

Термоэлектрическая система охлаждения фотоприёмного устройства для высокоточного звёздного датчика

Е. В. Белинская, Р. В. Бессонов, Н. Н. Брысин,
С. В. Воронков, С. А. Прохорова, Н. А. Строилов

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: brysin@mail.ru

Работа посвящена вопросам применения термоэлектрического охлаждения в приборах, предназначенных для использования в космическом пространстве. В ходе выполнения работы был собран макет звёздного датчика с приёмником изображения и объективом, с помощью которого был определён необходимый температурный диапазон для работы приёмника изображения. Этот температурный диапазон должна обеспечить система охлаждения. Приводятся обоснование принятых решений при разработке термоэлектрической системы охлаждения (ТЭСО) приёмника изображения. Работа с термоэлектрическими модулями выявила случаи выхода их из строя. Для обнаружения неисправности модулей были разработаны две методики тестирования работоспособности системы охлаждения. Первая из них проводится во всём рабочем температурном диапазоне и предполагает использование высокотехнологичного оборудования. Вторая — экспресс-проверка, которая позволяет оценить исправность модулей по косвенным параметрам. Проведён эксперимент по исследованию работы системы охлаждения приёмника изображения в условиях, приближенных к эксплуатационным, т. е. космическим. В работе приводится схема экспериментальной установки, описаны задаваемые температурные режимы и результаты эксперимента. Для отработки алгоритма управления системой охлаждения была разработана математическая модель температуры звёздного датчика. В основу модели были положены данные, полученные в ходе экспериментов по исследованию работы ТЭСО. Алгоритм управления системой охлаждения был успешно протестирован в термовакуумной камере.

Ключевые слова: термоэлектрическое охлаждение, звёздный датчик, эффект Пельтье

Одобрена к печати: 09.11.2021
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-109-115

Введение

Испытания матричных фотоприёмных устройств (ФПУ) на стойкость к воздействию ионизирующего излучения показывают, что применение охлаждения выполняет ещё одну немаловажную роль — оно уменьшает яркость радиационно-индуцированных дефектов изображения, которые образуются в материале фотоприёмника за время эксплуатации прибора в космическом пространстве под действием ионизирующего космического излучения (Белинская и др., 2018). Яркость этих дефектов изображения уменьшается вместе со снижением температуры фотоприёмника. Стоит отметить, что при температуре ФПУ ниже 0 °С зависимость снижения количества дефектов от температуры становится незначительной.

Необходимо подчеркнуть, что парирование влияния радиационно-индуцированных дефектов возможно не только посредством охлаждения ФПУ, но и с помощью программно-алгоритмических методов при обработке изображения в звёздном датчике. В ходе настоящей работы был собран макет, состоящий из корпуса, ФПУ и объектива. Причём в ФПУ был смонтирован приёмник изображения, который проходил испытания на воздействие ионизирующего излучения и имел большое количество радиационно-индуцированных дефектов. Проведённые натурные испытания макета позволили определить требования к температуре ФПУ — не более 10 °С при условии применения программно-алгоритмических методов для парирования влияния радиационного воздействия на ФПУ.

Основная задача настоящей работы — исследовать вопросы применения термоэлектрической системы охлаждения (ТЭСО) ФПУ. В первую очередь интерес представляет функци-

онирование ТЭСО при разных температурах посадочного места звёздного датчика. Для выполнения этой задачи осуществлено проектирование и сборка прототипа ТЭСО, на котором была реализована экспериментальная часть исследования.

ТЭСО должна обеспечить нужную температуру ФПУ (не более 10 °С) в широком температурном диапазоне посадочного места звёздного датчика. В качестве температурного диапазона для посадочного места звёздного датчика были выбраны типичные значения: от –15 до +45 °С. Второстепенной задачей выступала разработка алгоритмов для возможности управления ТЭСО в программном обеспечении звёздного датчика.

