

УДК 629.7.064.54



Ворнер Д.Ф.

Лабораторія реактивного руху, Каліфорнійський
технологічний інститут, Оук Гроув Драйв,
м. Пасадена, 4800, Каліфорнія, 91109, США

Ворнер Д.Ф.

ЩЕ ОДИН МОДИФІКОВАНИЙ ВАРІАНТ БАГАТОЦІЛЬОВОГО РАДІОІЗОТОПНОГО ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ГЕНЕРАТОРА, ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЄ ЖИВЛЕННЯМ МАРСОХІД CURIOSITY

Багатоцільовий радіоізотопний термоелектричний генератор (РІТЕГ) для Марсіанської наукової лабораторії розроблений Міністерством енергетики для НАСА й заправлений паливом 28 жовтня 2008 для підготовки до запуску наприкінці 2009 року. Після запуску корабель із Марсіанською науковою лабораторією забезпечив високоякісний телеметричний потік з вимірюванням електричних і теплових характеристик генератора. Ці дані було використано для відновлення прогнозних моделей і новий прогноз характеристик багатофункціонального РІТЕГ на поверхні Марса був зроблений перед входом в атмосферу, спуском і посадкою на Марсі. Після приземлення багатоцільовий РІТЕГ, що живить Curiosity, показав відмінну роботу, забезпечуючи живлення понад прогнозоване й працюючи в допустимих температурних межах. Генератор виробляв приблизно 114 Вт на початку виконання місії на поверхні упродовж майже двох земних років або одного марсіанського року. У доповіді ми докладно зупинимось на характеристиках багатоцільового РІТЕГ у ході виконання основної місії й початкових місяців першого тривалого польоту, а також розглянемо питання, які вплинули на характеристики багатоцільового РІТЕГ.

Ключові слова: радіоізотопний термоелектричний генератор, вихідна потужність, енергетичний 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) and fueled on October 28, 2008 in preparation for a late 2009 launch. 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.

Вступ

Міністерством енергетики Сполучених Штатів розроблено багатоцільовий радіоізотопний термоелектричний генератор (багатоцільовий РІТЕГ) для Національного управління з аеронавтики і дослідження космічного простору (НАСА) [1]. Генератор було задумано як багатоцільове джерело живлення для підтримки польотів до таких різнопланових місць призначення в сонячній системі, як Європа, Титан, Місяць та інші. Це високонадійна, довговічна, стійка радіоізотопна система живлення. Багатоцільовий РІТЕГ може приземлятися на інші корпуси, працювати у вакуумі або атмосфері, забезпечувати безшумне живлення й літати на сертифікованих ракетах НАСА.

Марсіанську наукову лабораторію було обрано, як першу місію для застосування багатоцільового РІТЕГ. Генератор зараз перебуває біля Кратера Гейла на Марсі, забезпечуючи живлення й нагрівання марсохода Curiosity. Марсохід показано на рис.1. Багатоцільовий РІТЕГ забезпечує живлення для зарядки батарей марсохода, і коли вчені вибирають експерименти, марсохід використовує батареї для проведення наукових експериментів, надавання руху корабля й виконання інших дій, що споживають великий струм. Одночасно інфрачервоне тепло від багатоцільового РІТЕГ уловлюється двома теплообмінниками, що оточують багатоцільовий РІТЕГ. Потім тепло циркулює до боксу з електронною апаратурою для підтримки електронних приладів в експлуатаційних межах.

Ключові дати включають: посадку 6 серпня 2012 [2]; перший рух 22 серпня 2012 [3]; закінчення основної місії 24 червня 2014 [4].

Вигляд великим планом багатоцільового радіоізотопного термоелектричного генератора подано на рис. 2.

