

УДК: 629.78.064.56:621.317.66

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕЛЕМЕТРИИ КОСМИЧЕСКОГО КОРАБЛЯ «ПРОГРЕСС МС»

© 2018 г. Ахмедов М.Р.¹, Бидеев А.Г.¹, Сазонов В.В.², Хамиц И.И.¹

¹Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва (РКК «Энергия») Ул. Ленина, 4А, г. Королёв, Московская обл., Российская Федерация, 141070, e-mail: post@rsce.ru

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (МГУ) Ленинские горы, 1, г. Москва, Российская Федерация, 119991, e-mail: info@rector.msu.ru

Приведено исследование влияния температуры на мощность солнечных батарей, выполненное путем анализа вольт-амперных характеристик фотоэлектрических преобразователей и подтвержденное экспериментально телеметрическими измерениями грузового космического корабля «Прогресс МС». На основе зависимостей электрических параметров преобразователей от температуры построены вольт-амперные характеристики при различной температуре, с помощью которых выяснено, как нагрев влияет на ток, напряжение и мощность солнечных батарей. Определено, что это влияние зависит от способа согласования солнечных батарей с потребителями тока. В космических аппаратах согласование обычно обеспечивается стабилизацией напряжения на солнечных батареях или экстремальным регулированием. Результаты анализа для случая стабилизированного напряжения нашли экспериментальное подтверждение при телеметрических измерениях тока и температуры солнечных батарей космического корабля «Прогресс МС-07», выполнявшего автономный полет с ориентированными на Солнце солнечными батареями. Результаты исследования представляют интерес для разработчиков солнечных батарей и систем электроснабжения космических аппаратов.

Ключевые слова: зависимость мощности солнечных батарей от температуры, моделирование солнечных батарей, вольт-амперная характеристика фотоэлектрического преобразователя.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE TEMPERATURE EFFECT ON THE SOLAR ARRAYS OUTPUT POWER USING TELEMETRY OF PROGRESS MS SPACECRAFT

Akhmedov M.R.¹, Bideev A.G.¹, Sazonov V.V.², Khamits I.I.¹

¹S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia (RSC Energia) 4A Lenin str., Korolev, Moscow region, 141070, Russian Federation, e-mail: post@rsce.ru

²Lomonosov Moscow State University (MSU) 1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation, e-mail: info@rector.msu.ru

The paper presents a study of temperature effect on the power output of solar arrays conducted by means of analyzing the current-voltage curves of photovoltaic cells and experimentally validated through telemetry measurements on a cargo spacecraft Progress MS. Based on the relationships between electrical parameters of the

cells and temperature current-versus-voltage curves were plotted, which were used to find out how heating affects current, voltage and power output of solar arrays. It was found that the effect depends on the method of matching the solar arrays to current loads. In spacecraft the matching is usually provided through solar array voltage regulation or optimizing control. The analysis results for the case of voltage regulation were experimentally validated through telemetry measurements of current and temperature in solar arrays on free-flying Progress MS-07 spacecraft with solar arrays pointing at the Sun. The results of the study are of interest to developers of solar arrays and spacecraft power supply systems.

Key words: solar array power output vs. temperature, solar array simulation, photovoltaic cell current vs. voltage curve.



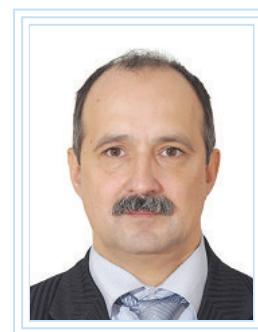
АХМЕДОВ М.Р.



БИДЕЕВ А.Г.



САЗОНОВ В.В.



ХАМИЦ И.И.

АХМЕДОВ Муслим Ринатович — аспирант, ведущий инженер РКК «Энергия», e-mail: post@rsce.ru

AKHMEDOV Muslim Rinatovich — Post-graduate, Lead engineer at RSC Energia, e-mail: post@rsce.ru

БИДЕЕВ Алексей Геннадьевич — кандидат технических наук, начальник отделения РКК «Энергия», e-mail: alexey.bideev@rsce.ru

BIDEEV Aleksey Gennadyevich — Candidate of Science (Engineering), Head of Division at RSC Energia, e-mail: alexey.bideev@rsce.ru

САЗОНОВ Василий Викторович — кандидат физико-математических наук, и.о. декана факультета космических исследований МГУ, e-mail: sazonov@cosmos.msu.ru