Проектирование термоэлектрической системы охлаждения

На начальном этапе проектирования ТЭСО были проведены оценочные расчёты. Также были выполнены экспериментальные исследования образцов термоэлектрических модулей различных производителей. Полученные данные показали, что для наиболее эффективного охлаждения ФПУ, т.е. достижения требуемой разницы температур при наименьшей потребляемой электрической мощности, следует применить многокаскадные сборки из термоэлектрических модулей. Стоит отметить, что каждый из каскадов такой сборки требует отдельного напряжения питания, что, в свою очередь, сильно усложняет схемотехнику как самого источника питания для ТЭСО, так и всего звёздного датчика. Было принято решение, что для упрощения схемотехники и повышения характеристик по надёжности источник питания ТЭСО должен иметь один канал питания. Поэтому в качестве конфигурации ТЭСО была выбрана схема, состоящая из двух двухкаскадных термоэлектрических модулей, соединённых с источником питания по последовательно-параллельной схеме, так как согласно теории и расчётам наибольшая эффективность двухкаскадных термоэлектрических охладителей достигается при условии, что верхний каскад потребляет меньшую мощность, чем нижний. Нижний каскад отводит не только теплоту от охлаждаемого объёма, но и собственное тепловыделение верхнего каскада. Поэтому нижние каскады подключены к цепи питания по параллельной схеме, а верхние соединены последовательно и подключены к этой же цепи питания. При этом верхний каскад потребляет, а соответственно, и выделяет около половины мощности от потребления нижнего каскада. Преимущество такой схемы включения заключается в простоте подключения и управления, а недостаток — в недостижимости максимальной эффективности охлаждения, которое требует изменения соотношения токов в верхнем и нижнем каскаде в зависимости от значений температуры. Необходимо отметить, что потенциальная величина максимально эффективного охлаждения больше лишь на единицы градусов, что менее важно по сравнению с упрощением схемы питания. Применение двух двухкаскадных термоэлектрических модулей позволило повысить холодопроизводительность ТЭСО

и при установке симметрично по противоположным сторонам ФПУ минимизировать температурный градиент.

Для снижения тепловыделения узел ФПУ содержит только приёмник изображения и конденсаторы. При проектировании печатной платы были применены технические решения для снижения термического сопротивления между холодной стороной ТЭСО и приёмником изображения, а также для повышения термического сопротивления между ФПУ и сопрягаемыми платами за счёт уменьшения сечения медных проводников с целью уменьшения паразитных тепловых потоков.



Рис. 1. Зависимость температуры ФПУ от температуры посадочного места звёздного датчика

Широкий температурный диапазон посадочного места звёздного датчика, равный $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, накладывает свои ограничения на работу ТЭСО. Типовые приёмники изображения имеют минимальную рабочую температуру от -20 до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Так, например, если при $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ на посадочном месте ФПУ охладилось до $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, то при $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ на посадочном месте температура ФПУ составит $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (без учёта температурной зависимости коэффициента Пельтье), и тем самым приёмник излучения будет переохлаждён (штрихпунктирная линия на *рис. 1*, см. с. 110). С другой стороны, при низких температурах посадочного места отсутствует необходимость в принудительном охлаждении ФПУ. Поэтому было решено предусмотреть два режима питания ТЭСО: «мин» и «макс». Режим «макс» — это штатный режим работы ТЭСО, при котором должна быть обеспечена требуемая температура ФПУ, т. е. ниже $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Однако при этом в условиях работы прибора в воздушной среде на холодных частях будет происходить конденсация паров воды, содержащихся в воздухе, что может привести к нежелательным явлениям, например коррозии и коротким замыканиям. По этой причине для работы в воздушной среде был предусмотрен режим питания «мин», в котором на ТЭСО подаётся минимальное напряжение, необходимое для компенсации собственного термического сопротивления ТЭСО. Также режим «мин» используется, когда температура посадочного места прибора, например, ниже $3\text{ }^{\circ}\text{C}$. В этом случае активное охлаждение, т. е. работа ТЭСО в режиме «макс», не требуется и можно снизить потребление прибора, переведя ТЭСО в режим питания «мин».

Тестирование работоспособности ТЭСО

Полученный опыт работы с термоэлектрическими модулями показал, что в заданном широком температурном диапазоне посадочного места требуется особое внимание уделить конструкции ТЭСО и методу крепления термоэлектрических модулей. В первых вариантах конструкции были выявлены выходы из строя термоэлектрических модулей. После анализа причин, приведших к отказам, в конструкцию внедрялись различные изменения. Так, например, приклеивание термоэлектрических модулей было заменено на крепление с помощью теплопроводной пасты с введением в конструкцию прижимной детали. Исходя из полученного опыта, было решено ввести обязательное тестирование работоспособности термоэлектрических модулей при изготовлении звёздного датчика, равно как и после различных видов испытаний.

