

УДК 829.78

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНКИ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПО ДАННЫМ О ТОКЕ С СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

Т. А. Ивашова

В работе проведено моделирование параметров вращательного движения лётного и опытного образцов малого космического аппарата «Аист». На первом этапе эксплуатации при работоспособности аккумуляторной батареи моделирование проведено по данным штатных средств измерения – магнитометров. Проведена оценка параметров движения по данным о токе с панелей солнечных батарей. Результаты этой оценки сравниваются с оценкой, полученной по данным магнитометров, и данными других авторов. На втором этапе эксплуатации после деградации аккумуляторной батареи оценка проводится только по данным о токе с панелей солнечных батарей. Сделаны выводы о характере вращательного движения лётного и опытного образцов малого космического аппарата «Аист».

Ключевые слова: Аист, магнитометры, вращательное движение, лётный и опытный образец малого космического аппарата, параметры движения.

Сравнительно недавнее использование малых космических аппаратов (МКА) не позволяет говорить о том, что их движение в околоземном космическом пространстве достаточно хорошо изучено. Это связано не только с короткой историей широкой эксплуатации МКА, но и рядом объективных причин, из которых можно выделить две основные. На космические объекты большой массы (орбитальные космические станции, космические аппараты (КА) среднего класса и т.д.) основное внешнее воздействие в околоземном космическом пространстве с высотой орбиты выше 400 км оказывают возмущения гравитационного характера [1, 2]. Согласно исследованиям [3, 4], основными внешними возмущениями для МКА являются возмущения магнитного характера.

Второй важной причиной можно считать чрезвычайно плотную компоновку МКА по сравнению с КА других классов [5]. Это накладывает свой отпечаток как на динамику движения МКА вокруг центра масс [4, 6] (поскольку взаимодействие внутренних магнитных полей от работы бортовой аппаратуры с

магнитным полем Земли порождает возмущения), так и на корректность работы средств измерений, находящихся под воздействием внутренних магнитных полей [7, 8].

В работе проводится оценка параметров вращательного движения лётного (ЛО) и опытного (ОО) образцов МКА «Аист» на основе данных штатных средств измерений (магнитометров) в период работоспособности аккумуляторной батареи и данных о токе с панелей солнечных батарей после деградации аккумуляторной батареи и неработоспособности вследствие этого штатных средств измерений.

Решение поставленной задачи важно как для исследования вращательного движения МКА, эксплуатирующихся в неориентированном полёте, так и для оценки возможности эксплуатации МКА при нештатных ситуациях [4, 9] или в режиме частичной работоспособности [10, 11].

Условия и методы исследования

ЛО и ОО МКА «Аист» были выведены на орбиты 21.04.2013 путём отделения от космического аппарата «Бион – М» № 1 и

© Ивашова Т. А., 2020.

Ивашова Татьяна Андреевна (itanya970@gmail.com),
студент IV курса факультета электроники и приборостроения
Самарского университета,
443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34.

28.12.2013 с космодрома «Плесецк» в рамках испытаний ракеты-носителя «Союз-2-1в» путём отделения от разгонного блока «Волга» соответственно. Они имеют схожие массово-габаритные характеристики и оснащены одинаковым набором средств измерений и научной аппаратуры, что позволяет вести совместный анализ динамики вращательного движения этих МКА. Телеметрическая информация с ЛО и ОО МКА «Аист» поступала до конца лета 2019 года.

Штатные средства измерений – магнитометры входили в состав научной аппаратуры МАГКОМ [12], разработанной в институте космического приборостроения Самарского университета. Вся внешняя поверхность ЛО и ОО МКА «Аист» была обклеена фотопреобразователями, которые образуют панели солнечных батарей. Данные о токе с панелей использовались для оценки параметров вращательного движения МКА. Для моделирования параметров вращательного МКА на первом этапе эксплуатации, при котором функционировали штатные средства измерений (рисунок 1), были выбраны телеметрические данные: 02.05.2013 с 18:12:41 по 19:16:43; 20.05.2013 с 19:48:43 по 20:49:45 – для ЛО МКА «Аист» и 12.03.2014 с 19:21:37 по 19:52:01; 24.05.2014 с 10:14:46 по 10:45:55 – для ОО МКА «Аист».

Моделирование компонентов вектора угловой скорости по данным измерений компонентов вектора индукции магнитного поля Земли осуществлялось по следующей рекуррентной зависимости:

$$\omega_{ki+1} = \frac{\arccos(B_{ki+1}/|\vec{B}_{i+1}|) - \arccos(B_{ki}/|\vec{B}_i|)}{t_{i+1} - t_i}$$

где i и $i+1$ – два последовательных измерения; $\vec{B}(B_x, B_y, B_z)$ – вектор магнитной индукции, $k = x, y, z$.

