

РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА ПРИ РАБОТЕ ЦЕЛЕВОЙ АППАРАТУРЫ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ СЕРИИ «АИСТ» В УСЛОВИЯХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ

© 2018

- М. А. Иванушкин** аспирант кафедры космического машиностроения; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; ivanushkin.mks@gmail.com
- В. В. Салмин** доктор технических наук, профессор кафедры космического машиностроения; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; sputnik@ssau.ru
- С. И. Ткаченко** доктор технических наук, профессор кафедры космического машиностроения; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; sitkach@mail.ru
- И. С. Ткаченко** кандидат технических наук, доцент кафедры космического машиностроения; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; innovatore@mail.ru
- С. С. Волгин** аспирант кафедры космического машиностроения; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; nku-mka@yandex.ru

Рассматриваются вопросы определения светотеневой обстановки и её влияние на обеспечение энергобаланса двух малых космических аппаратов «АИСТ». Обеспечение энергобаланса при работе целевой аппаратуры является актуальным в случае дефицита электроэнергии, вызванного деградацией систем космической техники и факторами космического пространства. Целью работы является решение задачи повышения эффективности систем энергопитания малых космических аппаратов, работающих в условиях дефицита электроэнергии. Проведено моделирование светотеневой обстановки на орбитах малых космических аппаратов «АИСТ». Проведён анализ телеметрической информации малых космических аппаратов «АИСТ» за весь период эксплуатации. Выполнен анализ влияния светотеневой обстановки на параметры системы электропитания малого космического аппарата. На основе проведённого исследования предложен алгоритм для оценки энергобаланса, учитывающий влияние светотеневой обстановки. Использование предложенного алгоритма при работе с малыми космическими аппаратами «АИСТ» позволило учесть влияние сезонных изменений светотеневой обстановки на обеспечение энергобаланса при работе целевой аппаратуры.

Малый космический аппарат; телеметрическая информация; энергобаланс; обеспечивающая аппаратура; целевая аппаратура; светотеневая обстановка; система электропитания; орбитальная модель SGP4.

Цитирование: Иванушкин М.А., Салмин В.В., Ткаченко С.И., Ткаченко И.С., Волгин С.С. Разработка способов обеспечения энергетического баланса при работе целевой аппаратуры малых космических аппаратов серии «АИСТ» в условиях энергетических ограничений // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17, № 4. С. 57-66. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-4-57-66

Введение

Малые космические аппараты (МКА) «АИСТ» – два опытно-технологических аппарата совместной разработки АО «РКЦ «Прогресс» и Самарского университета – были запущены на орбиту в апреле и декабре 2013 г. [1]. На данный момент аппараты находятся на орбите и штатно функционируют в течение пяти лет при заявленном сроке активного существования – три года.

Несмотря на штатную работу аппаратов нельзя не отметить, что с течением времени влияние космического пространства и износ аппаратуры приводят к постепенной деградации систем МКА. В связи с этим для сохранения возможности выполнения целевых задач при дефиците электроэнергии актуальным является проведение анализа энергобаланса космического аппарата (КА) с учётом светотеневой обстановки.

Моделирование светотеневой обстановки

Моделирование светотеневой обстановки проводилось в орбитальной модели SGP4. К достоинствам данной модели можно отнести простоту расчётов (скорость и положение спутника в данный момент времени определяются без потребности в численном интегрировании), а также доступность программной реализации модели [2] и исходных данных орбитального движения, предоставляемых службой NORAD в формате TLE (two-line element set, двухстрочный набор элементов) для большинства КА, находящихся на орбите.

Пусть ρ_E – расстояние от КА до Земли, ρ_S – расстояние от КА до Солнца, r_S – расстояние от Земли до Солнца (рис. 1).