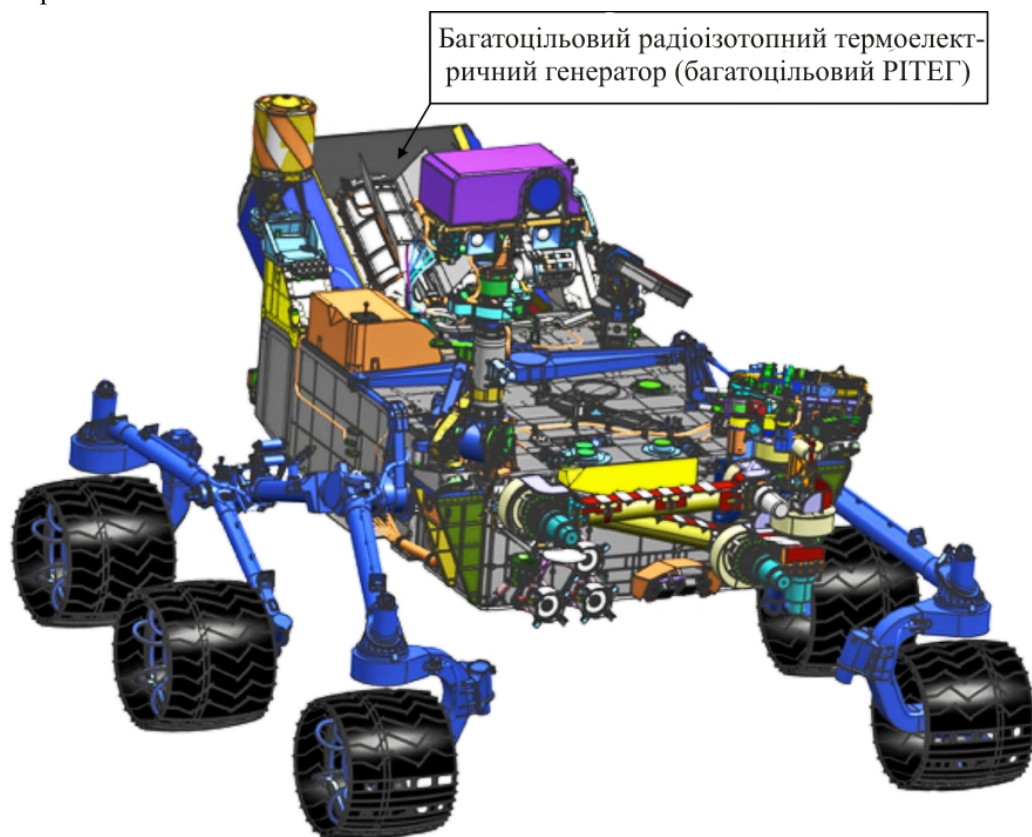


Рис. 1. Конфігурація марсохода після приземлення. Марсохід Curiosity з встановленим у хвостовій частині багатоцільовим РІТЕГ.



Рис. 2. Багатоцільовий РІТЕГ на Марсі. Цей знімок зроблений на 24 марсіанську добу.

У цій статті описано робочі характеристики багатоцільового РІТЕГ і прогнози його роботи, починаючи з підготовки до пуску до початку першого тривалого польоту, поряд з обговоренням декількох подій і явищ, що вплинули на його роботу.

Передпускові прогнози

Комплекс прогнозів потужності із застосуванням консервативних припущень старіння й руйнування був підготовлений за кілька місяців до запуску у червні 2011 року. Було три прогнози від трьох унікальних моделей, побудованих спільно, і задано невизначеність (див. рис. 3) [5]. Проект Марсіанська наукова лабораторія був інформований про ці прогнози та пов'язані з ними невизначеності. Керівники проекту Марсіанська наукова лабораторія вирішили перепланувати політ з посадкою на поверхню, використовуючи переглянуті прогнози плюс невизначеність. Прогнози потужності плюс невизначеність означали, що батарея буде заряджатися трохи повільніше і тому деякі наукові дії потребуватимуть більше часу, а деякі будуть виключені. Перепланований політ як і раніше відповідатиме вимогам НАСА.

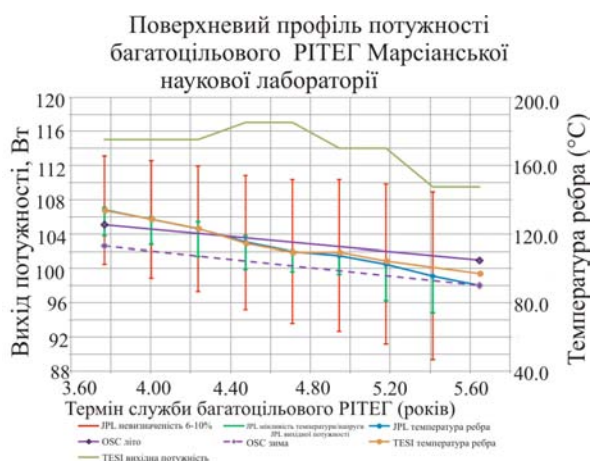


Рис. 3. Передпускові прогнози потужності. Прогноз потужності багатоцільового РІТЕГ, зроблений Лабораторією реактивного руху (JPL) у ході програми Марсіанської наукової лабораторії польоту з посадкою на поверхню, включаючи невизначеність 6% на початку виконання польоту й 10% наприкінці польоту. Наведено також дані Orbital Sciences Corporation (OSC)/Analytix і Teledyne Energy Systems Inc. (TESI).

