

УДК 629.783

Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-3-558-568

Для цитирования: Оценка основных параметров телеметрии ReshUCube-1 за период 10 месяцев на орбите / О. Е. Шимова, Д. М. Зуев, Д. Д. Великанов и др. // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 3. С. 558–568. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-3-558-568.

For citation: Shimova O. E., Zuev D. M., Velikanov D. D. et al. [Evaluation of the main parameters of ReshUCube-1 telemetry over a period of 10 months in orbit]. *Siberian Aerospace Journal*. 2023, Vol. 24, No. 3, P. 558–568. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-3-558-568.

Оценка основных параметров телеметрии ReshUCube-1 за период 10 месяцев на орбите

О. Е. Шимова^{*}, Д. М. Зуев, Д. Д. Великанов, М. М. Лукьянов, К. А. Мельчуков

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский Рабочий», 31

^{*}E-mail: oksanaagafonova3@gmail.com

С увеличением количества запускаемых космических аппаратов набирает популярность такое направление, как автоматизация процессов управления космическими аппаратами. Одним из важнейших процессов является анализ телеметрических данных при эксплуатации космического аппарата. Научно-образовательный спутник Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва ReshUCube-1 успешно эксплуатируется на орбите и выполняет свои научные задачи уже более полугодия. В статье рассмотрен перечень основных параметров, анализируемых операторами Центра управления полётами для оценки состояния спутника ReshUCube-1. Описан состав и основные функциональные характеристики оборудования на космическом аппарате. Приведены качественные показатели и количественные пределы для всех описываемых параметров, а также их значимость и влияние на функционирование устройств и всего космического аппарата в целом.

Ключевые слова: ReshUCube-1, Cubesat, спутник, телеметрия, эксплуатация.

Evaluation of the main parameters of ReshUCube-1 telemetry over a period of 10 months in orbit

O. E. Shimova^{*}, D. M. Zuev, D. D. Velikanov, M. M. Luk'yanov, K. A. Mel'chukov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

^{*}E-mail: oksanaagafonova3@gmail.com

With the increase in the number of launched spacecraft, such a direction as automation of spacecraft control processes is gaining popularity. One of these most important processes is the analysis of telemetry data during the operation of the spacecraft. Scientific and educational satellite of the Reshetnev Siberian State University of Science and Technology has been successfully exploited in orbit and has been performing its scientific tasks for more than six months. The article considers a list of the main parameters analyzed by the operators of the Mission Control Center to assess the state of the ReshUCube-1 satellite. The composition and main functional characteristics of the equipment on the spacecraft are described. Qualitative indicators and quantitative limits for all described parameters are given, as well as their significance and impact on the functioning of devices and the entire spacecraft as a whole.

Keywords: ReshUCube-1, CubeSat, satellite, telemetry, exploitation.

Введение

С развитием технологий прослеживается тенденция к уменьшению размеров запускаемых космических аппаратов. На рынке космического сегмента хорошо зарекомендовали себя наноспутники формата CubeSat [1; 2]. Преимуществ у них множество, но в основном можно выделить следующие:

- время на разработку снижается в разы;
- меньшая стоимость самого спутникового аппарата;
- меньшая стоимость выведения из-за относительно небольшой массы.

Из многочисленных достоинств запуска спутников стандарта CubeSat вытекает заметное увеличение общего количества запущенных космических аппаратов данного формата [3–5]. В связи с этим появилось новое направление для исследований и разработки в этой сфере – автоматизация процессов управления космическими аппаратами [6]. К примеру, в Сибирском государственном университете науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва к 2024 г. планируется управление уже 6 космическими аппаратами. На данный момент в университете ведётся работа с тремя космическими миссиями:

- спутник ReshUCube-1 на стадии эксплуатации на орбите;
- спутник ReshUCube-2 будет запущен 26 июня 2023 г.;
- запуск спутниковой группировки ReshUCube-3 планируется в 2024 г.

Первая космическая миссия CubeSat университета

9 апреля 2022 г. на орбиту был выведен научно-образовательный спутник ReshUCube-1 [7; 8]. Космический аппарат относится к классу наноспутников кубсатов формата 3U (рис. 1), имеет габаритные размеры 10×10×34 см и массу 3,397 кг. Целью проекта ReshUCube является вовлечение школьников в космическую и научно-исследовательскую деятельность в рамках программы «Дежурный по планете» при поддержке Фонда содействия инновациям [9–11]. В дополнительные научные задачи входит:

- получение университетом лётного опыта по управлению КА;
- тестирование перспективной отечественной элементной базы;
- изучение околоземного пространства и земной поверхности.