Оценка угловой скорости с помощью данных о токе с панелей солнечных батарей проводилась при справедливости следующих упрощающих предположений [9]:

- только три из шести граней малого космического аппарата освещены;
- косинус угла между нормалью к поверхности фотопреобразователей и

направлением на Солнце определяется приближённой зависимостью:

$$\cos \alpha_j = \frac{i_j}{i_{j\max}},$$

где i_j – измеренное значение силы тока; $i_{j\max}$ – максимальное значение силы тока (при $\alpha_j = 0$);

– максимальное значение силы тока считается постоянным и одинаковым для всех граней малого космического аппарата;

– рассматривается только солнечное излучение;

– размеры МКА пренебрежимо малы.

Считается, что оси главной связанной системы координат совпадают с нормальными к трём рассматриваемым граням МКА. Направление на Солнце в главной связанной системе координат задаётся тремя углами: $\gamma_j = \pm \alpha_j$ ($j = 1...3$). При освещении Солнцем других граней малого космического аппарата

к углам следует прибавлять $\frac{\pi}{2}$. Условием для прибавления служит нулевое значение тока. Таким образом:

$$\gamma_j = \begin{cases} \pm \alpha_j & \text{if } i_j \neq 0 \\ \pm \left(\frac{\pi}{2} + \alpha_j \right) & \text{if } i_j = 0 \end{cases}$$

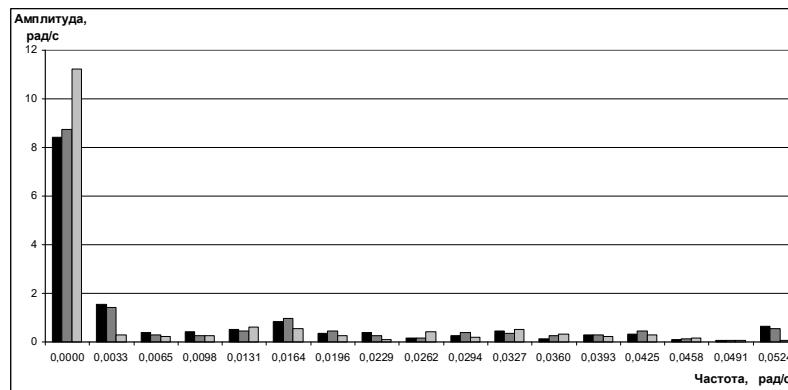
Тогда модуль угловой скорости оценивается следующим образом:

$$|\vec{\omega}_i| = \frac{1}{t_i - t_{i-1}} \sqrt{(\gamma_{1i} - \gamma_{1i-1})^2 + (\gamma_{2i} - \gamma_{2i-1})^2 + (\gamma_{3i} - \gamma_{3i-1})^2}$$

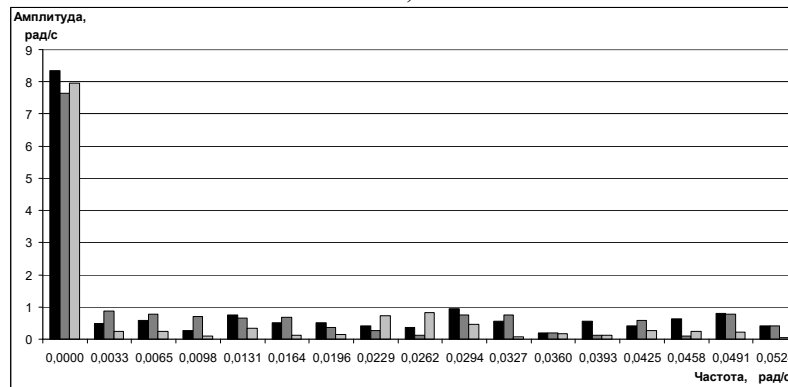
Результаты и их обсуждение

Моделирование проводилось в среде Mathcad с использованием дискретного преобразования Фурье и ряда Котельникова для восстановления непрерывного сигнала. На рисунке 1 показаны спектры в частотном диапазоне $\left[0, \frac{\pi}{60}\right]$ рад/с для ЛО и ОО МКА