Характерный отказ термоэлектрического модуля представляет собой нарушение электрического контакта в месте пайки полупроводников. Таких точек пайки в каждом термоэлектрическом модуле насчитывается не менее сотни. Нарушение контакта проявляется в небольшом увеличении внутреннего сопротивления модуля. Причём в отключённом состоянии повреждённый модуль может не отличаться по сопротивлению от исправного. Дефект проявляется либо при механическом воздействии на модуль, либо при изменении его температуры. Эта особенность стала основой для разработанной авторами данной работы методики проверки исправности термоэлектрических модулей в составе ТЭСО. Суть этой методики заключается в том, что сборка ФПУ с корпусом и ТЭСО помещается в термовакуумную камеру, в которой температура посадочного места корпуса меняется от -15 до $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом режимы работы ТЭСО соответствуют штатным и переключение между режимами происходит в соответствии с графиком на *рис. 1*. Основным критерий оценки исправности термоэлектрических модулей заключается в отсутствии резких изменений на графике зависимости потребляемой ТЭСО мощности от температуры посадочного места звёздного датчика. Вторичный критерий — это соответствие зависимости температуры ФПУ от температуры посадочного места корпуса в режиме «макс». Необходимость применения термовакуумной камеры продиктована тем, что при работе ТЭСО в присутствии атмосферного воздуха произойдёт нежелательное появление водного конденсата и из-за наличия конвекции сложно достичь нужной температуры ФПУ.

Показанная выше методика проверки термоэлектрических модулей оказывается достаточно продолжительной процедурой, использующей высокотехнологичное оборудование. В процессе проведения испытаний звёздного датчика существует необходимость в оперативной проверке исправности модулей. С этой целью был разработан и внедрён в контрольно-проверочную аппаратуру алгоритм экспресс-теста. В ходе проверки включение ТЭСО в режиме «макс» происходит на короткое время — 5 мин. За это время исправная ТЭСО охлаждает ФПУ примерно на 10 °С. При питании постоянным током нарушение электрического контакта термоэлектрического модуля, т.е. увеличение его внутреннего сопротивления, приводит к росту напряжения питания модуля и, следовательно, к увеличению мощности потребляемого вторичным источником питания, что, в свою очередь, увеличивает его тепловыделение и температуру. Основными критериями становятся величины изменений тока потребления звёздного датчика при включении ТЭСО в режиме «макс» и температуры вторичного источника питания.

Экспериментальное исследование работы ТЭСО

Для оценки температуры, до которой охладится ФПУ при нахождении звёздного датчика в космическом пространстве, был проведён эксперимент в термовакуумной камере, в которой был создан высокий вакуум. Модель звёздного датчика расположили на плите с нагревателями и термодатчиками. Сама модель датчика была обёрнута экранно-вакуумной теплоизоляцией. Перед блендой установили имитацию части конструкции, принадлежащей космическому аппарату. Такую конструкцию — внешнюю бленду — предлагается использовать для снижения тепловых потоков, проходящих через звёздный прибор, например, при освещении его Солнцем. На внешней бленде расположен термодатчик для измерения её температуры в процессе эксперимента. По периметру термовакуумной камеры располагается азотный экран, необходимый для получения высокого вакуума. Эскиз экспериментальной установки по исследованию эффективности работы ТЭСО в условиях высокого вакуума показан на *рис. 2*. В процессе эксперимента давление в камере не превысило 10^{-6} мм рт. ст.