Посадка

Згідно із прогнозами температура багатоцільового РІТЕГ почала швидко рости незадовго до входу в атмосферу й до посадки. Це було викликано відводом рідини для охолодження багатоцільового РІТЕГ. Рідина циркулювала до маршового щабля, де тепло від рідини виводилось за борт. Для польоту апарата, розрахованого на вхід у марсіанську атмосферу, проводилося скидання маршового щабля, і рідина відводилась у космос. Майже одночасно з відводом рідини сегмент силової шини, що з'єднує апарат з маршовим щаблем, відкривався або задраювався, щоб у випадку коли ніж вибухового болта відтинає дроти силової шини, короткі замикання не впливали на технічні характеристики апарата. На рис.4 зображено основні секції космічного літального апарата Марсіанської наукової лабораторії до входу в атмосферу Марса.

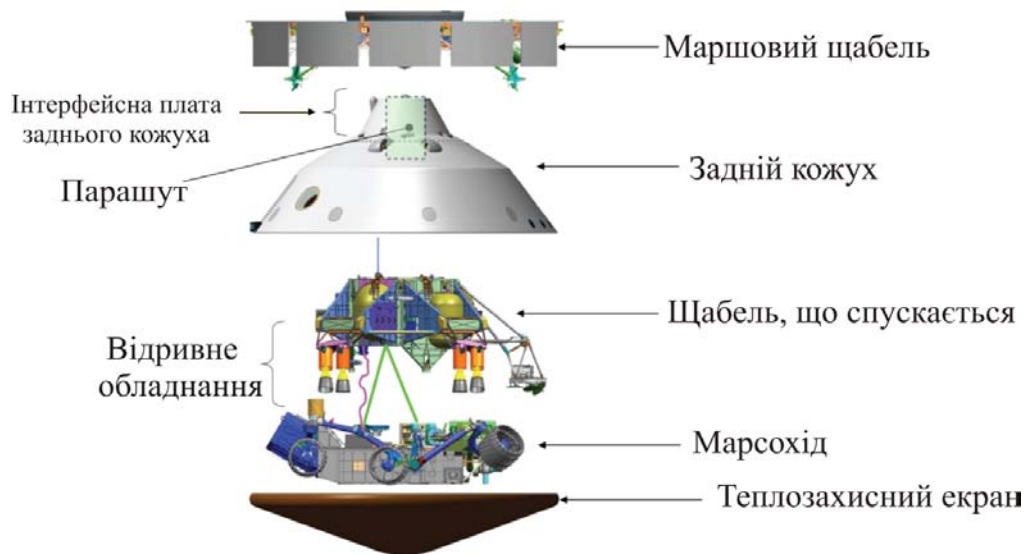


Рис 4. Космічний літальний апарат Марсіанської наукової лабораторії в розібраному вигляді, де показано сполучення основних елементів космічного літального апарата.

Після задраювання силової шини напруга силової шини падала до ~ 31 В [5]. Ця зміна напруги також зміщувала на новий рівень робочу криву потужності багатоцільового РІТЕГ, але тенденція до зниження вихідної потужності зберігалася постійно, за винятком декількох незначних перехідних процесів. Тобто, примусове охолодження багатоцільового РІТЕГ припинялося і він був, як і раніше, захищений від прямої взаємодії з атмосферою усередині космічного літального апарата, тому температури його ребер швидко зростали. Підвищення температури ребер викликало падіння ΔT від гарячого спаю до холодного, що призвело до зниження потужності багатоцільового РІТЕГ. Зниження вихідної потужності відбувалося до відділення теплового захисту, а згодом вплив проявляв атмосферний вітер. Під час відділення теплового захисту вихідна потужність багатоцільового РІТЕГ почала відновлюватися. Було помічено сповільнення швидкості росту температур багатоцільового РІТЕГ. Вихідна потужність повільно відновлювалася, поки не досягла нового стаціонарного стану приблизно за 114 Вт через 5 годин після відводу охолодженої рідини. Це реальне значення 114 Вт, що встановилося, порівнянно з прогнозованим 106.3 Вт.