SAZONOV Vasilii Viktorovich — Candidate of Science (Physics and Mathematics), Acting Dean of Space Research Faculty of MSU, e-mail: sazonov@cosmos.msu.ru

ХАМИЦ Игорь Игоревич — руководитель НТЦ, заместитель главного конструктора РКК «Энергия», e-mail: igor.khamits@rsce.ru

KHAMITS Igor Igorevich — Head of STC, Deputy General designer of RSC Energia, e-mail: igor.khamits@rsce.ru

Введение

Электрические параметры фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), как и всех полупроводниковых приборов, заметно зависят от температуры, в связи с чем нагрев влияет на выходную мощность солнечных батарей (СБ). Анализ влияния в общей постановке сложен из-за многофакторности, большого количества

параметров и наличия обратных связей. Тем не менее, с помощью некоторых упрощений зависимость можно, в целом, выявить и использовать при проектировании космических аппаратов (КА). В статье дано теоретическое объяснение работы СБ при нагреве, основанное на анализе вольт-амперных характеристик (ВАХ) ФЭП и экспериментально подтвержденное телеметрическими измерениями корабля «Прогресс МС».

Способы согласования СБ с потребителями тока

Влияние температуры на мощность СБ неоднозначно: в зависимости от условий работы батарей нагрев может вести как к сравнительно небольшому увеличению, так и к значительному снижению вырабатываемой мощности. В целом, результат зависит от положения рабочей точки на вольтамперной характеристике, что, в свою очередь, определяется способом согласования СБ с нагрузкой.

В системах энергоснабжения КА солнечные батареи, как правило, согласуются с нагрузкой стабилизацией напряжения или экстремальным регулированием. Например, в системах энергоснабжения служебного, многофункционального лабораторного и научно-энергетического модулей РС МКС напряжение на шине питания с высокой точностью поддерживается регуляторами, которые, в зависимости от текущего электропотребления, отсекают избыточный ток СБ [1–4]. Схема отлично зарекомендовала себя еще на орбитальном комплексе «Мир». Она удобна, когда состав потребителей заранее неизвестен и нет цели постоянно извлекать из СБ максимально возможную мощность.

В системах электропитания кораблей «Союз», «Прогресс» и их модификаций напряжение стабилизируют буферные аккумуляторы. Корректнее сказать, что напряжение на шине питания здесь поддерживается в допустимом интервале за счет баланса между СБ, буферными аккумуляторами и потребителями тока. Но ведущая роль в процессе принадлежит аккумуляторам: напряжение на шине близко или к их электродвижущей силе, или к зарядному напряжению в зависимости от того, в каком режиме находятся аккумуляторы.

Аппаратно сложнее всего экстремальное регулирование. Оно оправдано, если требуется постоянно эксплуатировать СБ в режиме максимальной энергоотдачи, например, в спутниках-ретрансляторах при обеспечении наилучшего радиоприема или в КА с электро ракетной маршевой тягой. Электрическая мощность, передаваемая нагрузке от источника тока, зависит от сопротивления нагрузки и достигает максимума только при определенной величине сопротивления. Характеристики источника

и нагрузки, как правило, нестабильны, и, однажды подстроенные друг под друга, в дальнейшем они, вероятнее всего, не будут работать с предельной эффективностью. Экстремальным регулятором называют согласующее устройство, позволяющее при изменчивых характеристиках источника тока и нагрузки эксплуатировать источник всегда в режиме максимальной мощности. Регулятор обеспечивает оптимальные ток и напряжение на источнике, не отбирая излишек энергии.

Теоретическое описание связи температуры и мощности СБ

Вольтамперные характеристики ФЭП для разных температур показаны на рис. 1. Используются данные для ФЭП на основе кремния производства НПО «Сатурн» (г. Краснодар). Прочие преобразователи, в т. ч. на основе других полупроводниковых материалов, имеют похожий вид, и при изменении температуры ведут себя аналогично [5]. С повышением температуры ВАХ смещается вдоль оси U влево, а вдоль оси I — вверх, почти сохраняя форму. Напряжение холостого хода U_{xx} снижается практически линейно температуре, а ток короткого замыкания $I_{кз}$ повышается, но гораздо медленнее. Максимум мощности (точка C) смещается влево и вниз, что свидетельствует об уменьшении оптимального тока I_{opt} , оптимального напряжения U_{opt} и максимальной мощности $P_{max} = I_{opt} U_{opt}$.