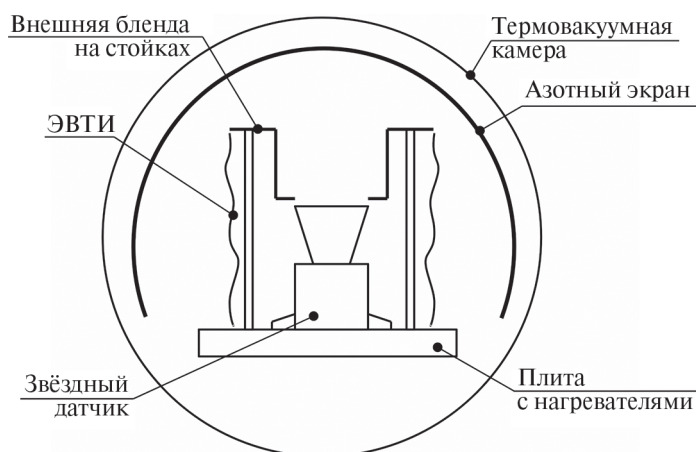


Рис. 2. Эскиз экспериментальной установки по исследованию эффективности работы ТЭСО в условиях высокого вакуума

Методика эксперимента состояла в том, что в условиях высокого вакуума и при работе ТЭСО в режиме «макс» измеряется температура ФПУ при температурах посадочного места 10, 25 и 45 °С. Данные значения температуры были выбраны, чтобы не переохладить ФПУ и при этом построить зависимость температуры ФПУ от температуры посадочного места звёздного датчика. На *рис. 3* (см. с. 113) показаны результаты, полученные в ходе эксперимента.

Стоит обратить внимание на график температуры внешней бленды на *рис. 3* — её значения не превышают -10°C . Использование внешней бленды не предполагает её термостабилизацию системой обеспечения теплового режима космического аппарата, т.е. температура внешней бленды должна соответствовать температуре посадочного места звёздного датчика. Для того чтобы оценить температуру ФПУ при тёплой внешней бленде, было проведено измерение с отключённым азотным экраном и при температуре посадочного места и внешней бленды равной 27°C . Полученное значение нанесено на график на *рис. 3*; как видно, оно несколько выше, чем то, которое было взято с холодным азотным экраном. Для оценки значений температуры ФПУ при тёплой внешней бленде был проведён следующий расчёт. Посредством линейной регрессии по полученным в ходе экспериментов значениям была рассчитана прямая зависимость температуры ФПУ от температуры посадочного места при температуре внешней бленды не выше -10°C . Затем эта прямая была смещена таким образом, чтобы на ней оказалось значение температуры ФПУ, полученное при температуре внешней бленды 27°C . Данная смещённая прямая — это искомая зависимость температуры ФПУ от температуры посадочного места звёздного датчика в условиях высокого вакуума (*рис. 4*).

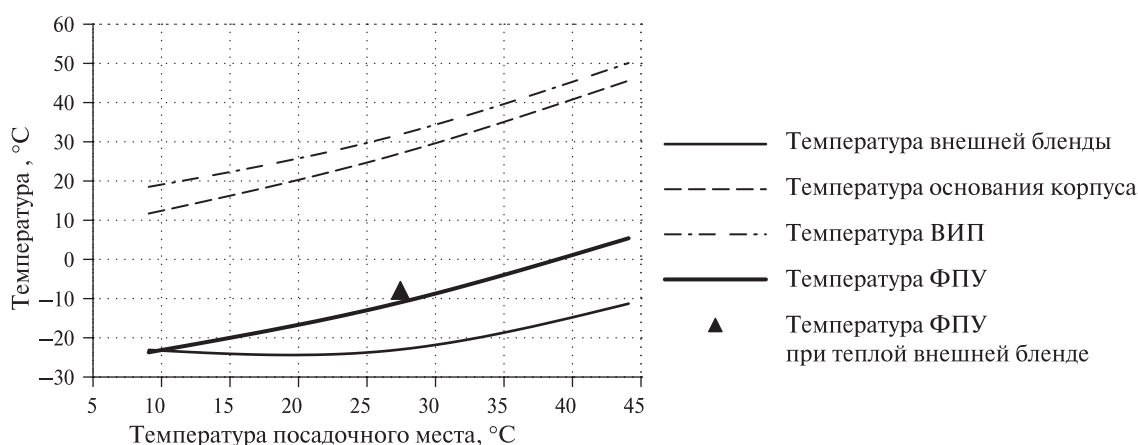


Рис. 3. Показания термодатчиков на модели звёздного датчика при разной температуре посадочного места

Как видно из графика на *рис. 4*, температура ФПУ полностью соответствует требуемым значениям.