Вихідна потужність під час виконання основної місії

Середньомісячна вихідна потужність і температура відображена на графіку рис. 5. Середньомісячна вихідна потужність стабільно знижувалася, відображаючи середню швидкість зниження $\sim 4.8\%$ у рік із часу приземлення. Це і розпадання палива, і зниження коефіцієнта

Карно. На рисунку показано також, що середні температури залишалися у діапазоні 7°C, демонструючи спад температури генератора із часом - ще одна вказівка на розпад палива з часом. На рис.6 наведено графік середньомісячних вимірів вихідної потужності між максимумом і мінімумом. Потужність змінюється між мінімумом і максимумом щодня й щомісяця з кількох причин. Найбільші щоденні зміни вихідної потужності викликані змінами напруги навантаження силової шини марсохода, коливаннями температури атмосфери, і щоденним сходом та заходом сонця, що нагріває багатоцільовий РІТЕГ.

Однак з рис.5 видно, що зміна середніх температур не може служити домінуючою причиною змін вихідної потужності. Головним джерелом змін вихідної потужності є зміни напруги силової шини; ці зміни навантаження відбуваються щодня, коли марсохід прокидається зранку і використовує батарею протягом дня, а потім приводиться в режим сну, коли багатоцільовий РІТЕГ перезаряджає батарею для виконання операцій наступного дня.

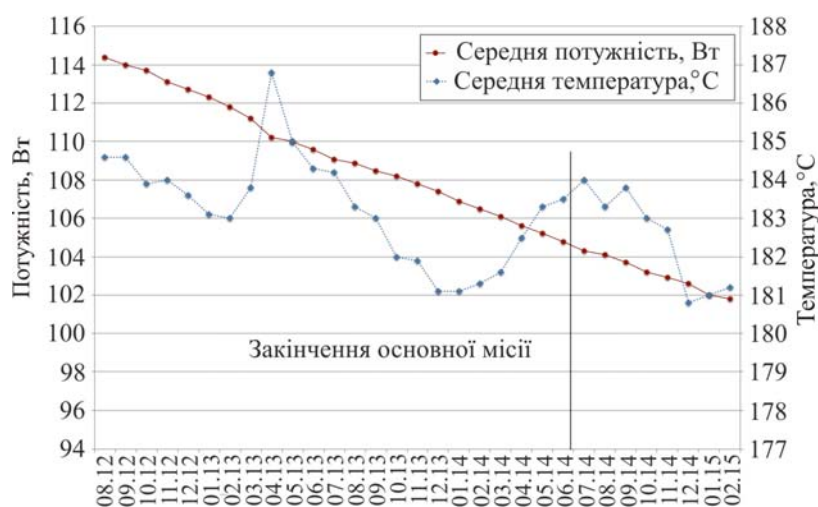


Рис. 5. Потужність і температура багатоцільового РІТЕГ. Подано графіки середньомісячного виходу потужності (ліва вісь) і середньомісячних температур (права вісь) для датчика температури, що використовувався для оцінки температури ребер багатоцільового РІТЕГ на марсоході Curiosity. Дати слід читати як місяць-20-хх.

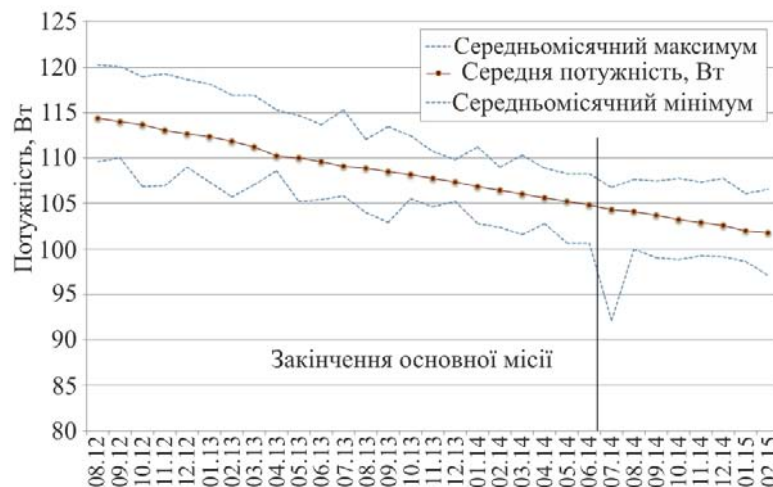


Рис. 6. Вихід потужності багатоцільового РІТЕГ. Середньомісячний мінімальний, максимальний і середній вихід потужності багатоцільового РІТЕГ, що живе на марсоході Curiosity. Дати слід читати як місяць-20-хх.