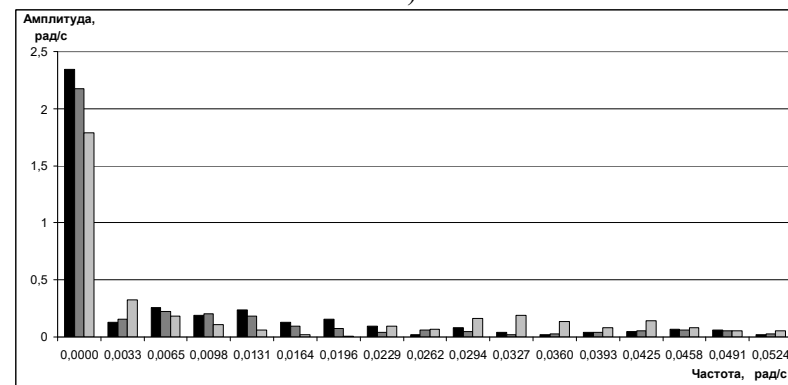
«Аист». Особенностью ОО МКА «Аист» является существенная начальная угловая скорость МКА, которую он получил при отделении от разгонного блока «Волга» [13].



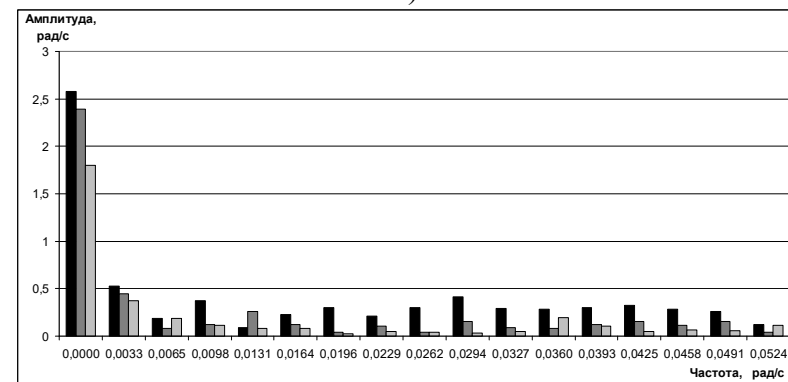
а)



б)



в)



г)

Рисунок 1. Амплитудные частотные характеристики модуля угловой скорости, смоделированной с помощью измерений магнитометров (левый столбец – магнитометр 1, средний столбец – магнитометр 2) и данных о токе с панелей солнечных батарей (правый столбец): а) ОО МКА «Аист» 12.03.2014 с 19:21:37 по 19:52:01; б) ОО МКА «Аист» 24.05.2014 с 10:14:46 по 10:45:55; в) ЛО МКА «Аист» 02.05.2013 с 18:12:41 по 19:16:43; г) ЛО МКА «Аист» 20.05.2013 с 19:48:43 по 20:49:45