Рис. 1. Фото спутника ReshUCube-1

Fig. 1. Photos of the ReshUCube-1 satellite

Функциональный состав

Условно спутник можно разделить на две составляющие: платформу и полезную нагрузку. К части полезной нагрузки относят все те устройства, которые определяют назначение космического аппарата, цель его функционирования. В частности, спутник ReshUCube-1 был запущен для вовлечения школьников в космическую и научную деятельность. Для этого сотрудниками лаборатории «Малые космические аппараты» Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва решено было разработать полезную нагрузку «Реконфигурируемая лаборатория» [12]. В рамках концепции реконфигурируемой лаборатории, на КА находится набор различного оборудования и датчиков, используя которое, можно выполнять различные эксперименты по следующим тематикам:

- технологические эксперименты;
- мониторинг радиационной обстановки;
- изучение атмосферы и магнитосферы Земли;
- изучение орбитального движения космического аппарата;
- наблюдение за земной поверхностью.

Возможность загрузить новое программное обеспечение ПН в процессе полёта позволяет реконфигурировать работу лаборатории.

Платформа космического аппарата – это совокупность всех основных устройств, необходимых для успешного функционирования аппарата на орбите. Для спутника ReshUCube-1 платформа ОрбиКрафт-Про 3U модификации «Профи» (SXC3-GA-ADC) была куплена в компании ООО «Спутникс» [13]. Все устройства платформы можно разделить на подсистемы в зависимости от выполняемых функций:

1. Система электропитания (СЭП). К этой части относятся плата системы электропитания, аккумуляторная батарея (АКБ) из 4 источников питания, солнечные панели. Основная функция данной системы – обеспечение электропитанием всех устройств на борту. Помимо этого, блок выполняет задачу выполнения алгоритмов живучести: контроль токов, защита от зависания, подзаряд аккумуляторных батарей, отключения устройств.

2. Система радиосвязи. К данной системе относится ультракоротковолновая (УКВ) антенна и сам блок приёмопередающего устройства. Помимо основной функции обеспечения связи между спутником и наземной станцией управления, трансивер имеет постоянную энергонезависимую память для хранения пользовательских расписаний команд. Таким образом, есть возможность управления спутником даже вне зоны радиовидимости.

3. Система бортового комплекса управления (БКУ). В данную систему входит материнская плата с различными устройствами из других систем и бортовой вычислительный модуль, выполняющий роль коммутатора датчиков и конфигурации материнской платы.

4. Система ориентации и стабилизации (СОС). В данную систему входит множество устройств: микроконтроллер СОС, блок маховиков, набор солнечных датчиков, магнитные катушки, датчик угловой скорости и магнитометры. Очевидно, что система необходима для установления необходимой ориентации космического аппарата, демпфирования угловой скорости, а также определения собственной ориентации аппарата.

Маяк

Для выполнения научной программы требуется поддержание жизнеспособности спутника. Для этого операторам центра управления полётами в первую очередь необходимо оценивать данные служебной телеметрии, полученной со спутника [14]. Оперативно анализируя состояние космического аппарата, оператор может вовремя предпринять необходимые действия при возникновении нестандартных ситуаций и преждевременно предупредить их появление. Основным источником информации является сообщение, называемое «маяк», которое периодически рассылается раз в 30 с. В этом пакете данных содержится вся основная телеметрия по состоянию системы электропитания и системы радиосвязи:

- величина температуры АКБ, УКВ-передатчика и усилителя;
- заряд АКБ;
- значения токов и напряжений с солнечных батарей;
- значения счётчика перезагрузок;
- величина угловых скоростей;
- значения токов и флагов состояний каналов питания;
- флаги критичных состояний АКБ;
- бортовое время.

Вся полученная со спутника телеметрия хранится в специальной базе данных. При необходимости анализа информации о состоянии космического аппарата, есть возможность выгружать данные с самого начала срока эксплуатации, а также для удобства делать выборки, сортируя по пакетам и периодам времени.

Температура

Одна из проблем проектирования и эксплуатации космических аппаратов – теплообмен. Поэтому температура устройств на борту – это первый важный параметр, на который следует обращать внимание при работе с космическим аппаратом. На спутниковой платформе имеется

16 штатных температурных датчиков для отслеживания теплового режима работы различных устройств. Наиболее важное значение имеет модуль АКБ, так как литий-ионные аккумуляторы имеют свои границы рабочих температур: от -20 до $+50$ °С. На борту ReshUCube-1 установлен свой рабочий режим [15; 16]. На рис. 2 показан график температур АКБ за апрель 2023 г. Как видно из графика, температура АКБ колебалась в пределах от -7 до $+15$ °С. Среднее значение температуры модуля АКБ составляет примерно $+3$ °С, что является комфортными условиями для работы литий-ионных аккумуляторов.