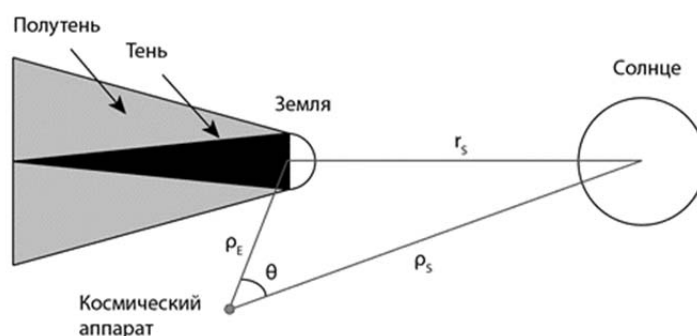


Рис. 1. Геометрия системы КА – Земля – Солнце

КА попадает в тень в случае, если угловой радиус Земли (θ_E) больше, чем угловой радиус Солнца (θ_S), а угол между центрами Земли и Солнца (θ) меньше, чем разность их угловых радиусов:

$$\begin{aligned} \theta_E &> \theta_S, \\ \theta &< \theta_E - \theta_S. \end{aligned}$$

Условие нахождения КА в полутени определяется по следующему соотношению:

$$|\theta_E - \theta_S| < \theta < \theta_E + \theta_S.$$

Из него следует, что для полутеневого затмения угол между центрами Земли и Солнца должен быть меньше суммы их угловых радиусов и больше их разности.

Значения θ_E и θ_S рассчитываются по соотношениям:

$$\theta_E = \arcsin(R_E / \rho_E),$$

$$\theta_S = \arcsin(R_S / \rho_S),$$

где R_E, R_S – соответственно радиусы Земли и Солнца.

Угол между центрами Земли и Солнца вычисляется по соотношению:

$$\theta = \arccos(\mathbf{\rho}_E \mathbf{\rho}_S / \rho_E \rho_S),$$

где числитель является скалярным произведением двух векторов расстояния, а знаменатель – произведением их модулей.

Анализ результатов моделирования

Моделирование светотеневой обстановки проводилось для двух МКА «АИСТ», начиная с 01.01.2014 г. и заканчивая 01.01.2018 г. с шагом в три минуты. В качестве исходных данных использовались актуальные TLE для каждого аппарата. Актуальность исходных данных оценивалась по разнице между эпохой, указанной в TLE, и временем, для которого проводится моделирование.

По результатам моделирования массив телеметрической информации был дополнен сведениями о светотеневой обстановке.

В качестве иллюстрации проведённого моделирования на рис. 2, 3 представлены графики изменения показаний телеметрической информации системы электропитания (СЭП) за одни сутки полёта МКА «АИСТ» RS41-at, где серыми областями обозначены участки тени на витке.

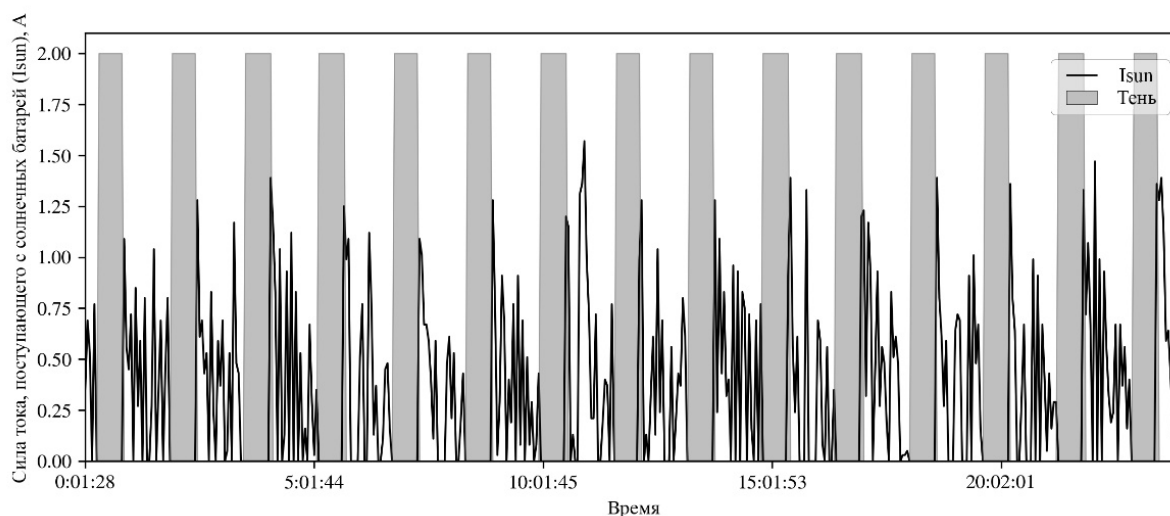


Рис. 2. График изменения силы тока, поступающего с солнечных батарей МКА «АИСТ»