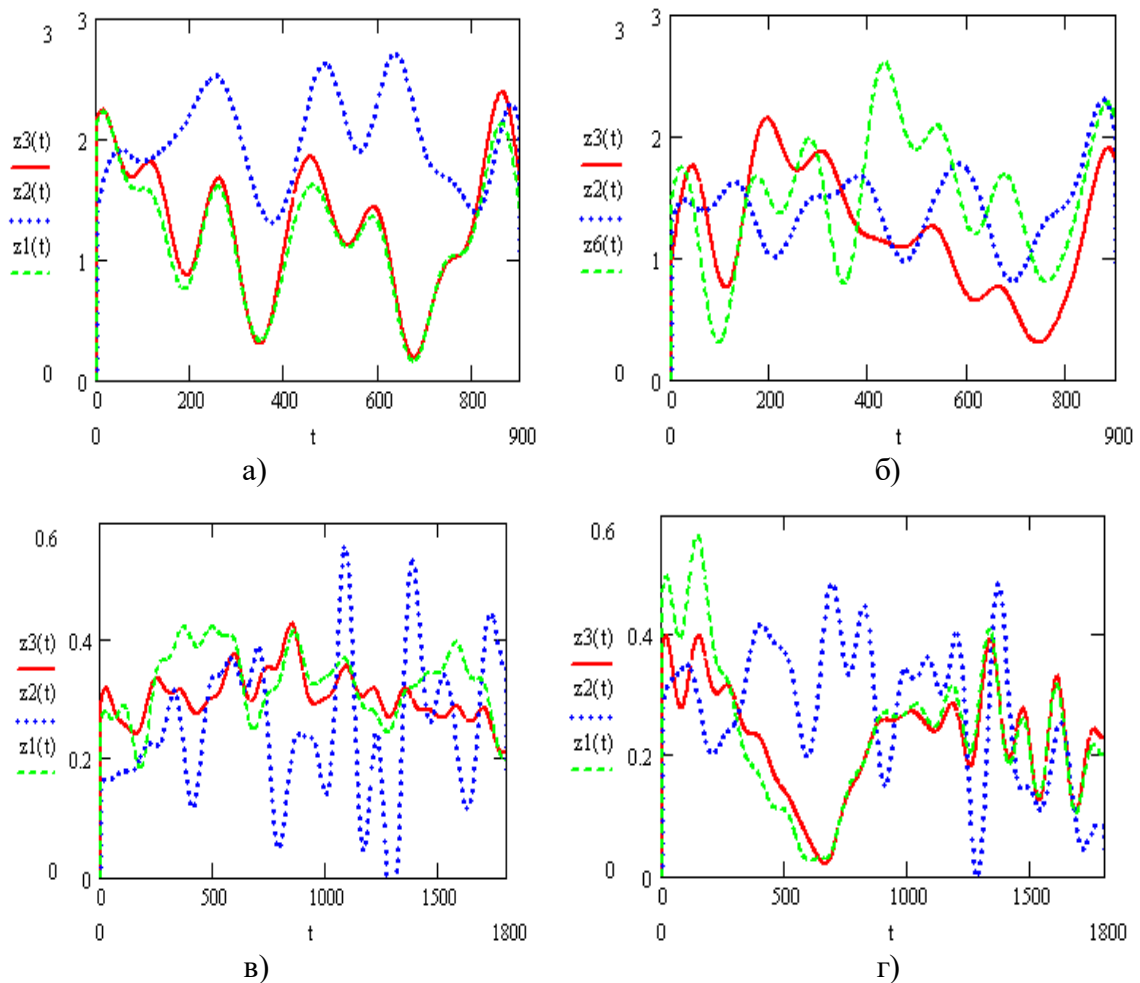


Рисунок 2. Зависимости модуля угловой скорости от времени, смоделированные по измерениям магнитометров ($z1(t)$ – магнитометр 1, $z3(t)$ – магнитометр 2) и данных о токе с панелей ($z2(t)$):

а) ОО МКА «Аист» 12.03.2014 с 19:21:37 по 19:52:01;

б) ОО МКА «Аист» 24.05.2014 с 10:14:46 по 10:45:55;

в) ЛО МКА «Аист» 02.05.2013 с 18:12:41 по 19:16:43;

г) ЛО МКА «Аист» 20.05.2013 с 19:48:43 по 20:49:45

Из рисунка 4 видно, что присутствуют значимые различия в спектрах оценок угловой скорости, полученных с помощью измерений магнитометров и данных о токе. Эти различия наблюдаются как для ЛО, так и для ОО МКА «Аист». На рисунке 1 б) различия между оценками угловой скорости по измерениям двух разных магнитометров сравнимы с различиями между магнитометрами и данными о токе. Восстановленные рядом Котельникова зависимости угловой скорости от времени приведены на рисунке 2.

Заключение

Таким образом, полученные оценки в целом соответствуют данными других авторов, приведённым в работах [14–17]. Таким

образом, можно констатировать наличие существенных различий между оценками угловой скорости с помощью измерений магнитометров и данных о токе. Они вызваны несколькими причинами: влиянием бортовой аппаратуры на измерения магнитометров, упрощённостью оценки угловой скорости с помощью данных о токе, не учитывающей отражение солнечного света Землёй, возможные затенения панелей элементами МКА, деградацию свойств фотопреобразователей и т.д. Однако, если в динамике оценок угловой скорости присутствуют существенные различия, то числовые характеристики – среднее выборочное значение и выборочная дисперсия – этих оценок довольно хорошо согласуются. Поэтому после деградации

аккумуляторной батареи можно использовать данные о токе для оценки статистических характеристик угловой скорости вращения МКА.