На рис. 3 показан график температуры приёмопередающих устройств: трансивера и усилителя УКВ. На графике можно найти три закономерности.

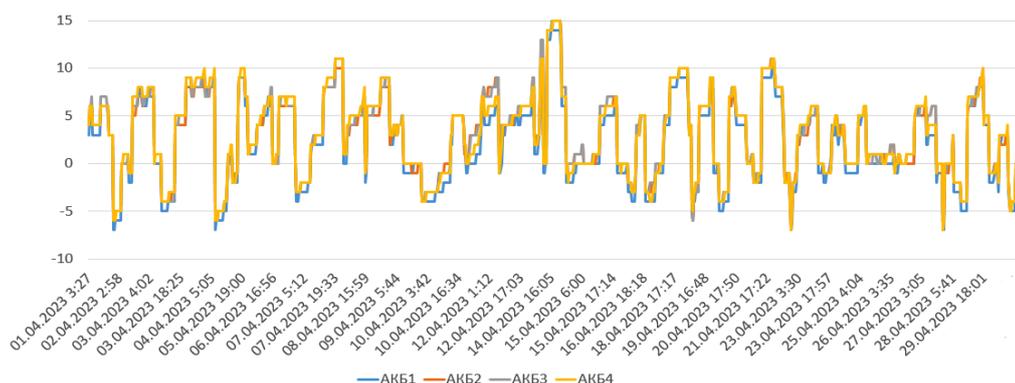


Рис. 2. График температуры модуля АКБ

Fig. 2. Battery module temperature graph

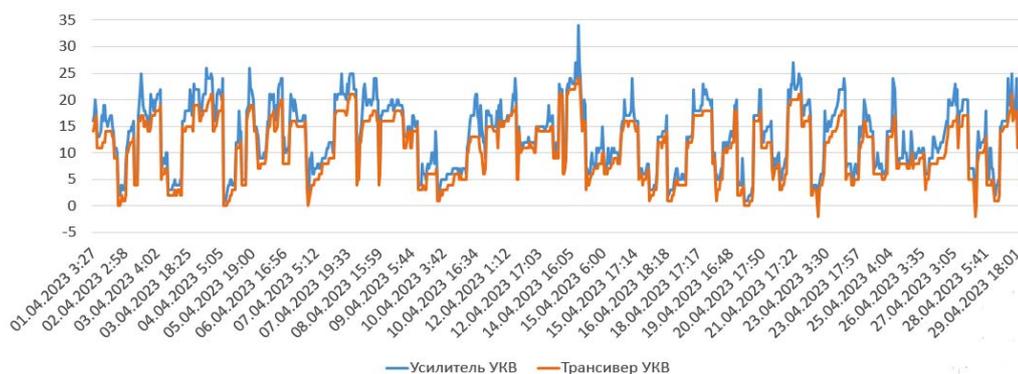


Рис. 3. График температуры трансивера и усилителя УКВ

Fig. 3. Temperature graph of the transceiver and the VHF amplifier

1. Значения температуры этих устройств сильно колеблются, но почти не опускаются до значений ниже нуля (за исключением нескольких единичных случаев до -2°): от 0 до $+34$ °С у усилителя и от -2 до $+24$ °С у самого трансивера. Постоянно положительные значения можно объяснить тем, что устройства подсистемы радиосвязи работают постоянно, даже вне зоны радиовидимости, а значит, постоянно нагреваются.

2. Температура усилителя меняется по тому же закону, что и температура самого трансивера, но значения всегда немного выше. Это обуславливается особенностями работы устройств: при постоянной работе усилитель греется сильнее.

3. Если рассматривать изменения температуры в рамках каждого сеанса по отдельности, то можно заметить, что температура устройств системы радиосвязи постоянно растёт в течение сеанса. Это можно объяснить тем, что во время сеанса связи со спутником идёт на порядок более усиленный обмен пакетами, тогда как в остальное время спутник только рассылает маяки раз в 30 мин и прослушивает эфир.

Заряд АКБ

Следующий важный параметр, контроль которого предотвратит многие проблемы при эксплуатации, – заряд АКБ. В спутниковую платформу производителем изначально заложены механизмы самоспасения. В табл. 1 описаны граничные значения напряжения и соответствующие действия автоматического контроля уровня заряда. Несмотря на то, что на спутнике предусмотрена система защиты от разряда, нежелательно допускать таких ситуаций, так как они снижают срок службы АКБ.

