

УДК 629.7.064.54



Ворнер Д.Ф.

Ворнер Д.Ф.

Лаборатория реактивного движения,
Калифорнийский технологический институт,
4800, Оук Гроув Драйв, Пасадена, Калифорния,
США 91109, 818-393-2000

**ЕЩЕ ОДИН МОДИФИЦИРОВАННЫЙ
ВАРИАНТ МНОГОЦЕЛЕВОГО РАДИОИЗОТОПНОГО
ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА,
ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕГО ПИТАНИЕМ МАРСОХОД CURIOSITY**

Многоцелевой радиоизотопный термоэлектрический генератор для Марсианской научной лаборатории был разработан Министерством энергетики для НАСА. После запуска корабль с Марсианской научной лабораторией обеспечил высококачественный телеметрический поток с измерением электрических и тепловых характеристик генератора. Эти данные были использованы для обновления прогнозных моделей, и новый прогноз характеристик многофункционального РИТЭГ на поверхности Марса был сделан перед входом в атмосферу, спуском и посадкой на Марсе. После приземления многоцелевой РИТЭГ, питающий Curiosity, показал отличную работу, обеспечивая питание сверх прогнозов и работая в допустимых температурных пределах. Генератор вырабатывал примерно 114 Вт в начале выполнения миссии на поверхности в течение около двух земных лет или одного марсианского года. В данной статье охарактеризована работа многоцелевого радиоизотопного термоэлектрического генератора Марсианской научной лаборатории в ходе выполнения основной миссии и начальных месяцев первого продолжительного полета, а также рассмотрены факторы, влияющие на его характеристики.

Ключевые слова: радиоизотоп термоэлектрический генератор, выходная мощность, энергетический ресурс

The Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator (MMRTG) for the Mars Science Laboratory (MSL) mission was developed by the United States Department of Energy (DOE) for the National Aeronautics and Space Administration (NASA). Once launched, the MSL spacecraft provided a hi-fidelity telemetry stream measuring the generator's electrical and thermal performance. These data were used to update predictive models and a new prediction of the performance of the MMRTG on the surface of Mars was run just before Entry, Descent, and Landing (EDL) at Mars. Once landed the MMRTG powering Curiosity was found to be working extremely well, providing power above predictions and operating within its flight allowable temperature limits. The generator was producing approximately 114 W at the beginning of the surface mission, a mission of nearly two Earth years or one Mars year. This paper will elaborate on the MMRTG's performance throughout the primary mission and the initial months of the first extended mission as well as discuss related events and phenomena that affected the MMRTG's performance.

Key words: radioisotope thermoelectric generator, power output, energy lifetime

Введение

Министерством энергетики Соединенных Штатов разработан многоцелевой радиоизотопный термоэлектрический генератор (РИТЭГ) для Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства (НАСА) [1]. Генератор был задуман как многоцелевой источник питания для поддержки полетов к таким разноплановым местам назначения в солнечной системе, как Европа, Титан, Луна и другие. Это высоконадежная, долговечная, устойчивая радиоизотопная система питания. Многоцелевой РИТЭГ может приземляться на другие платформы, работать в вакууме или атмосфере, обеспечивать бесшумное питание и летать на сертифицированных ракетносителях НАСА.

Марсианская научная лаборатория была выбрана в качестве первой миссии для применения многоцелевого РИТЭГ. Генератор сейчас находится у основания Кратера Гейла на Марсе, обеспечивая питание и обогрев марсохода Curiosity. Марсоход показан на рис. 1. Многоцелевой РИТЭГ обеспечивает питание для зарядки батарей марсохода, и проведения научных экспериментов, приведения в движение корабля и выполнения других действий, потребляющих энергию. Одновременно инфракрасное излучение от многоцелевого РИТЭГ улавливается двумя теплообменниками, окружающими его. Далее его энергия подается к боксу с электронной аппаратурой для поддержания ее в эксплуатационных условиях.

