I. S., Goryachkin O. V., *Opytno-tekhnologicheskii maliy kosmicheskii apparat "Aist-2D"* (Experimental technological small spacecraft "Aist-2D"), Samara: Publ. House of the Samara Scientific Center RAS, 2017, 324 p. (in Russian).
2. Abrashkin V. I., Voronov K. E., Piyakov A. V. et al., Uncontrolled rotary motion of the AIST small spacecraft prototype, *Cosmic Research*, 2017, Vol. 55, No. 2, pp. 128–141, DOI: 10.1134/S0010952517020010.
3. Abrashkin V. I., Puzin Y. Y., Filippov A. S. et al., Detection of the rotational motion of the AIST-2D small spacecraft by magnetic measurements, *Cosmic Research*, 2019, Vol. 57, No. 1, pp. 48–60, DOI: 10.1134/S0010952519010015.
4. Anshakov G. P., Belousov A. I., Sedelnikov A. V., Gorozhankina A. S., Efficiency estimation of electrothermal thrusters use in the control system of the technological spacecraft motion, *Russian Aeronautics*, 2018, Vol. 61, No. 3, pp. 347–354, DOI: 10.3103/S1068799818030054.
5. Anshakov G. P., Belousov A. I., Sedelnikov A. V., Puzin Yu. Ya., Effect of the mission and supporting equipment on operation of the magnetometer sensors of the Foton-M No. 2 spacecraft, *Russian Aeronautics*, 2019, Vol. 62, No. 4, pp. 571–576, DOI: 10.3103/S1068799819040068.
6. Belousov A. I., Sedelnikov A. V., Problems in formation and control of a required microacceleration level at spacecraft design, tests, and operation, *Russian Aeronautics*, 2014, Vol. 57, No. 2, pp. 111–117, DOI: 10.3103/S1068799814020019.
7. Ignatov A. I., Sazonov V. V., Stabilization of the gravitational orientation mode of an artificial Earth satellite by the electromagnetic control system, *Cosmic Research*, 2020, Vol. 58, No. 1, pp. 33–41, DOI: 10.1134/S0010952520010037.
8. Ivanov D., Roldugin D., Tkachev S. et al., Attitude motion and sensor bias estimation onboard the SiriusSat-1 nanosatellite using magnetometer only, *Acta Astronautica*, 2021, Vol. 188, pp. 295–307, DOI: 10.1016/j.actaastro.2021.07.038.
9. Ivliev N., Evdokimova V., Podlipnov V. et al., First Earth-imaging CubeSat with harmonic diffractive lens, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, No. 9, Article 2230, DOI: 10.3390/rs14092230.
10. Kazanskiy N., Ivliev N., Podlipnov V., Skidanov R., An airborne offner imaging hyperspectrometer with radially-fastened primary elements, 2020, *Sensors*, Vol. 20, No. 12, Article 3411, DOI: doi.org/10.3390/s20123411.
11. Krestina A. S., Tkachenko I. S., Efficiency Assessment of the deorbiting systems for small satellite, *J. Aeronautics, Astronautics, and Aviation*, 2022, Vol. 54, No. 2, pp. 227–239.
12. Lapshin V. V., The equations of a solid body motion, *IOP Conf. Series Materials Science and Engineering*, 2021, Vol. 1191, Article 012011, DOI: 10.1088/1757-899X/1191/1/012011.
13. Sedelnikov A. V., Fast analysis of onboard measurements of the Earth magnetic field for the purpose of microaccelerations decrement on board of the "AIST" small spacecraft during its uncontrolled orbital flight, *Intern. Review of Aerospace Engineering*, 2018, Vol. 11, No. 2, pp. 76–83, DOI: 10.15866/irease.v11i2.13238.
14. Sedelnikov A. V., Accuracy assessment of microaccelerations simulation on the spacecraft "Foton-M" no. 2 according to magnetic measuring instruments data, *Microgravity Science and Technology*, 2020, Vol. 32, No. 3, pp. 259–264, DOI: 10.1007/s12217-019-09766-y.