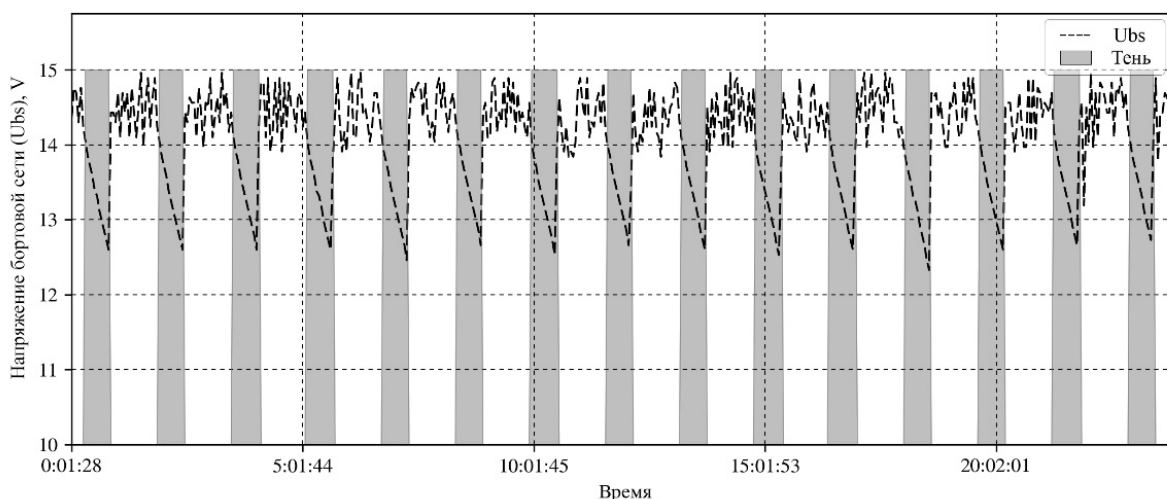


Рис. 3. График изменения напряжения бортовой сети МКА «АИСТ»

Как следует из рис. 2, на неосвещённых участках орбиты показания силы тока, поступающего с солнечных батарей, принимают нулевое значение. На освещённых участках орбиты они изменяются от 0 до 1,5 А вследствие неориентированного движения МКА. Показания напряжения бортовой сети (рис. 3) на неосвещённых участках орбиты демонстрируют плавное снижение значений до отметки не ниже 12,5 В. На освещённых участках орбиты они изменяют свои значения в диапазоне от 14 до 15 В. Это вызвано неориентированным движением МКА и работой автоматики СЭП, которая ограничивает максимальное значение напряжения, не допуская переразряда аккумуляторной батареи (АКБ).

По результатам моделирования были построены графики средней продолжительности времени тени на витке для двух аппаратов «АИСТ» (рис. 4, 5 для МКА RS41-at и RS43-as соответственно).