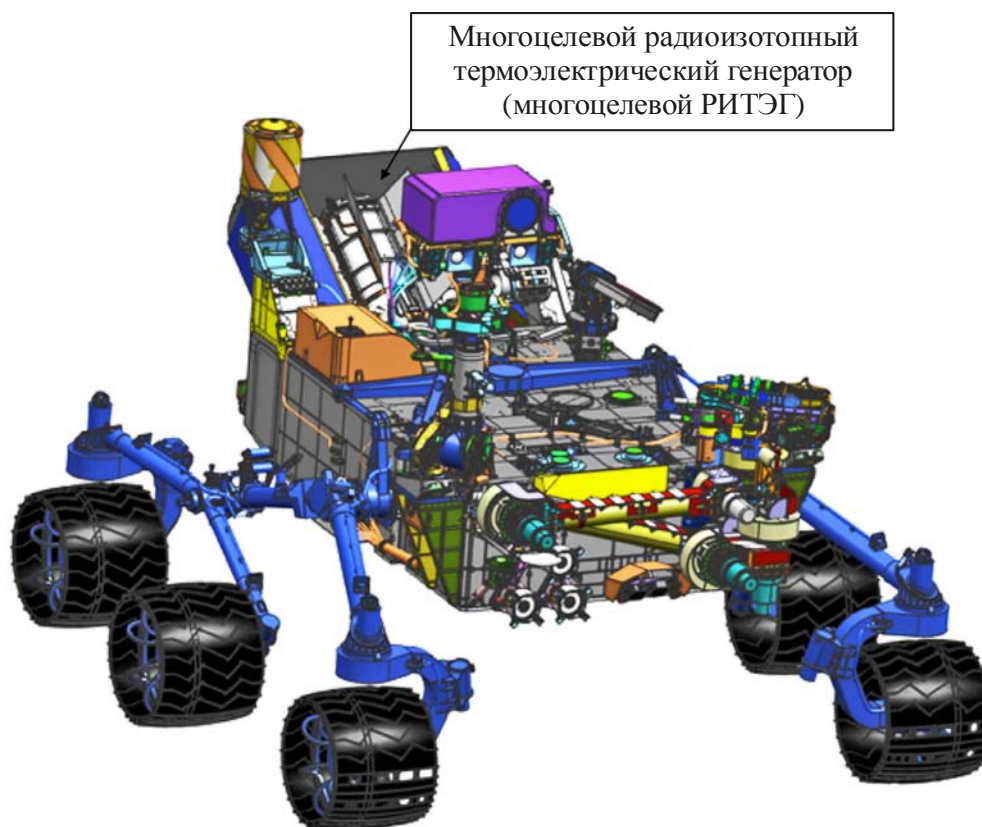


Рис. 1. Конфигурация марсохода после приземления. Марсоход Curiosity с установленным в хвостовой части многоцелевым РИТЭГ.

Ключевые даты включают: посадку 6 августа 2012 г. [2]; первое движение 22 августа 2012 г. [3]; окончание основной миссии 24 июня 2014 [4].

Крупным планом рис. 2 показано изображение многоцелевого РИТЭГ.



Рис. 2. Многоцелевой РИТЭГ на Марсе. Снимок сделан на 24 марсианские сутки.

В данной статье описаны рабочие характеристики многоцелевого РИТЭГ и даны прогнозы его работы от подготовки к пуску до начала первого продолжительного полета, а также обсуждены несколько событий и явлений, повлиявших на его работу.

Предпусковые прогнозы

Комплекс прогнозов мощности с применением консервативных допущений старения и разрушения был подготовлен за несколько месяцев до запуска в июне 2011. Существовало три прогноза на основе трех уникальных моделей, построенных совместно, и задана неопределенность (см. рис. 3) [5]. Проект Марсианская научная лаборатория был информирован об этих прогнозах и связанных с ними неопределенностях. Руководители проекта Марсианская научная лаборатория решили перепланировать полет с посадкой на поверхность, используя пересмотренные прогнозы плюс неопределенность. Прогнозы мощности плюс неопределенность означали, что батарея будет заряжаться несколько медленнее; и поэтому некоторые научные действия потребуют больше времени, а некоторые будут исключены. Перепланированный полет по-прежнему будет отвечать требованиям НАСА.

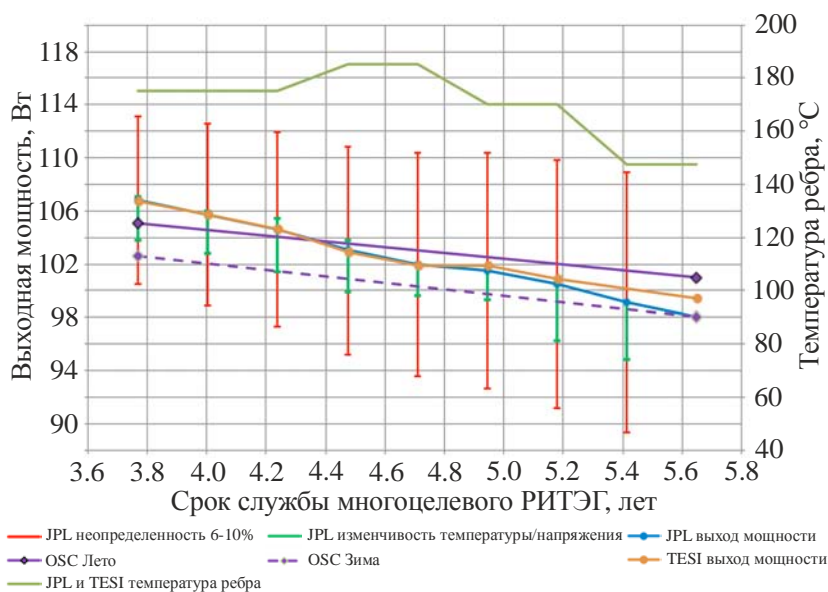


Рис. 3. Предпусковые прогнозы мощности. Прогноз мощности многоцелевого РИТЭГ, сделанный Лабораторией реактивного движения (JPL) в ходе программы Марсианской научной лаборатории полета с посадкой на поверхность, включая неопределенность 6% в начале выполнения полета и 10% – в конце. Приведены также данные Orbital Sciences Corporation (OSC)/Analytix и Teledyne Energy Systems Inc. (TESI).

Посадка

Согласно прогнозам, температура многоцелевого РИТЭГ начала быстро увеличиваться незадолго до входа в атмосферу и до посадки. Это было вызвано отводом жидкости для охлаждения многоцелевого РИТЭГ. Жидкость циркулировала до маршевой ступени, где тепло от жидкости отводилось за борт. Для полета аппарата, рассчитанного на вход в марсианскую атмосферу, производился сброс маршевой ступени, так что жидкость сбрасывалась в космос. Почти одновременно с отводом жидкости сегмент силовой шины, соединяющей аппарат с маршевой ступенью, открывался или задривался, с тем, чтобы короткие замыкания не влияли на технические характеристики аппарата, когда нож взрывного болта отсекал провода силовой шины. На рис. 4 изображены основные секции космического летательного аппарата Марсианской научной лаборатории до входа в атмосферу на Марсе.