Таблица 1

Граничные значения напряжений АКБ

Степень заряда АКБ	Граничные значения напряжения АКБ, мВ	Действие
Нормальное	6700	Штатный режим работы
Минимальное	6200	Отключение нагревателей АКБ
Критическое	5700	Отключение всех каналов питания устройств (кроме УКВ)
Опасный	5200	Отключение УКВ

На рис. 4 показан график изменения напряжений АКБ за апрель 2023 г. Значения варьируются от 7668 до 7972 мВ, а среднее значение составляет 7881 мВ, все эти значения относятся к штатному режиму работы. Это говорит о том, что СЭП спроектирована удачно, что даже при активном использовании СОС и других энергозатратных элементов заряд АКБ не опускается ниже нормального значения.



Рис. 4. График величины напряжения АКБ за апрель 2023 г.

Fig. 4. Graph of the battery voltage for April 2023

Следует отметить, что для удобства оператора и экономии времени предусмотрены специальные поля по типу так называемых флагов. Если аппаратура космического аппарата зафиксировала критичные изменения, то “поднимается флаг” (ставятся флажки в чекбоксе). Пример показан на рис. 5.

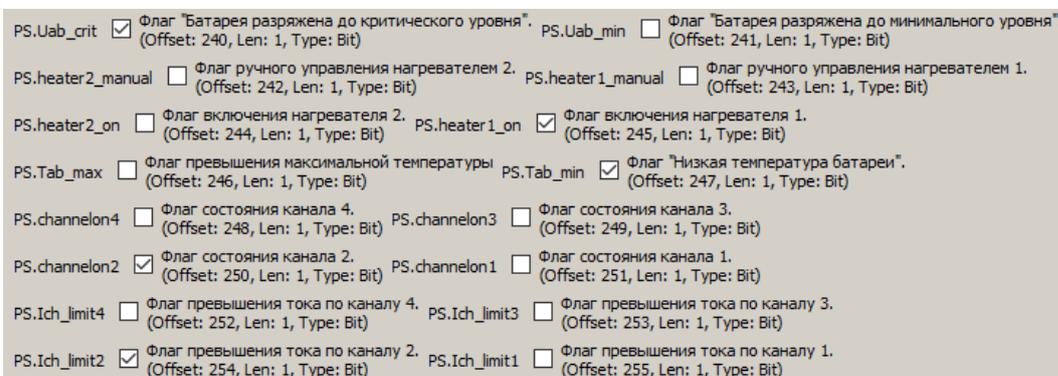


Рис. 5. Примеры флагов в маяке

Fig. 5. Examples of flags in the beacon

Энергия с солнечных панелей

Токи с солнечных панелей также играют немаловажную роль в оценке телеметрической информации и анализе энергобаланса космического аппарата. Как видно из графика за апрель 2023 г., представленном на рис. 6, значения токов каналов солнечных панелей очень сильно и быстро изменяются. Ток канала 1 (сторона Z – КА) обозначен как ток СП1, ток канала 2 (стороны Y+ и Y–) обозначен как СП2, ток канала 3 (стороны X+ и X–) обозначен как СП3. Это связано с быстрым изменением положения аппарата, в частности, вращением вокруг своих осей. Расположение плоскостей (сторон) КА изображено на рис. 7.

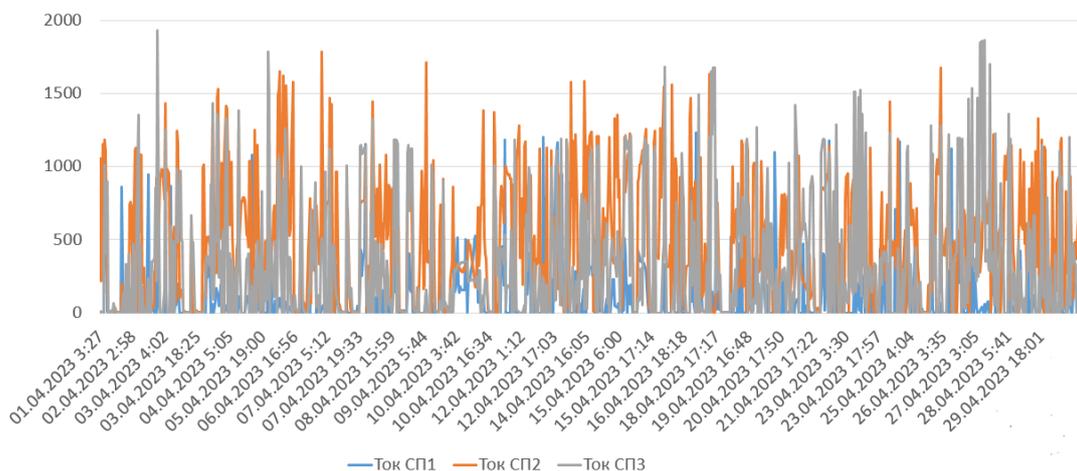


Рис. 6. График токов солнечных панелей за апрель 2023 г.