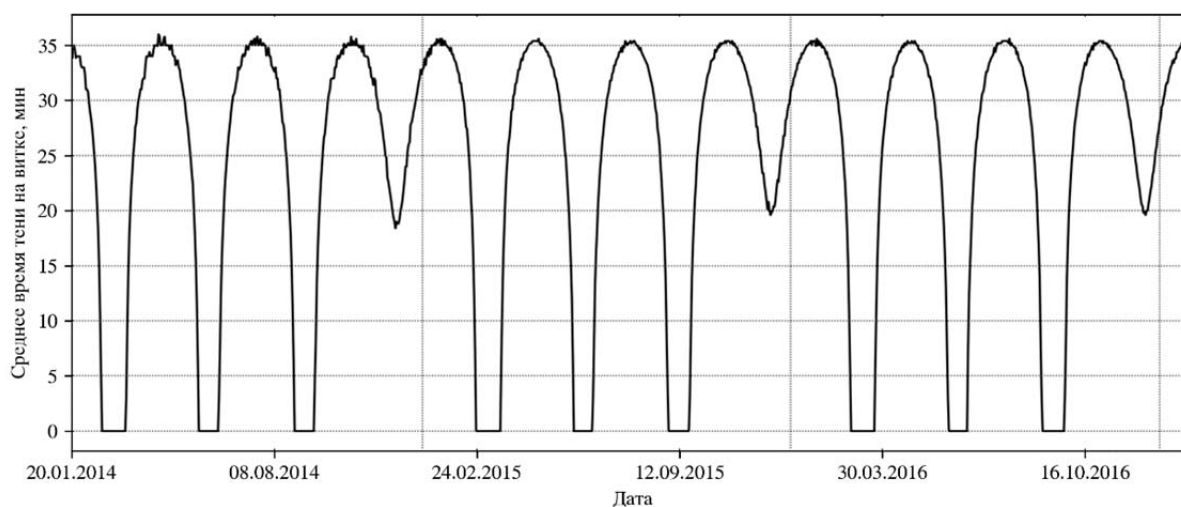


Рис. 4. Светотеневая обстановка на орбите МКА «АИСТ» RS41-at

Из графика, представленного на рис. 4, можно сделать вывод, что для МКА «АИСТ» RS41-at максимальная длительность тени на витке составляет 36 минут. Заметно, что за каждым максимумом следует постепенное уменьшение средней длительности тени на витке до тех пор, пока не наступает бестеневой этап существования МКА, длящийся от 17 до 23 дней, за которым следует постепенное увеличение длительности тени до очередного максимума. При этом, с периодичностью около года, наблюдается локальный минимум длительности тени, при котором её значение достигает 18-20 минут на виток.

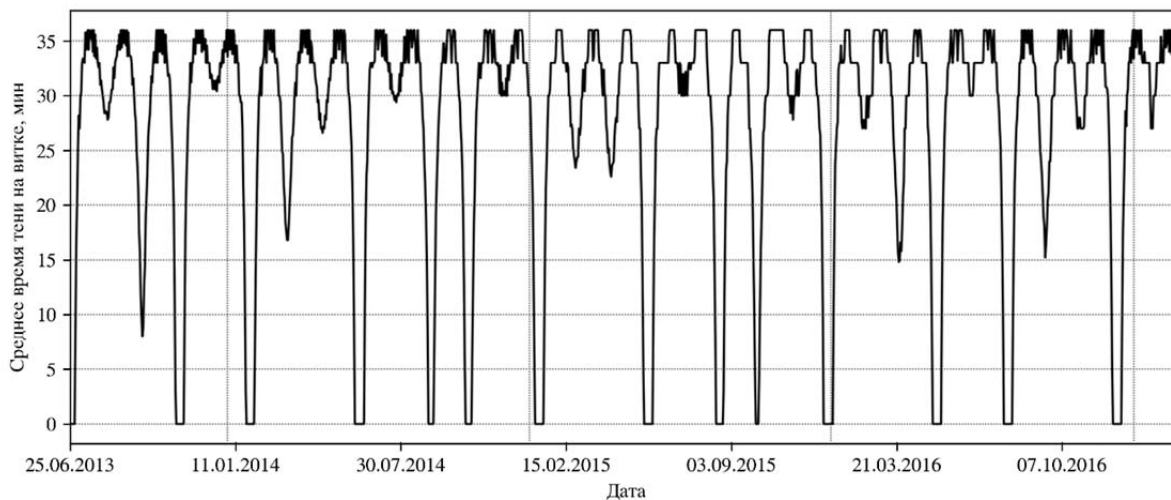


Рис. 5. Светотеневая обстановка на орбите МКА «АИСТ» RS43-as

Согласно данным, полученным для МКА «АИСТ» RS43-as (рис. 5), максимальная длительность тени на витке также составляет 36 минут. Бестеневые этапы существования для МКА «АИСТ» RS43-as имеют продолжительность от 3 до 11 дней.

При меньшей продолжительности времени нахождения МКА RS43-as на постоянно освещённых витках (по сравнению с МКА RS41-at за аналогичный промежуток времени) он оказывался на них в полтора раза чаще.

Следует отметить, что наблюдаемые бестеневые этапы существования МКА оказывают наибольшую нагрузку на пассивную систему обеспечения теплового режима обоих МКА «АИСТ» и подобных неориентируемых КА [3].