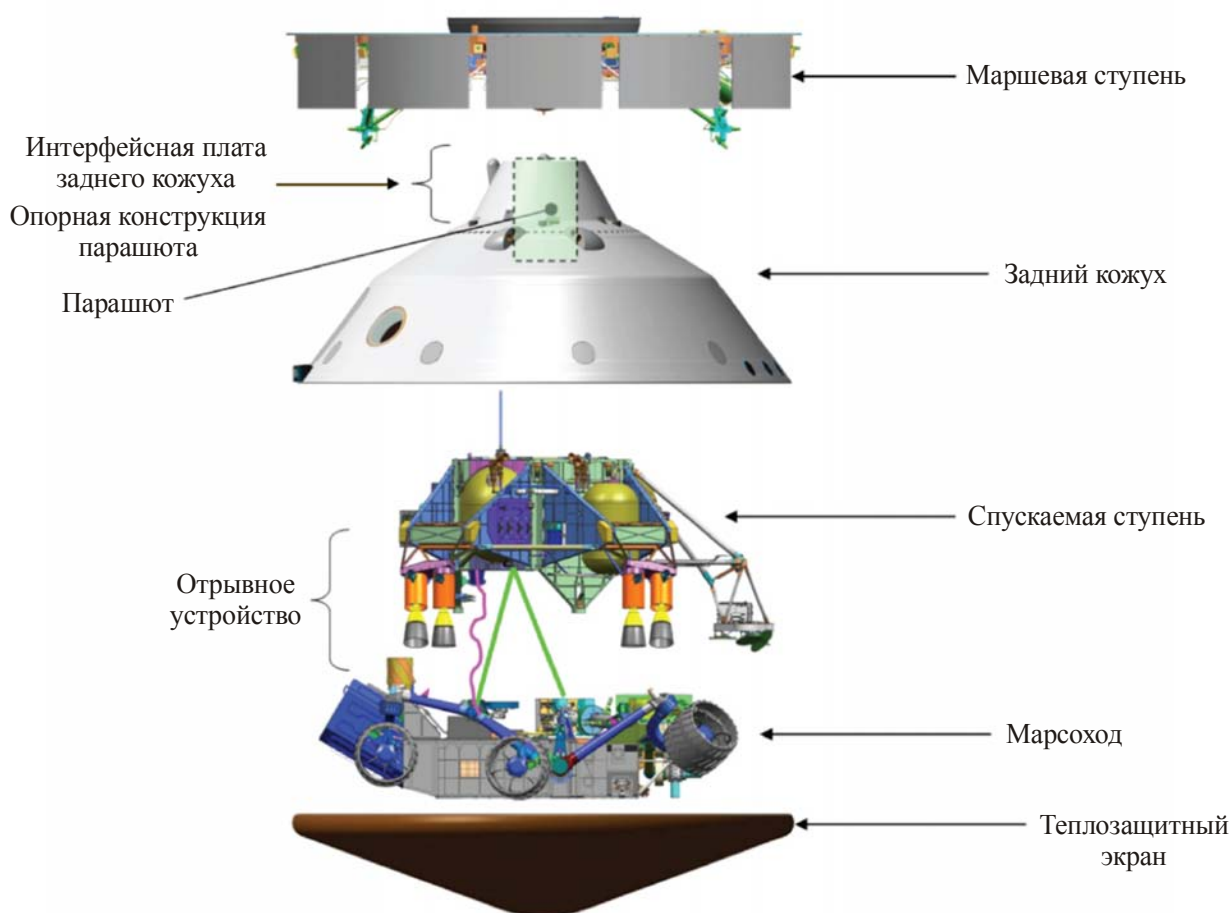


Рис. 4. Основные элементы космического летательного аппарата марсианской научной лаборатории.

После задривания силовой шины напряжение силовой шины падало примерно до 31 В [5]. Это выводило рабочую кривую мощности многоцелевого РИТЭГ на новый уровень, но тенденция к снижению выходной мощности сохранялась постоянной, за исключением нескольких незначительных переходных процессов. То есть, принудительное охлаждение многоцелевого РИТЭГ прекращалось и он по-прежнему был защищен от прямого взаимодействия с атмосферой внутри космического летательного аппарата, поэтому

температура его ребер быстро возрастала. Повышение температуры ребер вызвало уменьшение градиента от горячего спая к холодному, что привело к снижению мощности многоцелевого РИТЭГ. Снижение выходной мощности продолжалось до отделения тепловой защиты, а затем воздействие оказывал атмосферный ветер. После отделения тепловой защиты выходная мощность многоцелевого РИТЭГ начала восстанавливаться. Было замечено замедление скорости возрастания температуры многоцелевого РИТЭГ. Выходная мощность медленно восстанавливалась, пока не достигла нового стационарного значения примерно 114 Вт спустя 5 часов после отвода охлаждающей жидкости. Таким образом реальное установившееся значение составило 114 В по сравнению с прогнозируемым 106.3 Вт.

Выходная мощность при выполнении основной миссии

Изменения среднемесячной выходной мощности и температуры отражены на рис. 5. Среднемесячная выходная мощность монотонно снижалась, со времени приземления со средней скоростью примерно 4.8 % в год. Это связано и с распадом топлива, и со снижением коэффициента Карно. Из рисунка также видно, что средние температуры сохранялись в диапазоне 7 °С, демонстрируя падение температуры генератора со временем, что является еще одним указанием на распад топлива со временем. На рис. 6 приведен график среднемесячных измерений выходной мощности. Мощность изменяется между минимумом и максимумом ежедневно и ежемесячно по нескольким причинам. Наибольшие ежедневные изменения выходной мощности вызваны изменениями напряжения нагрузки силовой шины марсохода, колебаниями температуры в атмосфере и ежедневными восходами и заходами Солнца, нагревающего многоцелевой РИТЭГ.