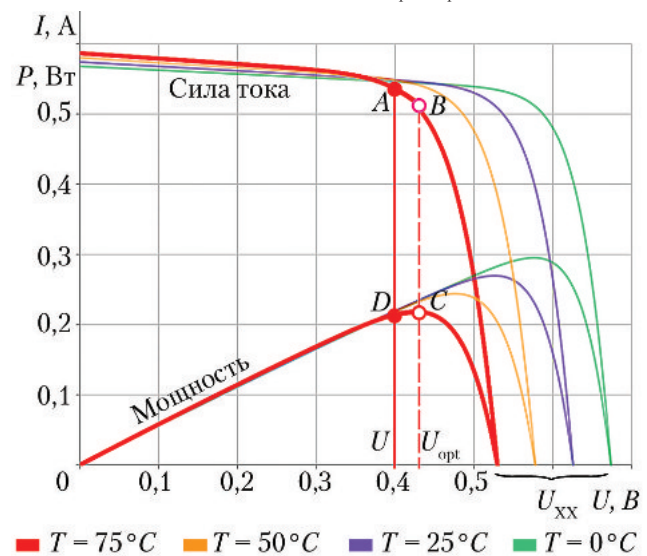


Рис. 1. Вольтамперные и вольтваттные характеристики ФЭП при различной температуре: А — рабочая точка; В — точка максимальной мощности (оптимальная); С — максимум мощности; D — текущая мощность

В составе СБ ФЭП соединяются последовательно-параллельно, и если условия работы всех ФЭП одинаковы (ФЭП равномерно освещены и имеют одинаковую температуру), то ВАХ батареи в целом повторяет ВАХ ФЭП с точностью до множителей по осям координат.

Режим работы ФЭП (сочетание действующего тока и напряжения на выходе СБ) задает на ВАХ так называемую рабочую точку (точка А на рис. 1). Высота ее положения численно равна силе тока ФЭП и при неизменном напряжении зависит от температуры, вернее, от того, какая именно ВАХ реализуется. Зафиксировав вертикаль, проходящую через рабочую точку, можно определить силу тока при нескольких температурах, а затем построить зависимость, как на рис. 2. Здесь видно, что до некоторой температуры сила тока растет, а при дальнейшем нагреве снижается вплоть до нуля.

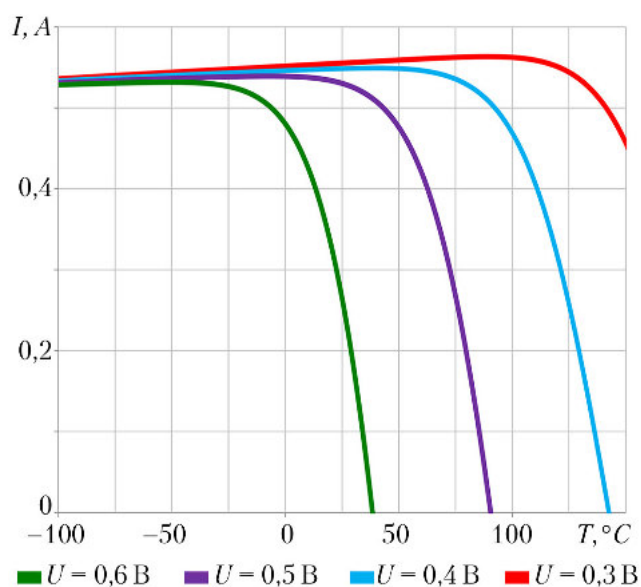


Рис. 2. Зависимость тока ФЭП от температуры при стабилизированном напряжении

При использовании экстремального регулятора СБ в каждый момент времени выдают максимально возможную электрическую мощность. Если проанализировать серию ВАХ при различных температурах, можно построить зависимость, как на рис. 3. В данном примере зависимость имеет прямолинейный характер только из-за предположения, что оптимальное напряжение U_{opt} зависит от температуры линейно, а оптимальный ток I_{opt} , согласно данным производителя, от температуры не зависит. Практически, график может не быть прямолинейным, но обязательно монотонно убывает.