Анализ влияния светотеневой обстановки на энергобаланс целевой аппаратуры

В качестве исходных данных для анализа влияния светотеневой обстановки на условие выполнения энергобаланса использовались массивы телеметрической информации, накопленной за весь срок эксплуатации двух аппаратов МКА «АИСТ», а также данные, полученные в результате моделирования светотеневой обстановки на орбитах.

Для обеспечения энергобаланса при работе целевой аппаратуры (ЦА) необходимо, чтобы затраченная на работу ЦА суммарная мощность не превышала располагаемую мощность ($P_{расп}$) на борту МКА с учётом располагаемой ёмкости АКБ:

$$\sum_{i=1}^n (P_{ЦА_i} t_{ЦА_i}) \leq \sum_{i=1}^n (t_{ЦА_i}) P_{расч} + \Delta Q_{АКБ} U_{БС}, \quad (1)$$

где $P_{ЦА_i}$ – мощность ЦА на i -ом интервале времени в программе работы ЦА; $t_{ЦА_i}$ – длительность работы ЦА на i -ом интервале времени; $\Delta Q_{АКБ}$ – располагаемая ёмкость АКБ; $U_{БС}$ – напряжение бортовой сети.

Располагаемая мощность $P_{расч}$ рассчитывалась как разность среднесуточной мощности, вырабатываемой батареями фотоэлектрическими ($P_{БФ}$), и среднесуточной мощности, потребляемой обеспечивающей аппаратурой ($P_{ОА}$):

$$P_{расч} = P_{БФ} - P_{ОА}.$$

Для обеспечения возможности работы целевой аппаратуры располагаемая мощность должна принимать положительные значения.

Располагаемая ёмкость АКБ рассчитывалась следующим образом:

$$\Delta Q_{АКБ} = Q_{АКБ_{t=ЦА}} - Q_{АКБ}^{min}.$$

Здесь $Q_{АКБ_{t=ЦА}}$ – ёмкость АКБ на момент включения ЦА; $Q_{АКБ}^{min}$ – минимально допустимая ёмкость АКБ:

$$Q_{АБ}^{min} = Q_{ОН} + Q_{ДОП},$$

где $Q_{ОН} = 2,85A \cdot ч$ – ёмкость АКБ, при которой происходит отключение нагрузки; $Q_{ДОП}$ – дополнительная резервная ёмкость АКБ:

$$Q_{ДОП} = \frac{P_{ОА}}{U_{БС}} \tau_{тени},$$

где $\tau_{тени}$ – среднесуточная длительность теневого участка орбиты.

Связь дополнительной резервной ёмкости АКБ $Q_{ДОП}$ со среднесуточной длительностью тени на витке позволяет определить необходимую ёмкость АКБ для работы обеспечивающей аппаратуры на теновом участке в случае, если время окончания работы ЦА совпадёт со временем входа МКА в тень.

На рис. 6, 7 сопоставлены графики располагаемой ёмкости АКБ в сутки и график изменения среднесуточной продолжительности теневого участка орбиты для МКА «АИСТ» RS41-at и RS43-as соответственно.