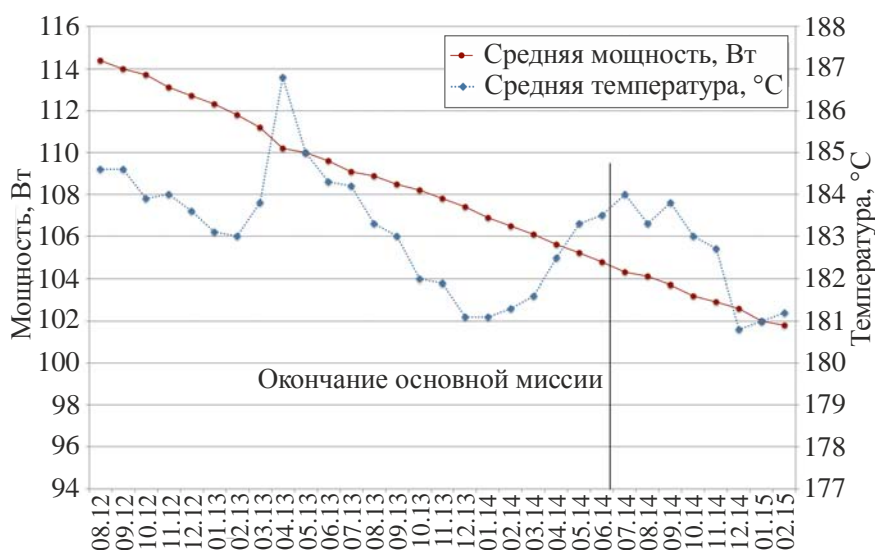


Рис. 5. Графики среднемесячной выходной мощности (левая ось) и среднемесячных температур (правая ось) для датчика температуры, используемого для оценки температуры ребер многоцелевого РИТЭГ на марсоходе Curiosity (даты следует читать как месяц-20xx).

Однако из рис. 5 видно, что изменение средних температур не может служить доминирующей причиной изменений выходной мощности. Главным источником изменений

выходной мощности являются изменения напряжения силовой шины; эти изменения нагрузки происходят ежедневно, когда марсоход активируется утром и использует батарею в течение дня, а затем переводится в режим сна, когда многоцелевой РИТЭГ перезаряжает батарею для выполнения операций на следующий день.

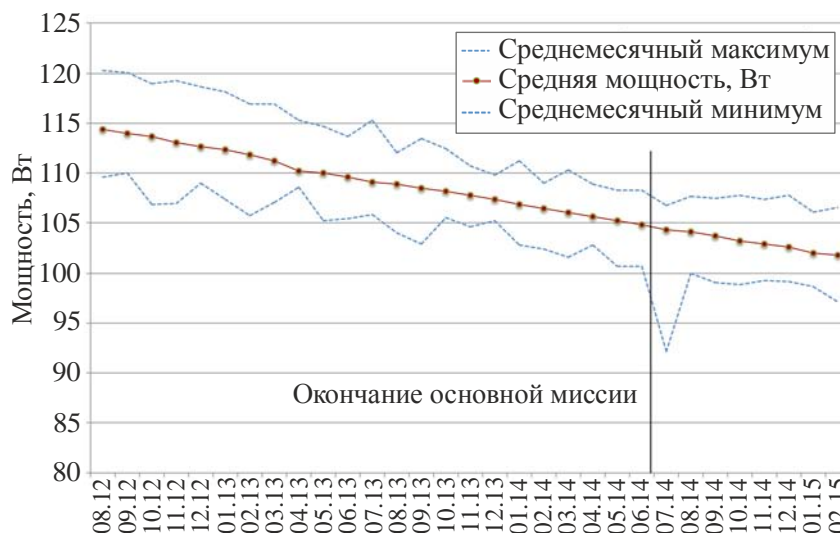


Рис. 6. Среднемесячный минимальный, максимальный и средний выход мощности многоцелевого РИТЭГ, питающего марсоход Curiosity. (даты следует читать как месяц-20xx)

Марсианские ветры и их влияние на температуры РИТЭГ

Изменения температуры атмосферы не являются главной причиной изменений выхода мощности многоцелевого РИТЭГ на марсоходе Curiosity, но они могут быть значительными. Они могут сделать выход мощности особенно непостоянным, когда за ежедневным охлаждением ближе к закату следуют «свободные от пыли» пыльные дьяволы, как на 37 марсианские сутки [6, 7], или кatabатические ветры [8, 9]. Кроме того, тепловые приливы и отливы – гравитационные волны планетарного масштаба с периодами, которые представляют собой гармоники солнечного дня, вызваны взаимодействием атмосферы на освещенной стороне планеты с солнечным излучением [9] и усиливаются топографией Кратера Гейла [7].

Бортовая станция наблюдения за окружающей средой (REMS) на Марсианской научной лаборатории имеет датчики, регистрирующие температуру воздуха и земли, локальное атмосферное давление, относительную влажность, скорость ветра, а также интенсивность ультрафиолетового излучения в диапазоне от 280 до 400 нм. Начиная с 9 марсианских суток, после приземления, REMS ежедневно собирала данные от всех датчиков одновременно почти [9]. На рис. 7 представлен график данных от одного из датчиков температуры многоцелевого РИТЭГ, на котором четко прослеживается типичное влияние ветров на прибор REMS вскоре после заката.