Марсіанські вітри та їх вплив на температури багатоцільового радіоізотопного термоелектричного генератора

Зміни температури повітря не є головною причиною змін виходу потужності багатоцільового РІТЕГ на марсоході Curiosity, але вони можуть бути значними. Температури повітря можуть зробити вихід потужності особливо непостійним, коли за щоденним охолодженням ближче до заходу слідує «вільні від пилу» пильові дияволи, як на 37 марсіанську добу [6, 7], або катабатичні вітри [8, 9]. Крім того, теплові припливи й відливи – гравітаційні хвилі планетарного масштабу з періодами, які являють собою гармоніки сонячного дня, викликані взаємодією атмосфери на освітленій стороні планети із сонячним випромінюванням [9] і підсилюються топографією кратера Гейла [7].

Бортова станція спостереження за навколишнім середовищем (REMS) на Марсіанській науковій лабораторії має датчики, що реєструють температуру повітря й землі, локальний атмосферний тиск, відносну вологість, швидкість вітру, а також ультрафіолетове випромінювання в різних діапазонах (від 280 до 400 нм). Починаючи з 9 марсіанської доби після приземлення, REMS збирала дані від усіх датчиків одночасно майже щодня [9]. На рис.7 подано графік даних від одного з датчиків температури багатоцільового РІТЕГ, на якому чітко прослідковується типовий вплив катабатичних вітрів на прилад REMS незабаром після заходу.

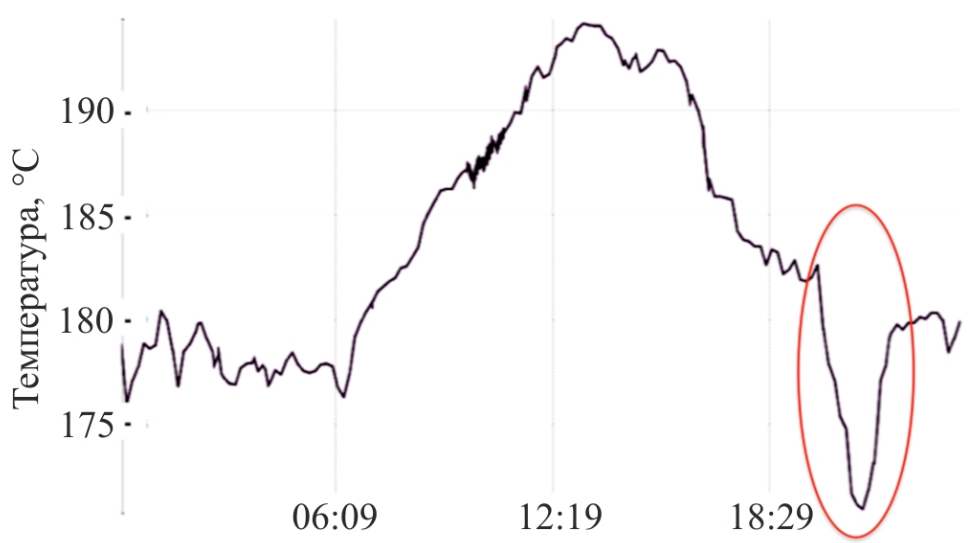


Рис 7. Добові коливання температури. Поданий графік температур ребер багатоцільового РІТЕГ упродовж однієї марсіанської доби, сол 87; найжаркіша частина марсіанської доби – ближче до полудня. Обведений кружком сегмент кривої показує, коли катабатичні вітри обдувають багатоцільовий РІТЕГ і швидко знижують середню температуру ребер. Потім вітри стихають і температура ребер швидко піднімається до номінального значення. На осі x зазначено місцевий марсіанський час.

Тепловий купол над багатоцільовим радіоізотопним термоелектричним генератором

Багатоцільовий РІТЕГ монтується між двома майже вертикальними теплообмінниками (рис.1), які служать точками кріплення вітрозахисного екрана. Протилежний кінець

багатоцільового РІТЕГ перебуває на приєднувальній поверхні марсохода. Бічні сторони багатоцільового РІТЕГ, повернуті до Сонця й Землі, не захищені.