Fig. 6. Graph of solar panel currents for April 2023

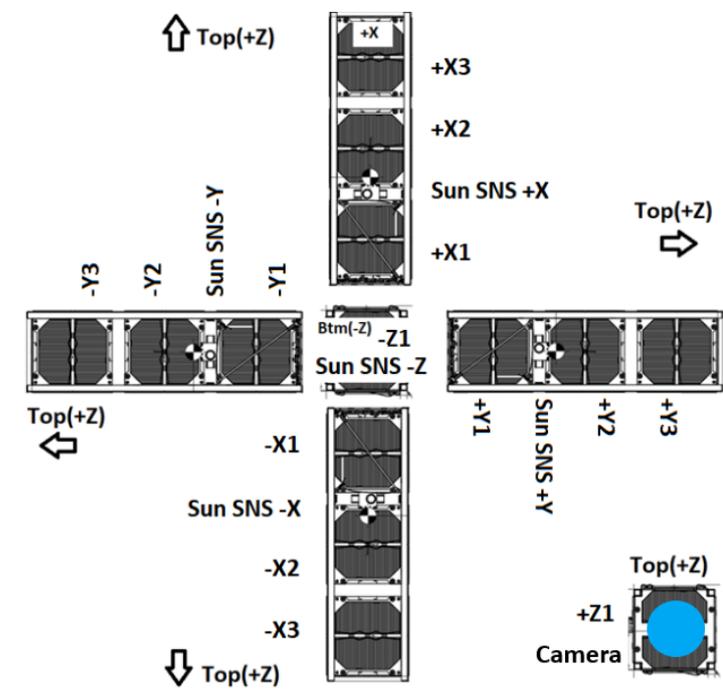


Рис. 7. Расположение плоскостей на КА

Fig. 7. Location of planes on the satellite

Еще одну закономерность можно заметить, анализируя более подробный график за несколько дней, где видны изменения токов в течение нескольких ближайших сеансов (рис. 8). На графике чётко видны периоды с нулевыми (или почти нулевыми) значениями, что означает, что спутник был в теневой зоне относительно положения Земли и Солнца.

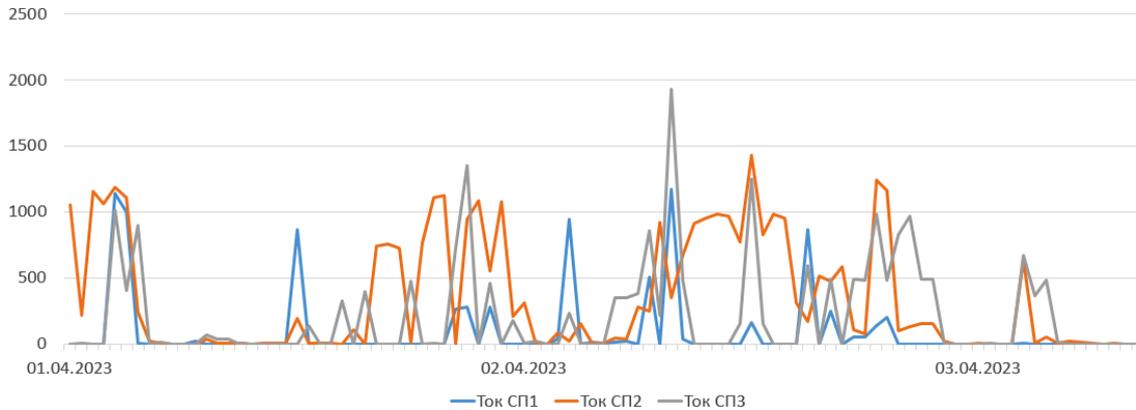


Рис. 8. График токов солнечных панелей за 1–3 апреля 2023 г.

Fig. 8. Graph of solar panel currents for April 1–3, 2023

Анализируя телеметрические данные о токах солнечных панелей, можно оценивать их уровень деградации и впоследствии корректировать энергобаланс спутника.

Угловые скорости и стабилизация

Еще одним неотъемлемым параметром при анализе работы КА являются значения угловых скоростей спутника. Данные параметры могут изменяться в худшую сторону (увеличиваться), что может отрицательно сказываться на качестве связи в канале «космос – Земля», так как положение диаграммы направленности антенн будет постоянно изменяться. На рис. 9 представлен график изменения угловых скоростей с 10 по 14 мая. В данный период не проводились никакие работы с системой ориентации и стабилизации: не демпфировались угловые скорости, не устанавливалась ориентация с помощью блока маховиков. Из графика видно, что даже в пределах одного дня угловые скорости стремительно изменяют не только модуль значения, но и знак, что означает изменение направления закручивания. Также можно заметить, что модули значений угловых скоростей колеблются в пределах до 8° , что является нормой. Без воздействия внешних факторов спутник ReshUCube-1 тенденции к закручиванию не имеет. Расположение осей КА изображено на рис. 10.