Обведенный кружком сегмент кривой соответствует ситуации, когда кatabатические ветры обдувают многоцелевой РИТЭГ и быстро снижают среднюю температуру ребер. Затем ветры стихают, и температура ребер быстро поднимается до номинального значения. На оси x указано местное марсианское время.

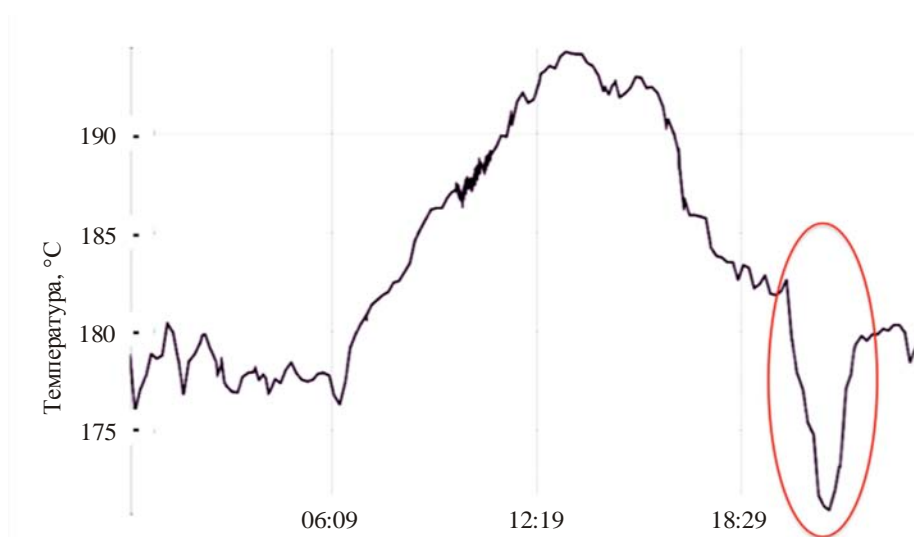


Рис. 7. График температуры ребер многоцелевого РИТЭГ в течение одних марсианских суток, сол 87; самая жаркая часть марсианских суток – ближе к полудню.

Тепловой купол над многоцелевым радиоизотопным термоэлектрическим генератором

Многоцелевой РИТЭГ монтируется между двумя почти вертикальными теплообменниками (рис. 1), которые служат точками крепления ветрозащитного экрана. Противоположный конец многоцелевого РИТЭГ находится на присоединительной поверхности марсохода. Боковые стороны многоцелевого РИТЭГ, обращенные к Солнцу и Земле, не защищены.

Многоцелевой РИТЭГ постоянно отводит примерно 1900 Вт тепла. Часть его улавливается марсоходом для поддержания электроники в пределах температур, допустимых для полета. Остальное тепло так или иначе рассеивается в атмосфере или на поверхности Марса. До запуска было сделано предположение о тепловом гейзере или куполе [10], марсианская атмосфера будет нагреваться отходами тепла многоцелевого РИТЭГ и подниматься над марсоходом, создавая плавучий купол. На рис. 7 показано, что для сол 87 ветра почти не было; эта же картина наблюдалась для большинства сол.

Купол может служить «пылезащитным экраном» для моноцелевого РИТЭГ и хвостовых частей марсохода, предотвращая попадание пыли из атмосферы Марса на многоцелевой РИТЭГ. Серия снимков «селфи», сделанных с помощью камеры, установленной на руке марсохода, показывает, как с течением времени на переднем конце марсохода накапливаются почва и пыль. Часть этого материала осаждалась на марсоходе в результате выполнения манипуляций с образцами, и увеличилась после первого года пребывания на Марсе. Манипуляция с образцами происходит на переднем конце марсохода при помощи установленной там «руки», и неизбежно часть материала из многочисленных образцов просыпалась на марсоход при попытке опустить образцы в небольшие отверстия, ведущие к некоторым приборам. Однако это не единственная причина появления пыли – часть ее явно выпадает из атмосферы. На рис. 8 показана пыль, накопившаяся со временем в хвостовой части марсохода на значительном удалении от оборудования для обслуживания образцов. Кроме того, многоцелевой РИТЭГ оказался почти свободен от пыли спустя примерно 2.5 года работы на Марсе. Что-то защищает многоцелевой РИТЭГ и ближайшее оборудование от пыли. По всей вероятности – купол отработанного тепла от генератора.

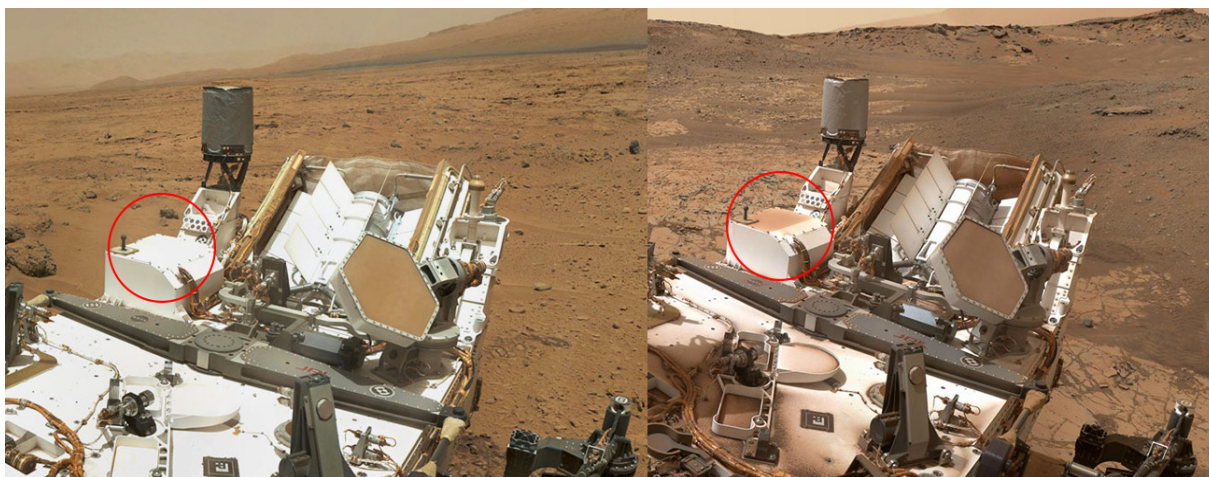


Рис. 8. Сравнение накопившейся пыли. Пыль, накопившаяся в хвостовой части марсохода, которая не была осаждена в результате манипуляции с образцами.