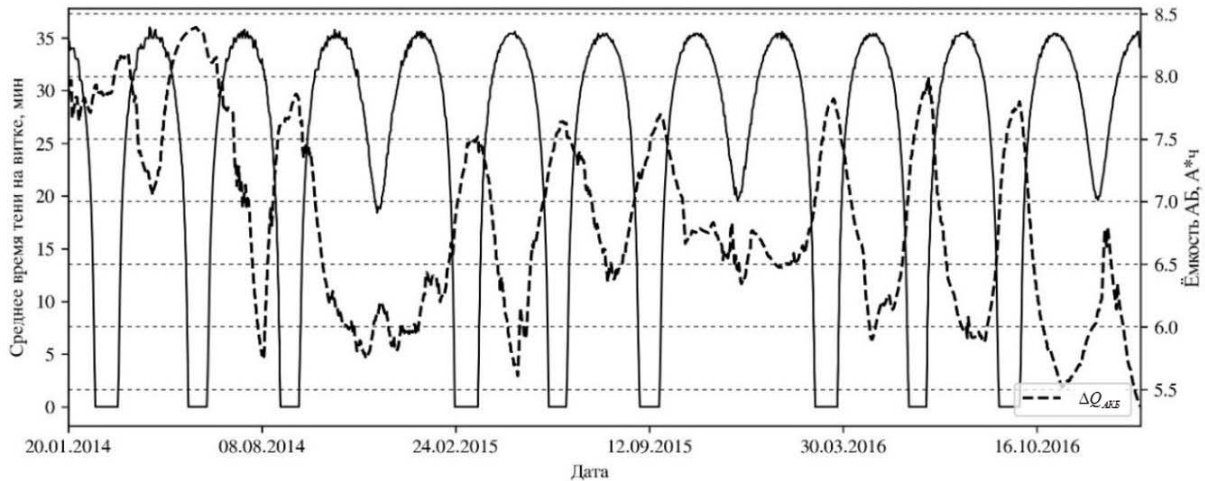


Рис. 6. График располагаемой ёмкости АКБ в сутки с учётом светотеневой обстановки (МКА «АИСТ» RS41-at)

Из графика, представленного на рис. 6, видно, как на располагаемую ёмкость АКБ $\Delta Q_{АКБ}$ влияет светотеневая обстановка: $\Delta Q_{АКБ}$ принимает минимальные значения на участках с максимальной среднесуточной длительностью тени. На участке после 16.10.2016 г. $\Delta Q_{АКБ}$ впервые опустилась ниже значения 5,5 А·ч, что при начальной ёмкости АКБ МКА «АИСТ» – 9,5 А·ч говорит о деградации АКБ более чем на 40%. Такой уровень ёмкости АКБ приводит к тому, что при длительной работе ЦА может возникнуть дефицит электроэнергии и условие энергобаланса (1) может не выполняться.



Рис. 7. График располагаемой ёмкости АКБ в сутки с учётом светотеневой обстановки (МКА «АИСТ» RS43-as)

На рис. 7 на интервале с июля 2014 г. до августа 2016 г. телеметрия обеспечивающих систем МКА «АИСТ» (RS43-as) отсутствовала в связи с отказом, вызванным попаданием в МКА тяжелозаряженных частиц. Поэтому определить располагаемую ёмкость АКБ по данным телеметрической информации на этом интервале не представляется возможным. Но по данным, представленным после восстановления работоспособ-

ности МКА «АИСТ» в августе 2016 г., видно, что минимальные значения $\Delta Q_{АКБ}$ на участках с максимальной среднесуточной длительностью не опускались ниже $6,5 A \cdot ч$, что говорит о деградации АКБ менее чем на 30%.

Для обеспечения энергобаланса КА, находящегося в условии дефицита электроэнергии с учётом светотеневой обстановки, был разработан алгоритм, учитывающий влияние светотеневой обстановки на располагаемую ёмкость АКБ. В соответствии с ним для составления программы работ ЦА прежде всего необходимо, получив актуальную телеметрическую информацию и используя разработанную модель светотеневой обстановки, рассчитать располагаемую на борту МКА мощность и располагаемую ёмкость АКБ, а затем по (1) провести сравнение полученных значений с затраченной на работу ЦА суммарной мощностью. Программа работы ЦА передаётся на борт МКА только в случае выполнения условия (1). В случае, если условие (1) не выполняется, необходимо уменьшить время работы ЦА и заново произвести расчёт.

Заключение

Проведено моделирование светотеневой обстановки на орбитах МКА «АИСТ», что позволило при обработке массивов телеметрической информации сопоставить изменения параметров СЭП с сезонными колебаниями средней продолжительности тени на витке за весь срок эксплуатации КА.

Проведённый анализ влияния светотеневой обстановки на параметры СЭП позволил предложить алгоритм, учитывающий сезонные изменения светотеневой обстановки на обеспечение энергобаланса МКА «АИСТ» при работе целевой аппаратуры.

Применение разработанного алгоритма к процессу создания программы работ ЦА позволило увеличить время её непрерывной работы в среднем с 1,5 до 4,2 ч на этапе бестеневого существования обоих МКА.

На этапах с максимальной длительностью тени на витке для МКА «АИСТ» RS-43as время непрерывной работы ЦА возросло с 50 минут до 2,2 часа.

Расчёт продолжительности работы ЦА, проведённый для МКА «АИСТ» RS-41at, показывает, что её включение возможно только во время бестеневых периодов.