15. Sedelnikov A. V., Algorithm for restoring information of current from solar panels of a small spacecraft prototype "Aist" with help of normality conditions, *J. Aeronautics, Astronautics, and Aviation*, 2022, Vol. 54, No. 1, pp. 67–76.

16. Sedelnikov A. V., Orlov D. I., Development of control algorithms for the orbital motion of a small technological spacecraft with a shadow portion of the orbit, *Microgravity Science and Technology*, 2020, Vol. 32, No. 5, pp. 941–951, DOI: 10.1007/s12217-020-09822-y.
17. Sedelnikov A. V., Potienko K. I., How to estimate microaccelerations for spacecraft with elliptical orbit, *Microgravity Science and Technology*, 2016, Vol. 28, No. 1, pp. 41–48, DOI: 10.1007/s12217-015-9468-3.
18. Sedelnikov A. V., Salmin V. V., Modeling the disturbing effect on the AIST small spacecraft based on the measurements data, *Scientific Reports*, 2022, Vol. 12, Article 1300, DOI: 10.1038/s41598-022-05367-9.
19. Sedelnikov A. V., Filippov A. S., Gorozhakina A. S. (2018a), Evaluation of calibration accuracy of magnetometer sensors of Aist small spacecraft, *J. Physics: Conf. Series*, 2018, Vol. 1015, Article 032045, DOI: 10.1088/1742-6596/1015/3/032045.
20. Sedelnikov A. V., Filippov A. S., Ivashova T. A. (2018b), Earth’s magnetic field measurements data accuracy evaluation on board of the small spacecraft “Aist” flight model, *Jordan J. Mechanical and Industrial Engineering*, 2018, Vol. 12, No. 4, pp. 253–260.
21. Sedelnikov A. V., Khnyryova E. S., Filippov A. S., Ivashova T. A., Measurements analysis of the Earth’s magnetic field data obtained from the flight model of AIST small spacecraft, *Intern. J. Mechanical Engineering and Robotic Research*, 2019, Vol. 8, No. 4, pp. 542–546, DOI: 10.18178/ijmerr.8.4.542-546.
22. Sedelnikov A., Orlov D., Khnyryova E. et al. (2022a), Using the \dot{B} algorithm to reduce the angular velocity of rotation for the Aist small spacecraft pilot model, *Advances in Machinery, Materials Science and Engineering Application*, 2022, pp. 239–249, DOI: 10.3233/ATDE220444.
23. Sedelnikov A. V., Orlov D. I., Serdakova V. V. et al. (2022b), Investigating the temperature field of large elastic elements of a small spacecraft for the Earth remote sensing to assess the effect of a temperature shock on its rotational motion, *2022 8th Intern. Conf. Information Technology and Nanotechnology (ITNT)*, 2022, 4 p., DOI: 10.1109/ITNT55410.2022.9848563.
24. Semkin N. D., Sazonov V. V., Voronov K. E., Piyakov A. V., Dorofeev A. S., Ilyin A. B., Puzin Y. Y., Vidmanov A. S., Magnetic field measurements at small spacecraft “Aist”, *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, 2015, Vol. 18, No. 4, pp. 67–73.
25. Skidanov R., Strelkov Y., Volotovskiy S. et al., Compact imaging systems based on annular harmonic lenses, *Sensors*, 2020, Vol. 20, No. 14, Article 3914, DOI: 10.3390/s20143914.
26. Taneeva A. S., The formation of the target function in the design of a small spacecraft for technological purposes, *J. Physics: Conf. Series*, 2021, Vol. 1901, No. 1, Article 012026, DOI: 10.1088/1742-6596/1901/1/012026.
27. Zemskov V. S., Raukhan M. R., Shalimov V. P. et al., Influence of an arrangement of growth installations on board the spacecraft on microgravitational conditions of carrying out experiments (on the example of bestigelnny zonal melting InSb:Te on FOTON-3 artificial satellite), *Cosmic Research*, 2004, Vol. 42, No. 2, pp. 144–154, DOI: 10.1023/B:COSM.0000025977.45022.f3.