Изображение слева получено в октябре 2012, а изображение справа – в феврале 2015. Отмеченная кругом горизонтальная область справа четко демонстрирует накопление пыли за прошедшие годы по сравнению с отмеченной кругом областью слева.

Продолжительный полет

В рамках проекта Марсианской научной лаборатории планирование продолжительного полета началось в 2013 году с таким расчетом, что если марсоход будет исправным в конце 2014 года, НАСА, вполне вероятно, выделит средства на продолжительный полет. Планирование частично включало моделирование распределения энергии для научных исследований. График оценок, используемых при планировании, приведен на рис. 9.

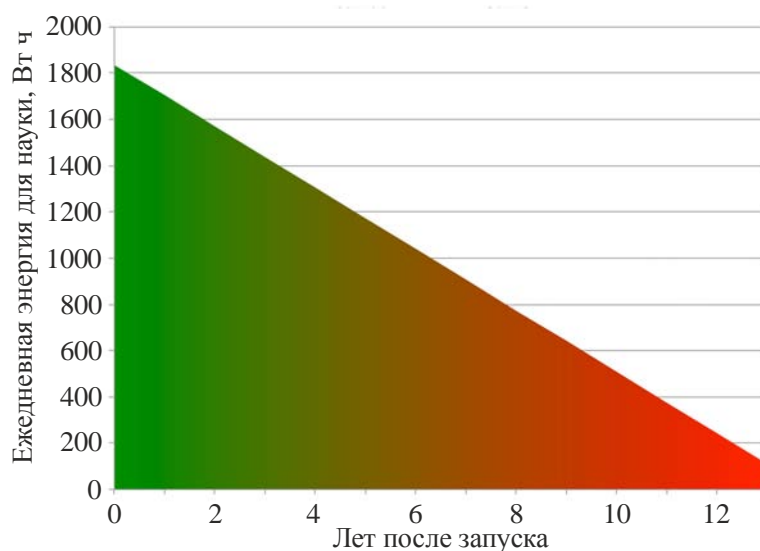


Рис. 9. Долгосрочная энергетическая оценка.

Предполагалось, что миссия Марсианской научной лаборатории использует многоцелевой РИТЭГ для зарядки батарей, которые затем применяются для проведения операций, потребляющих достаточно большое количество электрической энергии. На данном

графике показано, какой энергией от батарей можно располагать со временем для проведения научных исследований с учетом минимальных потребностей затрат энергии на технические подсистемы марсохода. Из зеленого сектора графика видно, что энергии должно быть достаточно для проведения всех предусмотренных научных экспериментов. Переход к красному сектору соответствует периоду времени, когда научные эксперименты вероятнее всего будут ограничены.

Нарушение изоляции силовой цепи многоцелевого радиоизотопного термоэлектрического генератора

В марсоходе Curiosity применяется «плавающая» силовая шина, изолированная от шасси марсохода двумя резисторами 5 кОм (рис. 10). Силовые кабели многоцелевого РИТЭГ соединены с двумя вторичными батареями и отделены от шасси марсохода двумя резисторами 5 кОм. Выход от многоцелевого РИТЭГ и батарей используется для питания нагрузок марсохода или шунтируется на резисторы. В нижнем правом углу на рис. 10 показана часть схемы, соответствующая возможному возникновению коротких замыканий пиротехнической системы, которые ограничили возврат силовой шины марсохода к шасси. Число коротких замыканий неизвестно, но их общее сопротивление по расчетам составляет 6 кОм; эти замыкания возникли до посадки на Марс.

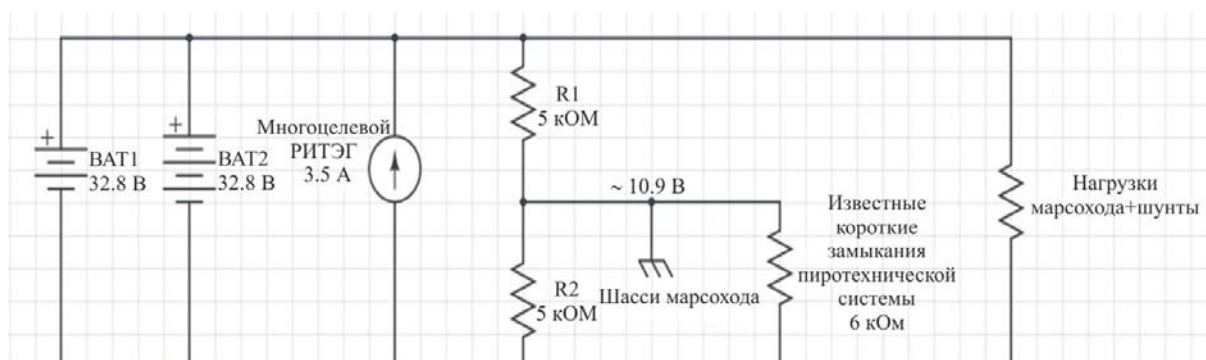


Рис. 10. Силовая шина Curiosity. На схеме изображена плавающая силовая шина, используемая на марсоходе Curiosity. (Применяемые сокращения: батарея 1 (BAT1), батарея 2 (BAT2), многоцелевой РИТЭГ, сопротивление 1 (R1) и сопротивление 2 (R2).)