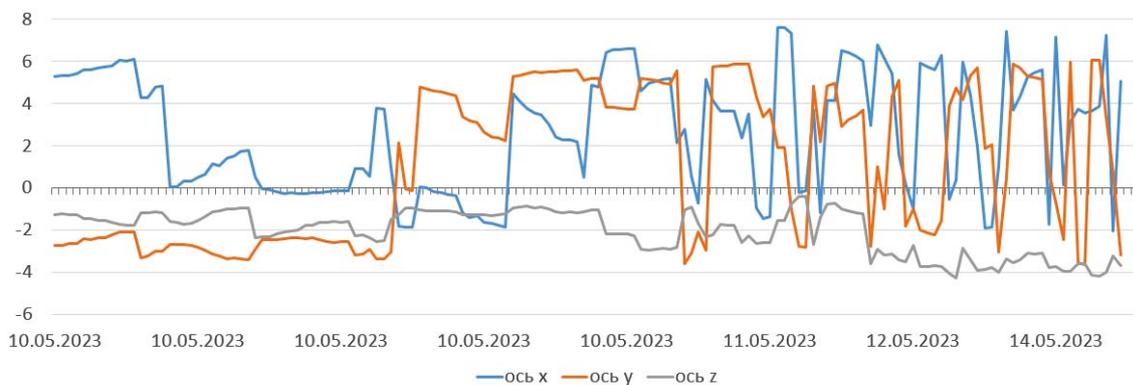


Рис. 9. График значений угловых скоростей за 10–14 мая 2023 г.

Fig. 9. Graph of angular velocity values for May 10–14, 2023

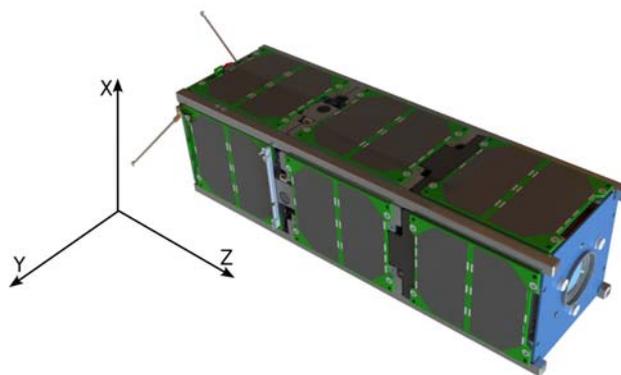


Рис. 10. Расположение осей КА

Fig. 10. Location of the satellite axes

Для демпфирования угловых скоростей на аппарате заложен алгоритм гашения угловых скоростей В-DOT. Гашение проводится с использованием магнитных катушек, так как, в отличие от гашения с помощью двигателей-маховиков, данный метод уменьшает сам угловой момент импульса КА, а не использует временный противодействующий момент импульса.

Угловые скорости требуется демпфировать при значении более $7^\circ/\text{с}$. Скорость уменьшения значений при использовании магнитных катушек составляет примерно $1^\circ/\text{мин}$, согласно лётным данным.

Вообще стабилизация спутника нарушается при влиянии различных сил: аэродинамических, гравитационных, магнитных и радиационных. Ранее было сказано, что тенденции к закручиванию КА не имеет. В ходе лётной эксплуатации было выявлено, что в большинстве случаев стабилизация ReshUCube-1 нарушается при воздействии крутящего момента блока двигателей-маховиков на ориентацию. Одной из причин этого является то, что при длительном управлении ориентацией маховики переходят в режим насыщения (их скоростей не хватает для того, чтобы компенсировать угловой момент КА). В таком случае необходимо включать дополнительную систему ориентации для разгрузки маховиков, в частности, магнитные катушки.

Второй причиной потери стабилизации является то, что, при отключении питания блока двигателей-маховиков, сами маховики продолжают бесконтрольно крутиться еще некоторое время, раскручивая КА. Для избежания таких ситуаций в циклограмму полёта после циклов установления ориентации необходимо заранее закладывать команды для демпфирования угловых скоростей.

Бортовое время и TLE

Значение бортового времени и данные TLE – это одни из важнейших функциональных параметров. Из-за некоторых релятивистских эффектов теории относительности время на космическом аппарате постоянно отстаёт, из-за чего накапливается ошибка (примерно 1 с в сутки). Важно постоянно мониторить это значение и периодически проводить синхронизацию со временем на наземной станции. Также одной из регламентных работ с аппаратом является обновление данных TLE, описывающих движение космического аппарата. Спутник, используя в совокупности бортовую шкалу времени и данные TLE, может самостоятельно определить своё местонахождение. Но параметры орбиты постепенно меняются, поэтому данные TLE становятся неактуальными. Считается, что для точного определения местоположения спутника необходимо обновлять орбитальные параметры хотя бы раз в 5 дней. В таком случае погрешность наведения КА на точку Земли составит более 6 км. Для некоторых задач, не требующих высокой точности во времени, например, составление расписания сеансов связи для планирования времени работы операторов, срок годности данных TLE составляет 14 дней, тогда погрешность составит уже 460 км, такое расстояние спутник проходит за одну минуту.