Багатоцільовий РІТЕГ постійно відводить приблизно 1900 Вт тепла. Частина цього тепла вловлюється марсоходом для підтримки електроніки в межах температур, допустимих для польоту. Решта тепла так чи інакше потрапляє в атмосферу або на поверхню Марса. До запуску було зроблено припущення про тепловий гейзер або купол [10], марсіанська атмосфера буде нагріватися відходами тепла багатоцільового РІТЕГ і підніматися над марсоходом, створюючи плавучий купол. На рис.7 показано, що для сол 87 вітру майже не було; ця картина спостерігалася для більшості сол.

Купол може служити «пилозахисним екраном» для багатоцільового РІТЕГ і хвостових частин марсохода, запобігаючи потраплянню пилу з атмосфери Марса на багатоцільовий РІТЕГ. Серія знімків «селфі», зроблених за допомогою камери, встановленої на руці марсохода, показують, як із часом на передньому кінці марсохода накопичуються ґрунт і пил. Частина цього матеріалу осаджувалася на марсоході в результаті виконання маніпуляцій зі зразками, і збільшилася за перший рік на Марсі. Маніпуляція зі зразками відбувається на передньому кінці марсоходу за допомогою встановленої там руки, і неминуче частина матеріалу із численних зразків просипалася на марсохід при спробі помістити зразки в невеликі отвори, що ведуть до деяких приладів. Однак це не пояснює наявності усього матеріалу, тому що частина його явно випадає з атмосфери. На рис. 8 показано пил, що нагромадився згодом у хвостовій частині марсохода на значному віддаленні від устаткування для обслуговування зразків. Крім того, багатоцільовий РІТЕГ виявився майже вільний від пилу приблизно через 2,5 року роботи на Марсі. Щось захищає багатоцільовий РІТЕГ та найближче устаткування від пилу, цілком ймовірно, що це купол відпрацьованого тепла від генератора.

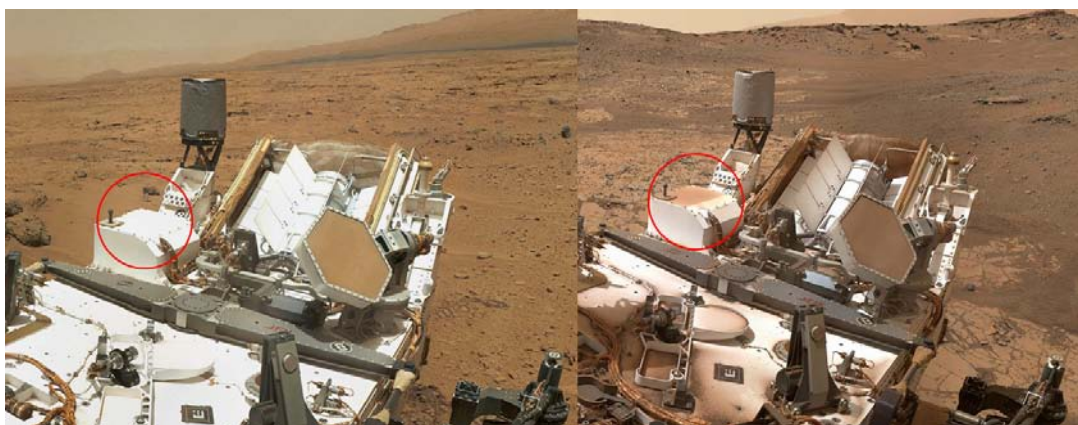


Рис. 8. Порівняння нагромадженню пилу. Пил, що нагромадився у хвостовій частині марсохода, що не була осаджена в результаті маніпуляції зі зразками. Зображення ліворуч отримано в жовтні 2012, а зображення праворуч – у лютому 2015.

Позначена колом горизонтальна область праворуч чітко демонструє нагромадження пилу за минулі роки в порівнянні з позначеною колом областю ліворуч.

ТРИВАЛИЙ ПОЛІТ (ОГЛЯД)

У рамках проекту Марсіанської наукової лабораторії планування тривалого польоту почалося 2013 року з таким розрахунками, що у випадку, коли марсохід буде справним наприкінці 2014 року, НАСА, цілком ймовірно, виділить кошти на тривалий політ. Частина

планування включала моделювання наявної енергії для науки. На рис.9 подано графік оцінок, використаних з метою планування.