При использовании плавающей силовой шины марсохода, космический летательный аппарат получает допуск на единичный отказ силовой шины. При возникновении короткого замыкания в нагрузке марсохода, и это замыкание соединяет силовую шину с шасси, то работа марсохода в конечном итоге не прекратится. Научные операции могут быть на время остановлены, пока инженеры проанализируют телеметрию марсохода, но оборудование будет продолжать функционировать нормально и при наличии такого замыкания.

17 ноября 2013 года система защиты от неисправностей марсохода остановила научные операции [11] и направила сигнал тревоги операционной группе в Пасадене, Калифорния. Сигнал тревоги поступил с телеметрической информацией, указавшей причину для остановки научных операций. Изоляция силовой шины от шасси существенно изменилась; она периодически появлялась и исчезала в течение нескольких марсианских суток. 20 ноября 2013 года НАСА выпустила пресс-релиз с описанием ситуации [11]. Кроме того, группа экспертов

проанализировала все данные космического летательного аппарата и разработала граф возможных отказов. Они тщательно проанализировали каждый отказ, пока не определили наиболее вероятный. Наиболее вероятной причиной отказа оказалась внутреннее короткое замыкание между силовой цепью многоцелевого РИТЭГ и его корпусом. Такое поведение наблюдалось во время наземных испытаний макета многоцелевого РИТЭГ. Кроме того, такие ситуации были замечены в других РИТЭГ, включая РИТЭГ для питания космических аппаратов Кассини и Вояджер.

Однако негативных последствий этих коротких замыканий не было установлено. Можно только отметить, что если бы они стали постоянными, то могли бы уменьшить или устранить допуск на единичный отказ, предусмотренный в конструкции летательного аппарата. В ходе предыдущих испытаний макетов и анализа критических ситуаций в полете в ходе выполнения других миссий, короткие замыкания представляли собой незначительные и временные досадные помехи. Действительно, через неделю после выявления отказа на марсоходе Curiosity, отказ был устранен, и изоляция силовой шины вернулась к своему номинальному уровню.

Аналогичное короткое замыкание повторилось примерно через год. На этот раз научные операции не были остановлены. Данные были проанализированы и был задействован план, предусматриваемый возможность намеренного устранения отказа в случае необходимости. Отказ не был устранен за короткий срок и команда марсохода принялась бурить близлежащую скалу. Силовая цепь бура включала “battle short” (боевое замыкание), которое могло включаться и выключаться наземной командой, и которое блокировало возврат силовой шины к шасси марсохода, шунтируя тем самым изолирующие резисторы. Боевое замыкание встраивалось в марсоход для нейтрализации конкретного сбоя питания бура, но теперь, когда многоцелевой РИТЭГ испытывал дефекты изоляции, разработчики миссии решили, что активация боевого замыкания во время короткого замыкания изоляции многоцелевого РИТЭГ может предотвратить его расплавление.

Диагностика отказов в ходе наземных испытаний нарушения изоляции многоцелевого РИТЭГ и анализ нарушений изоляции во время других космических полетов показали, что короткие замыкания довольно кратки и вызваны расплавлением неметаллических материалов, плавящихся под действием достаточно больших токов. При повторном появлении этого дефекта многоцелевого РИТЭГ, операционная команда марсохода решила предпринять попытку «взорвать» замыкание. Они активировали боевое замыкание, и через 1.5 секунды короткое замыкание изоляции многоцелевого РИТЭГ было устранено. Буровые работы марсохода возобновились практически немедленно, и короткое замыкание с тех пор не повторялось.

Аналогичные схемы предусматриваются сейчас в оборудовании наземного обеспечения, используемого для работы многоцелевых РИТЭГ во время ресурсных испытаний. Это позволит получить подробную информацию о коротких замыканиях в них, если таковые возникнут [12].

Выводы

Многоцелевой РИТЭГ на марсоходе Curiosity по-прежнему функционирует и превосходит прогнозы по выходу мощности и тепла. Внутренние замыкания случаются редко, скорее выглядят досадными помехами, а не событиями с высоким уровнем риска. Программа продолжительного полета марсохода Curiosity была утверждена в сентябре 2014 и аппарат выполняет ее уже в течение нескольких месяцев.

Благодарность

Исследование, описанное в данной публикации, выполнено в Лаборатории реактивного движения (Калифорнийский технологический институт) благодаря контракту с НАСА.

Конкретное коммерческое изделие, технология или услуга в виде фирменного наименования, торговой марки, производителя или иным образом упомянутое в данной работе не представляет собой и не подразумевает его поддержку со стороны правительства Соединенных Штатов или Лаборатории реактивного движения Калифорнийского технологического института.