Заключение

На основе лётного опыта эксплуатации космического аппарата ReshUCube-1 был выявлен перечень параметров телеметрии, необходимых к оценке состояния спутника и его подсистем. Приведённые качественные и количественные характеристики позволяют эффективно выстроить процесс оценки телеметрии операторами Центра управления полётами. Появляется возможность переложить некоторые обязанности с операторов на машины, в частности, мониторинг жизненно важных параметров телеметрии. Поэтому первый шаг на пути к автоматизации процессов эксплуатации космических аппаратов – это определение граничных показателей. Автоматизация процессов эксплуатации позволит без потери качества работы увеличить количество эксплуатируемых спутников.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Фонда содействия инновациям в рамках программы «Дежурный по планете» (Space Pi) 6-й очереди. Проект «Космическая миссия ReshUCube», договор № 71C2/МОЛ/71271 от 29.11.2021.

Acknowledgment

The work was carried out with the support of the Innovation Assistance Fund within the framework of the “Planet Duty Officer” (Space Pi) program of the 6th stage. The project “ReshUCube Space Mission”, Contract No. 71C2/MOL/71271 dated 11.29.2021.

Библиографические ссылки

1. CubeSat Design Specification Rev. 14.1 [Электронный ресурс] // CubeSat.org. URL: https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/62193b7fc9e72e0053f00910/1645820809779/CDS+REV14_1+2022-02-09.pdf (дата обращения: 15.04.2023).
2. Учеватов В. И., Олейников Е. П. Особенности конструирования малых космических аппаратов класса CubeSat // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2022. Т. 1. С. 158–160.
3. Пуски [Электронный ресурс] // Госкорпорация “Роскосмос”. URL: <https://www.roscosmos.ru/launch/2023/> (дата обращения: 30.05.2023).
4. Nanosatellite launches [Электронный ресурс] // NanoSats Database. URL: https://www.nanosats.eu/img/fig/Nanosats_years_black_2023-05-01.png (дата обращения: 30.05.2023).
5. CubeSat Market: Global Industry Trends, Share, Size, Growth, Opportunity and Forecast 2023-2028 [Электронный ресурс] // IMARC. URL: <https://www.imarcgroup.com/cubesat-market> (дата обращения: 30.05.2023).
6. Фортекью П., Суайнерд Г., Старк Д. Разработка систем космических аппаратов : пер. с англ. М. : Альпина Паблишер, 2015. С. 765.
7. ReshUCube-1 [Электронный ресурс]. URL: <https://reshucube.ru> (дата обращения: 05.09.2022).
8. Россия вывела на орбиту иранский спутник дистанционного зондирования Земли [Электронный ресурс] // РИА Новости. URL: <https://ria.ru/20220809/sputnik-1808239841.html> (дата обращения: 05.04.2023).
9. Созвездие школьных спутников [Электронный ресурс] // Space-п. URL: <https://spacepi.space/> (дата обращения: 01.05.2023).
10. Дежурный по планете [Электронный ресурс]. URL: <https://www.spacecontest.ru/> (дата обращения: 01.05.2023).
11. Зуев Д. М., Ханов В. Х. Организация лётных экспериментов на борту космического аппарата ReshUCube-1 // Решетнёвские чтения. 2022. Т. 1. С. 422–425.
12. Ханов В. Х., Зуев Д. М., Шахматов А. В. Реализации полезной нагрузки наноспутника ReshUCube как реконфигурируемой космической лаборатории // Решетнёвские чтения. 2021. Т. 1. С. 418–419.

13. Спутниковая платформа ОрбиКрафт-Про 3U модификация «Профи» [Электронный ресурс] // Спутникс. URL: <https://sputnix.ru/ru/platformyi/cubesat-platformy/orbikraft-pro-3u-profi> (дата обращения: 20.04.2023).
14. СПУТНИКС [Электронный ресурс]. URL: <https://sputnix.ru/ru> (дата обращения: 20.04.2023).
15. Студенческий центр управления полетами [Электронный ресурс] // СибГУ им. М. Ф. Решетнёва. URL: <https://sat.sibsau.ru/> (дата обращения: 12.04.2023).
16. Учеватов В. И. Исследование теплового режима и постановка экспериментов космического аппарата ReshUCube-1 // Решетнёвские чтения. 2022. Т. 1. С. 449–451.