Библиографический список

1. Kirilin A., Shakhmatov E., Soifer V., Akhmetov R., Tkachenko S., Prokofev A., Salmin V., Stratilatov N., Semkin N., Abrashkin V., Tkachenko I., Safronov S., Zheleznov Y. Small satellites «AIST» constellation-design, construction and program of scientific and technological experiments // *Procedia Engineering*. 2015. V. 104. P. 43-49. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.04.095
2. Satellite tracking software index. <http://celestrak.com/software/satellite/sat-trak.asp>.
3. Tkachenko S.I., Salmin V.V., Tkachenko I.S., Safronov S.L., Kaurov I.V., Ivanushkin M.A., Volgin S.S., Korovin M.D. «AIST» small satellites' family, a joint project between RSC «Progress» and SSAU, thermocontrol system performance analysis // *Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2015 (December, 1-4, 2015, Tomsk, Russian Federation)*. 2015. DOI: 10.1109/MEACS.2015.7414889

DEVELOPMENT OF METHODS FOR ENSURING ENERGY BALANCE FOR THE OPERATION OF MISSION EQUIPMENT OF “AIST”-SERIES SMALL SATELLITES UNDER CONDITIONS OF POWER LIMITATIONS

© 2018

- M. A. Ivanushkin** Postgraduate Student, Department of Space Engineering; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; ivanushkin.mks@gmail.com
- V. V. Salmin** Doctor of Science (Engineering), Professor, Department of Space Engineering; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; sputnik@ssau.ru
- S. I. Tkachenko** Doctor of Science (Engineering), Professor, Department of Space Engineering; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; sitkach@mail.ru
- I. S. Tkachenko** Candidate of Science (Engineering), Assistant Professor, Department of Space Engineering; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; innovatore@mail.ru
- S. S. Volgin** Postgraduate Student, Department of Space Engineering; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; nku-mka@yandex.ru

The article examines the issues of determining the light-and-shadow situation and its impact on providing energy balance on the orbits of two small satellites of the “AIST” series. Ensuring energy balance in the operation of mission equipment becomes particularly relevant in the case of power limitations caused by both the degradation of spacecraft systems and the factors of outer space. The main purpose of the article is to solve the problem of increasing the efficiency of the power supply system of “AIST”-series small satellites operating under resource constraints. Firstly, modeling of the lighting situation on the orbits of small satellites was carried out. Secondly, the telemetric information of “AIST” small satellites for the whole period of operation was examined. In addition, the influence of the light-and-shadow conditions on the parameters of the power system of a small satellite was analyzed. As a result, an algorithm for estimating the energy balance, taking into account the influence of the light-and-shadow situation was proposed. Using the proposed algorithm made it possible to take into account the influence of seasonal variations in the light-and-shadow environment on the possibility of ensuring energy balance in the operation of mission equipment.

Small satellite; telemetry information; energy balance; support base; target equipment; lighting; power supply system; SGP4 orbital model.

Citation: Ivanushkin M.A., Salmin V.V., Tkachenko S.I., Tkachenko I.S., Volgin S.S. Development of methods for ensuring energy balance for the operation of mission equipment of “AIST”-series small satellites under conditions of power limitations. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2018. V. 17, no. 4. P. 57-66. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-4-57-66

References

1. Kirilin A., Shakhmatov E., Soifer V., Akhmetov R., Tkachenko S., Prokofev A., Salmin V., Stratilatov N., Semkin N., Abrashkin V., Tkachenko I., Safronov S., Zheleznov Y. Small satellites «AIST» constellation-design, construction and program of scientific and technological experiments. *Procedia Engineering*. 2015. V. 104. P. 43-49. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.04.095
2. Satellite tracking software index. Available at: <http://celestrak.com/software/satellite/sat-trak.asp>
3. Tkachenko S.I., Salmin V.V., Tkachenko I.S., Safronov S.L., Kaurov I.V., Ivanushkin M.A., Volgin S.S., Korovin M.D. «AIST» small satellites’ family, a joint project between RSC «Progress» and SSAU, thermocontrol system performance analysis.

Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2015 (December, 1-4, 2015, Tomsk, Russian Federation). 2015.
DOI: 10.1109/MEACS.2015.7414889