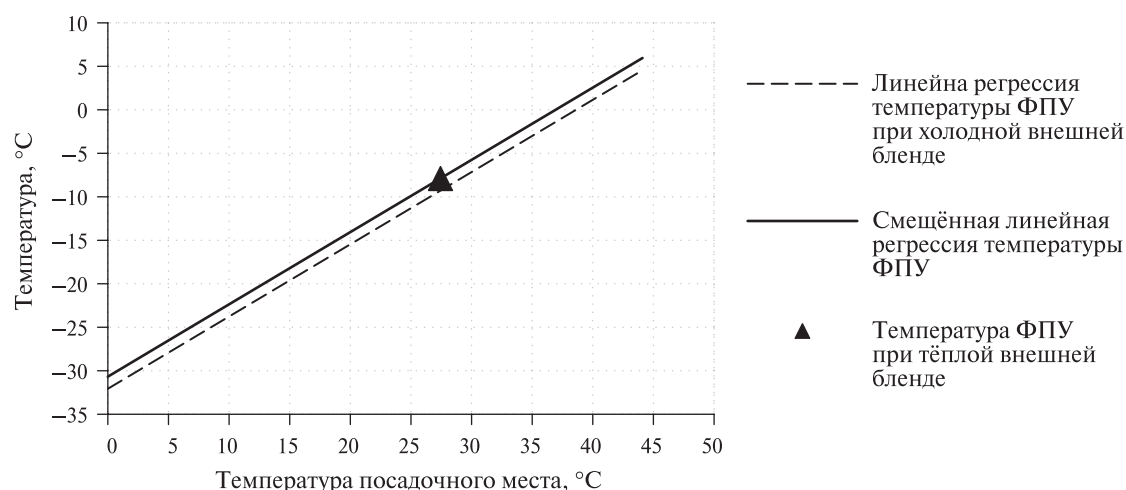


Рис. 4. Зависимость температуры ФПУ от температуры посадочного места звёздного датчика в условиях высокого вакуума

Отработка алгоритмов управления ТЭСО

Задачу переключения между режимами «мин» и «макс» и отслеживание температуры прибора предполагается возложить на вычислитель звёздного датчика, поскольку из-за инерционности температурных процессов быстрое действие не требуется. Для отработки алгоритма автономного управления ТЭСО была разработана математическая модель температуры звёздного датчика. В основу модели были положены данные, полученные в ходе экспериментов по исследованию работы ТЭСО. Результаты моделирования показали, что управление ТЭСО можно осуществлять по показаниям как термодатчика ФПУ, так и термодатчиков на корпусе самого звёздного датчика, если они установлены рядом с посадочным местом. Также по результатам моделирования были определены значения температуры ФПУ и корпуса прибора, при которых должно происходить переключение режимов работы ТЭСО. На *рис. 5* показаны графики, построенные по результатам моделирования температуры ФПУ при изменении температуры посадочного места.

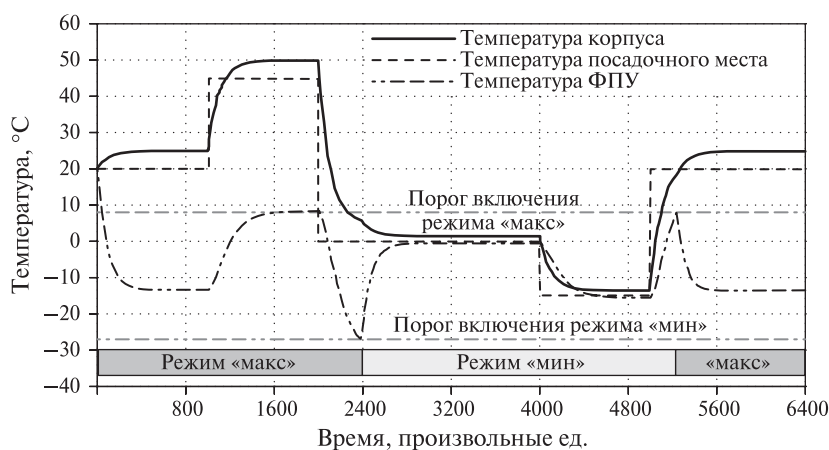


Рис. 5. Анализ поведения модели ТЭСО при изменении температуры посадочного места звёздного датчика