References

1. CubeSat Design Specification Rev. 14.1. CubeSat.org. Available at: https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/62193b7fc9e72e0053f00910/1645820809779/CDS+REV14_1+2022-02-09.pdf (accessed: 04/15/2023).
2. Uchevatov V. I., Oleynikov E. P. [Features of designing small CubeSat-class spacecraft]. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики*. 2022, Vol. 1, P. 158–160 (In Russ.).
3. *Puski. Goskorporatsiya "Roskosmos"*. [Launches. Roscosmos State Corporation]. Available at: <https://www.roscosmos.ru/launch/2023/> (accessed: 30.05.2023).
4. Nanosatellite launches. NanoSats Database]. Available at: https://www.nanosats.eu/img/fig/Nanosats_years_black_2023-05-01.png (accessed: 30.05.2023).
5. CubeSat Market: Global Industry Trends, Share, Size, Growth, Opportunity and Forecast 2023-2028. IMARC. Available at: <https://www.imarcgroup.com/cubesat-market> (accessed: 30.05.2023).
6. Fortescue P., Swaynerd G., Stark D. *Razrabotka sistem kosmicheskikh apparatov* [Development of spacecraft systems]. Moscow., Alpina Publ., 2015, P. 765.
7. ReshUCube-1. Available at: <https://reshucube.ru> (date of reference: 05.09.2022).
8. *Rossiya vyvela na orbitu iranskiy sputnik distantsionnogo zondirovaniya Zemli* [Elektronnyy resurs] // *RIA Novosti*. [Russia has put into orbit an Iranian satellite for remote sensing of the Earth. RIA Novosti]. Available at: <https://ria.ru/20220809/sputnik-1808239841.html> (accessed: 05.04.2023).
9. *Sozvezdie shkol'nykh sputnikov* [Constellation of school satellites. Space-π]. Available at: <https://spacepi.space/> (accessed: 01.05.2023).
10. *Dezhurnyy po planete* [Duty officer on the planet]. Available at: <https://www.spacecontest.ru/> (accessed: 01.05.2023).
11. Zuev D. M., Khanov V. H. [Organization of flight experiments on board the ReshUCube-1 spacecraft]. *Reshetnevskie chteniya*. 2022, Vol. 1, P. 422–425 (In Russ.).
12. Khanov V. Kh., Zuev D. M., Shakhmatov A. V. [Implementation of the payload of the ReshUCube nanosatellite as a reconfigurable space laboratory]. *Reshetnevskie chteniya*. 2021, Vol. 1, P. 418–419 (In Russ.).
13. *Sputnikovaya platforma OrbiKraft-Pro 3U modifikatsiya Profi. Sputniks* [OrbiCraft-Pro 3U satellite platform modification Profi. SPUTNIX]. Available at: <https://sputnix.ru/ru/platformyi/cubesat-platformy/orbikraft-pro-3uprofi> (accessed: 04/20/2023).
14. SPUTNIX. Available at: <https://sputnix.ru/ru> (accessed: 04/20/2023).
15. *Studencheskiy tsentr upravleniya poletami* [Student Flight Control Center. SibGU named after M. F. Reshetnev]. Available at: <https://sat.sibsau.ru/> (accessed: 12.04.2023).
16. Uchevatov V. I. [Investigation of the thermal regime and setting up experiments of the ReshUCube-1 spacecraft]. *Reshetnevskie chteniya*. 2022, Vol. 1, P. 449–451 (In Russ.).

Шимова Оксана Евгеньевна – инженер научно-производственной лаборатории «Малые космические аппараты»; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: oksanagafonova3@gmail.com.

Зуев Дмитрий Михайлович – старший преподаватель кафедры технической физики, инженер научно-производственной лаборатории «Малые космические аппараты»; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: zuevdmitriy93@yandex.ru.

Великанов Даниил Дмитриевич – магистрант; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: velikanov.danil2017@yandex.ru.

Лукьянов Михаил Михайлович – бакалавр; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: mishka.125555@mail.ru.

Мельчуков Константин Андреевич – специалист; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: menkosty@yandex.ru

Shimova Oksana Evgenievna – Engineer of Small Satellites Laboratory; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: oksanagafonova3@gmail.com.

Zuev Dmitrii Mikhailovich – Senior lecturer of Applied Physics Department, Engineer of Small Satellites Laboratory; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: zuevdmitriy93@yandex.ru.

Daniil Dmitrievich Velikanov – Master; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: velikanov.danil2017@yandex.ru.

Lukyanov Mikhail Mikhailovich – Bachelor; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: mishka.125555@mail.ru.

Melchukov Konstantin Andreevich – Specialist; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: menkosty@yandex.ru.