Литература

1. Belousov, A.I. Study of Effective Application of Electric Jet Engine as a Mean to Reduce Microacceleration Level / A.I. Belousov, A.V. Sedelnikov, K.I. Potienko // *International Review of Aerospace Engineering*. – 2015. – Vol. 8. – № 4. – P. 157–160.
2. Аншаков, Г.П. Оценка эффективности использования электротермических микродвигателей в системе управления движением космического аппарата технологического назначения / Г.П. Аншаков, А.И. Белоусов, А.В. Седельников и др. // *Известия вузов. Авиационная техника*. – 2018. – № 3. – С. 28–34.
3. Sedelnikov, A.V. Earth's magnetic field measurements data accuracy evaluation on board of the small spacecraft "Aist" flight model / A.V. Sedelnikov, A.S. Filippov, T.A. Ivashova // *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*. – 2018. – Vol. 12. – № 4. – P. 253–260.
4. Овчинников, М.Ю. Магнитные системы ориентации малых спутников / М.Ю. Овчинников, В.И. Пеньков, Д.С. Ролдугин и др. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2016. – 366 с.
5. 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 / A.V. Sedelnikov // *International Review of Aerospace Engineering*. – 2018. – Vol. 11. – № 2. – P. 76–83.
6. Абрашкин, В.И. Упрощенная методика определения вращательного движения спутника по бортовым измерениям угловой скорости и магнитного поля Земли / В.И. Абрашкин, К.Е. Воронов, И.В. Пияков и др. // *Космические исследования*. – 2016. – Т. 54. – № 5. – С. 375–387.
7. Аншаков, Г.П. Исследование влияния целевой и обеспечивающей аппаратуры на работу датчиков магнитометра КА «ФОТОН-М» № 2 / Г.П. Аншаков, А.И. Белоусов, А.В. Седельников и др. // *Известия вузов. Авиационная техника*. – 2019. – № 4. – С. 3–7.
8. Sedelnikov, A.V. Checking the correct operation of main measuring instruments on the flight model and prototype of AIST small spacecraft / A.V. Sedelnikov, E.S. Khnyryova, T.A. Ivashova // *MATEC Web of Conferences*. – 2018. Vol. 234. – 01007.
9. Sedelnikov, A.V. Mean of microaccelerations estimate in the small spacecraft internal environment with the use fuzzy sets / A.V. Sedelnikov // *Microgravity Science and Technology*. – 2018. – Vol. 30. – № 4. – P. 503–509.
10. Sedelnikov, A.V. Control of rotational motion of a partially inoperable small spacecraft using fuzzy sets / A.V. Sedelnikov, S.L. Safronov, E.S. Khnyreva // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – Vol. 1260. – 032035.
11. Sedelnikov, A.V. Approach towards establishing a backup satellite attitude control system based on the photovoltaic array / A.V. Sedelnikov, S.L. Safronov, A.S. Filippov et al. // *MATEC Web of Conferences*. – 2018. Vol. 220. – 08005.
12. Семкин, Н.Д., Результаты экспериментов, полученных с помощью научной аппаратуры «МАГКОМ» и «МЕТЕОР» малого космического аппарата «АИСТ» / Н.Д. Семкин, К.Е. Воронов, А.М. Телегин и др. // *Авиакосмическое приборостроение*. – 2014. – № 7. – С. 30–43.
13. Sedelnikov, A.V. Evaluation of calibration accuracy of magnetometer sensors of Aist small spacecraft / A.V. Sedelnikov, A.S. Filippov, A.S. Gorozhakina // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1015. – 032045.
14. Абрашкин, В.И. Неуправляемое вращательное движение опытного образца малого космического аппарата АИСТ / В.И. Абрашкин, К.Е. Воронов, А.В. Пияков и др. // *Космические исследования*. – 2017. – Т. 55. – № 2. – С. 135–149.
15. Абрашкин, В.И. Определение вращательного движения спутника АИСТ по данным бортовых измерений магнитного поля Земли / В.И. Абрашкин, К.Е. Воронов, А.В. Пияков и др. // *Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша*. – 2014. – № 17. – 38 с.
16. Sedelnikov, A.V. How Does Asymmetry of Solar Panels Influence Constructive Component of Microacceleration Field of Inner Environment of Space Laboratory/ A.V. Sedelnikov, D.P. Molyavko, K.I. Potienko //

Microgravity Science and Technology. – 2017. – Vol. 29. – № 4. – P. 305 – 311.

17. Белоусов, А.И. Анализ вращательного движения малых космических аппаратов

серии «Аист» / А.И. Белоусов, Н.Д. Сёмкин, А.В. Седельников и др. // Авиакосмическое приборостроение. – 2017. – № 8. – С. 3–10.

INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF ESTIMATING THE ANGULAR ROTATION VELOCITY OF A SMALL SPACECRAFT USING DATA ON THE CURRENT FROM SOLAR CELL

T. A. Ivashova

In the work, the parameters of the rotational motion of the flight and prototypes of the small spacecraft "Aist" were simulated. At the first stage of operation, when the battery is working, the simulation was carried out according to the data of standard measuring instruments - magnetometers. The estimation of motion parameters is carried out according to the data on the current from solar panels. The results of this assessment are compared with those obtained from magnetometer data and those of other authors. At the second stage of operation, after the degradation of the battery, the assessment is carried out only according to the data on the current from the solar panels. Conclusions are made about the nature of the rotational motion of the flight and prototypes of the small spacecraft "Aist".

Key words: stork, magnetometers, rotational motion, flight and prototype small spacecraft, motion parameters.

Статья поступила в редакцию 08.07.2020 г.