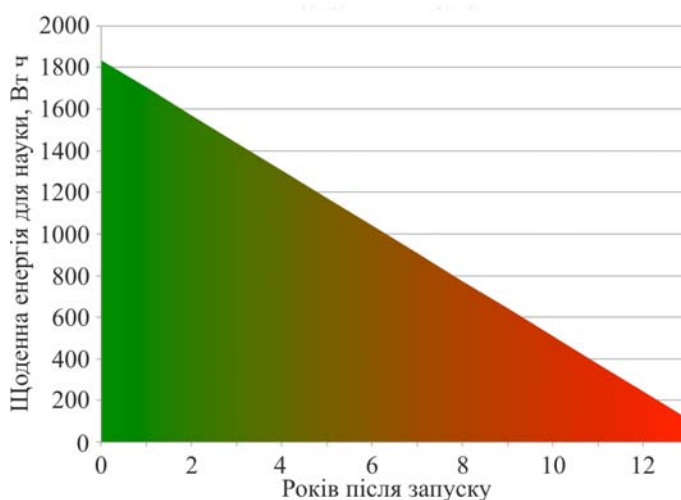


Рис. 9. Довгострокова енергетична оцінка. Місія Марсіанської наукової лабораторії використовує багатоцільовий РІТЕГ для зарядки батарей, які потім застосовуються для проведення операцій, що споживають значний струм. На даному графіку показано, яку енергію від батарей можна мати у розпорядженні згодом для науки після врахування мінімальних потреб енергії на технічні підсистеми марсохода. Із зеленого сектора графіка видно, що енергії повинно бути досить для проведення всіх передбачених наукових експериментів. Перехід до червоного сектора показує, що наукові експерименти найімовірніше будуть обмежені в цих часових рамках.

Ризики: порушення ізоляції силового кола багатоцільового радіоізотопного термоелектричного генератора

У марсоході Curiosity застосовується «плаваюча» силова шина. Тобто, силова шина ізолювана від шасі марсохода двома резисторами 5 кОм. Таке планування наведено на рис.10. Силкові дроти багатоцільового РІТЕГ з'єднані із двома вторинними батареями й відділені від шасі марсохода двома резисторами 5 кОм. Вихід від багатоцільового РІТЕГ і батарей використовується для живлення навантажень марсохода або шунтується на резистори. У нижньому правому куті на рис. 10 показано відомі короткі замикання піротехнічної системи, які обмежили повернення силової шини марсохода до шасі; число коротких замикань є невідомим, але їх загальний опір за розрахунками становить 6 кОм; ці замикання виникли до посадки на Марсі.

При використанні плаваючої силової шини марсохода космічний літальний апарат одержує допуск на одиничну відмову силової шини. Якщо навантаження марсохода має коротке замикання в джерелі живлення і це замикання з'єднує силову шину із шасі, робота марсоходу в остаточному підсумку не постраждає; наукові операції можуть бути тимчасово зупинені, поки інженери аналізують телеметрію марсохода, але за наявності такого замикання устаткування буде продовжувати функціонувати нормально.

17 листопада 2013 року система захисту від несправностей марсохода зупинила наукові операції [11] і направила сигнал тривоги операційній групі в Пасадені, Каліфорнія. Сигнал

тривоги прийшов з телеметричною інформацією, яка показала, що стало причиною для зупинки наукових операцій. Ізоляція силової шини від шасі суттєво змінилася; вона періодично з'являлася

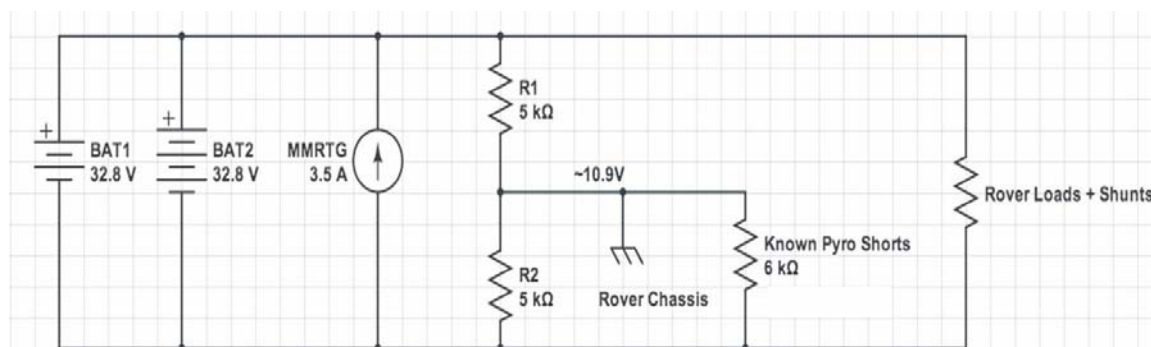


Рис 10. Силова шина Curiosity. На схемі зображено плаваючу силову шину, що використовуються на марсоході Curiosity. (Використані скорочення: батарея 1 (BAT1), батарея 2 (BAT2), багатоцільовий РІТЕГ, опір 1 (R1) і опір 2 (R2)).