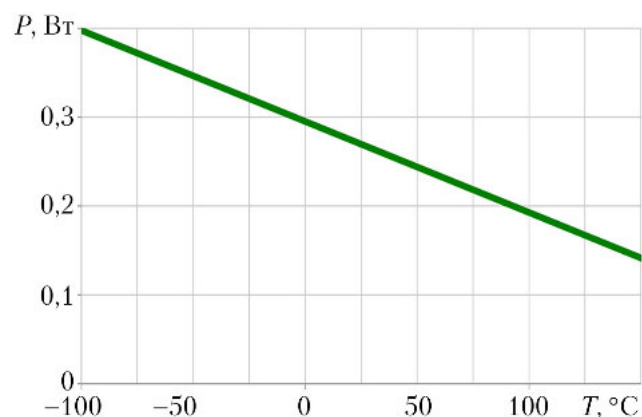


Рис. 3. Зависимость максимальной мощности ФЭП от температуры

Экспериментальное исследование связи температуры и мощности СБ

На низкой околоземной орбите восход Солнца происходит очень быстро — менее чем за полминуты, поэтому при выходе из тени планеты на спутнике практически сразу устанавливается почти постоянная освещенность, но температура его элементов продолжает расти.

Температура внешних элементов спутника из-за периодических заходов в тень Земли может меняться более чем на 100 °C [6]. Такие условия удачны для изучения связи силы тока СБ с температурой. Для СБ со стабилизированным напряжением выполнить исследование оказалось возможным с помощью грузового космического корабля «Прогресс МС-07», в автономном полете которого созданы необходимые условия для эксперимента, и обеспечена запись телеметрических данных. Ранее подобные измерения были сделаны на служебном модуле РС МКС, но они не позволили установить явную связь между силой тока и температурой СБ из-за периодического затенения батарей другими элементами станции [6].

Чистота эксперимента требует равномерного освещения и нагрева СБ. Равномерность освещения батарей корабля «Прогресс МС-07» обеспечена ориентацией корабля на Солнце, длительное время сохраняемой за счет собственного вращения аппарата. Достаточно простая форма корабля исключает затенение СБ конструктивными элементами. Нагрев фотоэлектрических преобразователей, вероятно, не был одинаковым из-за особенностей конструкции СБ и корабля: каждая панель батарей представляет собой металлическую раму с натянутым диэлектрическим сетчатым полотном,

к которому пришиты ФЭП. Очевидно, что преобразователи, расположенные вдоль краев панелей, обмениваются теплом еще и с относительно теплоемкой рамой — как через полотно, так и посредством излучения. Кроме того, в связи с консольным расположением СБ преобразователи имеют лучистый теплообмен с корпусом корабля. Особенно это относится к ФЭП, близким к корпусу корабля [7].

Вообще, распределение температуры СБ и его влияние на характеристики батарей — предмет отдельного исследования, и в данной работе этот фактор не учитывался по трем причинам. *Во-первых*, целью работы является определение общей связи электрических характеристик СБ с температурой в предположении о сравнительно равномерном нагреве батарей. *Во-вторых*, амплитуда зарегистрированных температурных колебаний как минимум на порядок превышает предполагаемый разброс температуры ФЭП, что делает данное исследование вообще возможным. *В-третьих*, исследование основано на телеметрических измерениях, а температуру СБ корабля «Прогресс МС» измеряют только две пары резервирующих друг друга датчиков — по одной на каждой консоли СБ.

Чрезвычайно ценной для эксперимента оказалась возможность включения СБ корабля «Прогресс МС» секциями, что позволяет проследить за их работой, когда они наиболее чувствительны к температуре. Солнечные батареи корабля электрически разделены на две последовательные секции: основную СБ1 и дополнительную СБ2. В зависимости от того, работает дополнительная секция или нет, реализуется одна из пар ВАХ на рис. 4.

При сравнительно небольшой, дежурной нагрузке работает только СБ1. Количество ФЭП в ее генераторах подобрано с таким расчетом, чтобы рабочая точка находилась на ниспадающей части ВАХ (точка А на рис. 4). Небольшой нагрев на величину ΔT вызывает смещение ВАХ влево и значительное уменьшение силы тока на величину ΔI . Таким образом, при выключенной секции СБ2 ток СБ корабля становится чувствителен к изменению температуры, и на аккумуляторах поддерживается необходимый зарядный ток, причем только за счет нелинейности ВАХ.