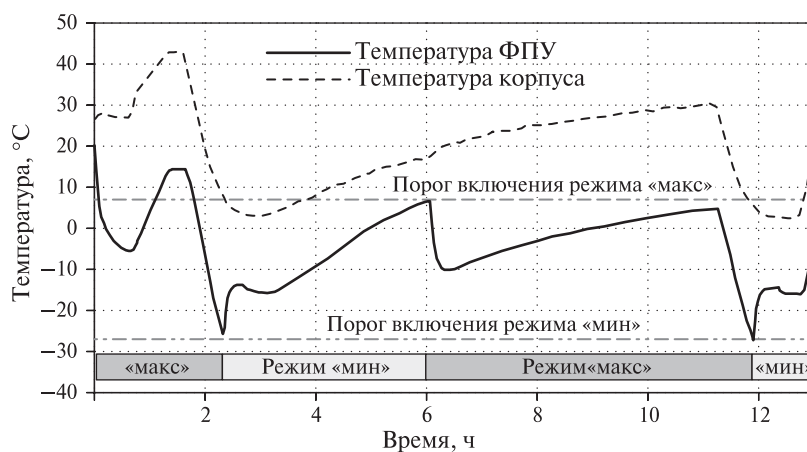


Рис. 6. Результаты тестирования автономного управления ТЭСО вычислителем звёздного датчика

Алгоритм управления ТЭСО, реализованный во встроенном программном обеспечении вычислителя, был протестирован в термовакуумной камере. Температура посадочного места изменялась от 0 до 43 °С. При достижении установленного порога температуры ФПУ вычислитель либо включал ТЭСО, либо отключал. Данные, полученные в ходе тестирования (*рис. 6*), показали полное соответствие с результатами моделирования.

Заключение

В ходе натурных экспериментов с макетом звёздного датчика, в котором был установлен приёмник изображения, прошедший радиационные испытания, было показано, что для успешной работы температура ФПУ не должна превышать 10 °С.

Разработана ТЭСО для высокоточного звёздного датчика, предусматривающая два режима работы, которые позволяют поддерживать постоянный градиент температуры.

Создана математическая модель температуры в звёздном датчике, позволившая отработать внутреннее программное обеспечение вычислителя прибора для управления ТЭСО.

Литература

1. Белинская Е. В., Кобелева А. А., Сметанин П. С., Эльяшев Я. Д., Черняк М. Е. Сравнение эффектов структурных повреждений в матрицах КМОП и ПЗС, применяемых в звёздных датчиках, на примере CMV4000 и ФППЗ «Лев-4» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 6. С. 119–130. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-119-130.

Thermoelectric photodetector cooling system for high precision star sensor

E. V. Belinskaya, R. V. Bessonov, N. N. Brysin, S. V. Voronkov,
S. A. Prokhorova, N. A. Stroilov

*Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: brysin@mail.ru*

The work is devoted to the application of thermoelectric cooling in devices intended for use in outer space. In the course of the work, a mock-up of a star sensor with an image receiver and a lens was assembled, with the help of which the required temperature range for the operation of the image receiver was determined. The cooling system must provide this temperature range. The substantiation of the decisions made in the development of the thermoelectric cooling system of the image receiver is given. Working with thermoelectric modules revealed cases of their failure. To detect the malfunction of the modules, two methods of testing the operability of the cooling system were developed. The first of them is carried out over the entire operating temperature range and involves the use of high-tech equipment. The second is an express check and allows you to assess the health of the modules by indirect parameters. An experiment was carried out to study the operation of the cooling system of the image receiver in conditions close to operational, that is, space. The paper presents a diagram of the experimental setup, describes the set temperature conditions and the results of the experiment. To test the cooling system control algorithm, a mathematical model of the star sensor temperatures was developed. The model was based on the data obtained in the course of experiments to study the operation of TESO. The cooling system control algorithm has been successfully tested in a thermal vacuum chamber.

Keywords: thermoelectric cooling, star sensor, Peltier effect

Accepted: 09.11.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-109-115

References

1. Belinskaya E. V., Kobleleva A. A., Smetanin P. S., Elyashev Ya. D., Chernyak M. E., Comparison of the structural damage effects in CMOS and CCD used in star trackers by the example of CMV4000 and LEV-4 CCD, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 6, pp. 119–130 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-119-130.