й зникла упродовж декількох марсіанських діб. 20 листопада 2013 року НАСА випустила прес-реліз із описом ситуації [11]. Крім того, група експертів проаналізувала всі дані космічного літального апарата й розробила дерево відмов. Експерти ретельно проаналізували кожну відмову на дереві, поки не визначили найбільш імовірну відмову. Також ймовірною відмовою було внутрішнє коротке замикання між силовим колом багатоцільового РІТЕГ і його корпусом. Така поведінка спостерігалася під час наземних випробувань макета багатоцільового РІТЕГ. Крім цього, така поведінка була помічена в інших РІТЕГ, включаючи РІТЕГ для живлення космічних апаратів «Кассіні» та «Вояджер».

Ніякого негативного впливу у результаті цих коротких замикань не було виявлено, можна тільки відзначити, що, якби вони стали постійними, то могли б зменшити або усунути допуск на одиничну відмову, передбачений у конструкції літального апарата, як відзначено вище. У ході попередніх випробувань макетів і критичних ситуацій у польоті під час виконання інших місій короткі замикання являли собою незначні й тимчасові прикрі перешкоди. Справді, через тиждень після виявлення відмови на марсоході Curiosity відмову було усунуто, і ізоляція силової шини повернулася до свого номінального значення. Аналогічне коротке замикання повторилося тільки приблизно через рік.

Цього разу наукові операції не були зупинені. Дані було проаналізовано та задіяний план, щоб спробувати навмисно усунути відмову, якщо буде потреба. Відмову не було усунуто за короткий строк, і команда марсохода взялася бурити прилеглу скелю. Силовий ланцюг бура включав “battle short” (бойове замикання) яке могло включатися й вимикатися наземною командою і яке замикало повернення силової шини до шасі марсохода, шунтуючи тим самим ізолюючі резистори. Бойове замикання вбудовувалося в марсохід для нейтралізації конкретного збою живлення бура, але тепер, коли багатоцільовий РІТЕГ зазнавав дефектів ізоляції, розробники місії вирішили, що активація бойового замикання під час короткого замикання ізоляції багатоцільового РІТЕГ може направити струму достатньо через замикання ізоляції для його розплавлення або усунення.

Діагностика відмов у ході наземних випробувань порушення ізоляції багатоцільового РІТЕГ і аналіз порушень ізоляції під час інших космічних польотів показали, що короткі замикання в розмірному відношенні досить малі та/або складаються з неметалічних матеріалів,

які розплавляються під дією достатнього струму. При збереженні цього другого дефекту багатоцільового РІТЕГ операційна команда марсохода вирішила почати спробу «підірвати» замикання. Вони активували бойове замикання, і через 1.5 секунди коротке замикання ізоляції багатоцільового РІТЕГ було усунуто.

Бурові роботи марсохода відновилися практично негайно, і коротке замикання з того часу не повторювалося. Аналогічні схеми передбачаються зараз в обладнанні наземного забезпечення, що використовується для роботи багатоцільових РІТЕГ під час ресурсних випробувань. Це дасть можливість одержати докладну інформацію про короткі замикання в них, якщо такі виникнуть [12].

Висновки

Багатоцільовий РІТЕГ на марсоході Curiosity, як і раніше, функціонує добре й перевищує прогнози по виходу потужності й тепла. Внутрішні замикання, які трапляються рідко, скоріше виглядають прикрими перешкодами, а не подіями з високим рівнем ризику. Тривалий політ марсохода Curiosity було затверджено у вересні 2014 року, і апарат виконує цей політ уже упродовж декількох місяців.

Подяка

Дослідження, описане у цій публікації, виконано в Лабораторії реактивного руху, (Каліфорнійський технологічний інститут), за контрактом з Національним управлінням з аеронавтики та дослідження космічного простору.

Конкретний комерційний виріб, технологія або послуга у вигляді фірмового найменування, торговельної марки, виробника, або іншим способом згадане в цій роботі, не являє собою й не має на увазі його підтримку з боку уряду Сполучених Штатів або Лабораторії реактивного руху, Каліфорнійський технологічний інститут.

Література

- 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 Juarez, 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. Kempainen, 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. Kempainen, 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.

Надійшла до редакції 05.03.2015