Литература

1. D.Woerner, Use of an MMRTG for the 2009 Mars Science Laboratory Mission, *American Geophysical Union, Fall Meeting 2005*, abstract #P54A-02.
2. M.Wall, Touchdown! Huge NASA Rover Lands on Mars, *Space.com*, August 6, 2012. <http://www.space.com/16932-mars-rover-curiosity-landing-success.html> (accessed April 13, 2015)
3. *Mars Science Laboratory Curiosity Rover*, web page, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California, periodic updates. <http://mars.jpl.nasa.gov/msl/mission/timeline/firstdrive/> (accessed April 13, 2015)
4. *Mars Science Laboratory Curiosity Rover*, web page, “NASA's Mars Curiosity Rover Marks First Martian Year with Mission Successes,” Jet propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA, June 23, 2014 <http://mars.nasa.gov/msl/news/whatsnew/index.cfm?FuseAction=ShowNews&NewsID=1653> (accessed April 20, 2015)
5. D.Woerner, V.Moreno, L. Jones, R. Zimmerman, and E.Wood, “The Mars Science Laboratory (MSL) MMRTG In-Flight: A Power Update, *Nuclear and Emerging Technologies for Space (NETS 2013)*, *American Nuclear Society*, 2013.
6. H.Kahanpää, M. de la Torre Juárez, J.Moores, N.Rennó, S.Navarro, R.Haberle, M-P.Zorzano, J.Martín Torres, J.Verdasca., A.Lepinette, J.A.Rodríguez-Manfredi, and J.Gomez-Elvira, The REMS Team and the MSL Science Team, Convective Vortices at the MSL Landing Site, *Fifth International Workshop on the Mars Atmosphere: Modeling and Observations*, Oxford, United Kingdom, January 13–16, 2014.
7. M.A.Mischna, J.Gómez-Elvira, C.Armiens, I.Carrasco, M. Genzer, F.Gómez, R. Haberle, V.E.Hamilton, A.-M. Harri, H.Kahanpää, O.Kemppinen, A. Lepinette, J.Martín Soler, J. Martín-Torres, J.Martínez-Frías, L.Mora, S.Navarro, C.Newman, M.A.de Pablo, V.Peinado, J.Polkko, S.C.R. Rafkin, M. Ramos, N.O. Rennó, M.Richardson, J.A. Rodríguez-Manfredi, J.J.Romeral Planelló, E. Sebastián, M.de la Torre Juárez, J.Torres, R.Urquí1, A.R.Vasavada, J.Verdasca, M-P.Zorzano, and the MSL Science Team, Results from the Rover Environmental Monitoring Station (REMS) on Board the Mars Science Laboratory, *Fifth International Workshop on the Mars Atmosphere: Modeling and Observations*, Oxford, United Kingdom, January 13–16, 2014. http://www-mars.lmd.jussieu.fr/oxford2014/abstracts/mischna_rems_oxford2014.pdf (accessed April 14, 2015)
8. F.J.Martín-Torres, M.-P. Zorzano, C.Armiens, I.Carrasco, A. Delgado-Bonal, M.Genzer, F.Gómez, J.Gómez-Elvira, R.Haberle, V.E.Hamilton, A.-M. Harri, H.Kahanpää, O.Kemppinen, M.T.Lemmon, A. Lepinette, J.Martín Soler, J.Martínez-Frías, M.Mischna, L.Mora, S.Navarro, C. Newman, M.A.de Pablo, J.Pla-García, V.Peinado, J.Polkko, S.C.R. Rafkin, M.Ramos, N.O.Rennó, M.Richardson, J.A.Rodríguez-Manfredi, J.J.Romeral Planelló, E.Sebastián, M. de la Torre Juárez,

- J.Torres, A.Ullán, R.Urquí1, P.Valentín-Serrano, A.R.Vasavada, and the MSL Science Team, Highlights from the Rover Environmental Monitoring Station (REMS) on Board the Mars Science Laboratory: New Windows for Atmospheric Research on Mars, *Fifth International Workshop on the Mars Atmosphere: Modeling and Observations*, Oxford, United Kingdom, January 13–16, 2014.
9. J.Gómez-Elvira, C.Armiens, L.Castañer, M.Domínguez, M.Genzer, F.Gómez , R.Haberle, A.-M.Harri, V.Jiménez, H.Kahanpää, L.Kowalski, A.Lepinette, J.Martín,, J.Martínez-Frías, I.McEwan, L. Mora, J.Moreno, S.Navarro, M.A.de Pablo, V.Peinado, A.Peña, J. Polkko, M.Ramos, N.O.Renno, J.Ricart, M.Richardson, J.Rodríguez-Manfredi, J. Romeral, E. Sebastián, J.Serrano, M. de la Torre Juárez, J.Torres, F. Torrero, R.Urquí, L.Vázquez, T. Velasco, J.Verdasca, M.-P.Zorzano, and J.Martín-Torres, REMS: The Environmental Sensor Suite for the Mars Science Laboratory Rover, *Space Science Reviews*, volume 170, Issue 1-4, pages 583–640, September 2012. <http://link.springer.com/journal/11214> (accessed April 13, 2015)
 - 10.P.Bhandari and K.Anderson, CFD Analysis for Assessing The Effect Of Wind on the Thermal Control of the Mars Science Laboratory Curiosity Rover, *43rd International Conference on Environmental Systems*, The American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2013. <http://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2013-3325> (accessed April 13, 2015)
 - 11.“Curiosity’s Recent Bad Month on Mars – Science Operations Halted Again by Electrical Issue,” *Spaceflight Insider*, November 23, 2013. <http://www.spaceflightinsider.com/missions/curiositys-recent-bad-month-on-mars-science-operations-halted-again-by-electrical-issue/> (accessed April 13, 2015)
 - 12.G.Bolotin and N.Keyawa, Active Short Circuit - Chassis Short Characterization and Potential Mitigation Technique for the MMRTG, *Proceedings of the 2015 Nuclear and Emerging Technologies for Space Conference*, February 23–26, 2015, Albuquerque, New Mexico, United States of America.

Поступила в редакцию 05.03.2015.