Экспериментально зарегистрированный процесс изменения температуры и тока

СБ корабля «Прогресс МС-07» показан на рис. 5. Графики построены на основе телеметрической информации (параметры ТС1 и Т174), записанной на витках № 2712 и 2721. В течение первого из них работали обе секции СБ, в течение второго — только основная. Для других витков графики выглядят схожим образом, отличаясь лишь случайными, ограниченными по амплитуде флуктуациями, которые объясняются наличием отраженного от Земли света и светочувствительностью обратной стороны СБ корабля [6, 8]. За начало отсчета времени $t = 0$ принят момент выхода аппарата из тени Земли.

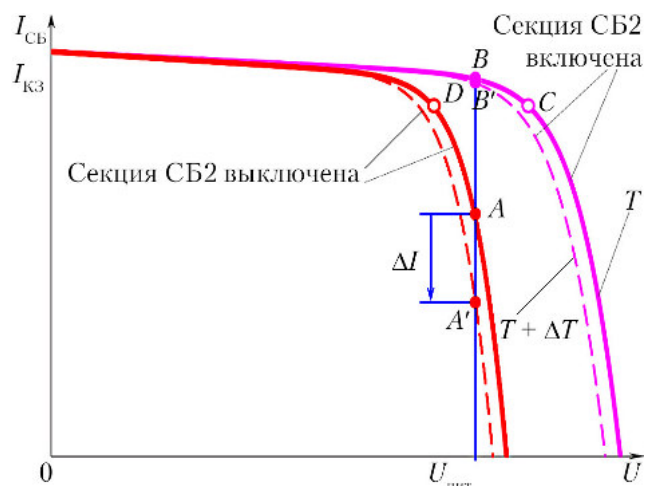


Рис. 4. Вольтамперные характеристики СБ корабля «Прогресс МС» при различном количестве включенных секций и вариациях температуры: А, А', В, В' — рабочие точки; С, D — точки максимальной мощности

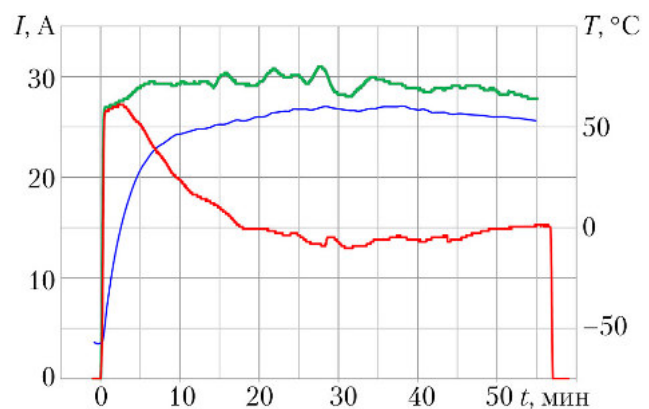


Рис. 5. Графики тока СБ (параметр ТС1) и температуры (параметр Т174): ■ — температура СБ; ■ — ток СБ, секция СБ2 выключена; ■ — ток СБ, секция СБ2 включена

Режим с выключенной секцией СБ2 представляет основной интерес для исследования, так как соответствует режиму работы, чувствительному к изменениям температуры, и позволяет проследить работу СБ в большем диапазоне токов. Зависимость тока СБ от температуры

демонстрирует график на рис. 6, где каждая точка имеет своими координатами температуру и ток СБ, наблюдавшиеся в одинаковые моменты времени.

Отсчеты времени t на рис. 6 соответствуют шкале времени рис. 5. В интервале $t = 0 \dots 0,5$ мин корабль освещался сквозь земную атмосферу, и по мере того как Солнце поднималось над горизонтом, ток возрастал от нуля почти до максимума. Далее, до $t = 2,5$ мин, ток возрос еще примерно на $0,6$ А за счет повышения температуры СБ от -55 до -10 °С. Затем, примерно до $t = 30$ мин, наблюдался

монотонный рост температуры и одновременное снижение тока СБ. В интервале $0,5 \dots 17,0$ мин график на рис. 6 имеет вид, аналогичный графикам рис. 2. Таким образом, предположения о зависимости мощности СБ от температуры при стабилизированном напряжении, сделанные выше путем анализа ВАХ ФЭП, находят экспериментальное подтверждение.

Экспериментально был реализован достаточно широкий, но все-таки ограниченный диапазон температур, и чтобы подчеркнуть сходство, график на рис. 6 экстраполирован штриховыми линиями.

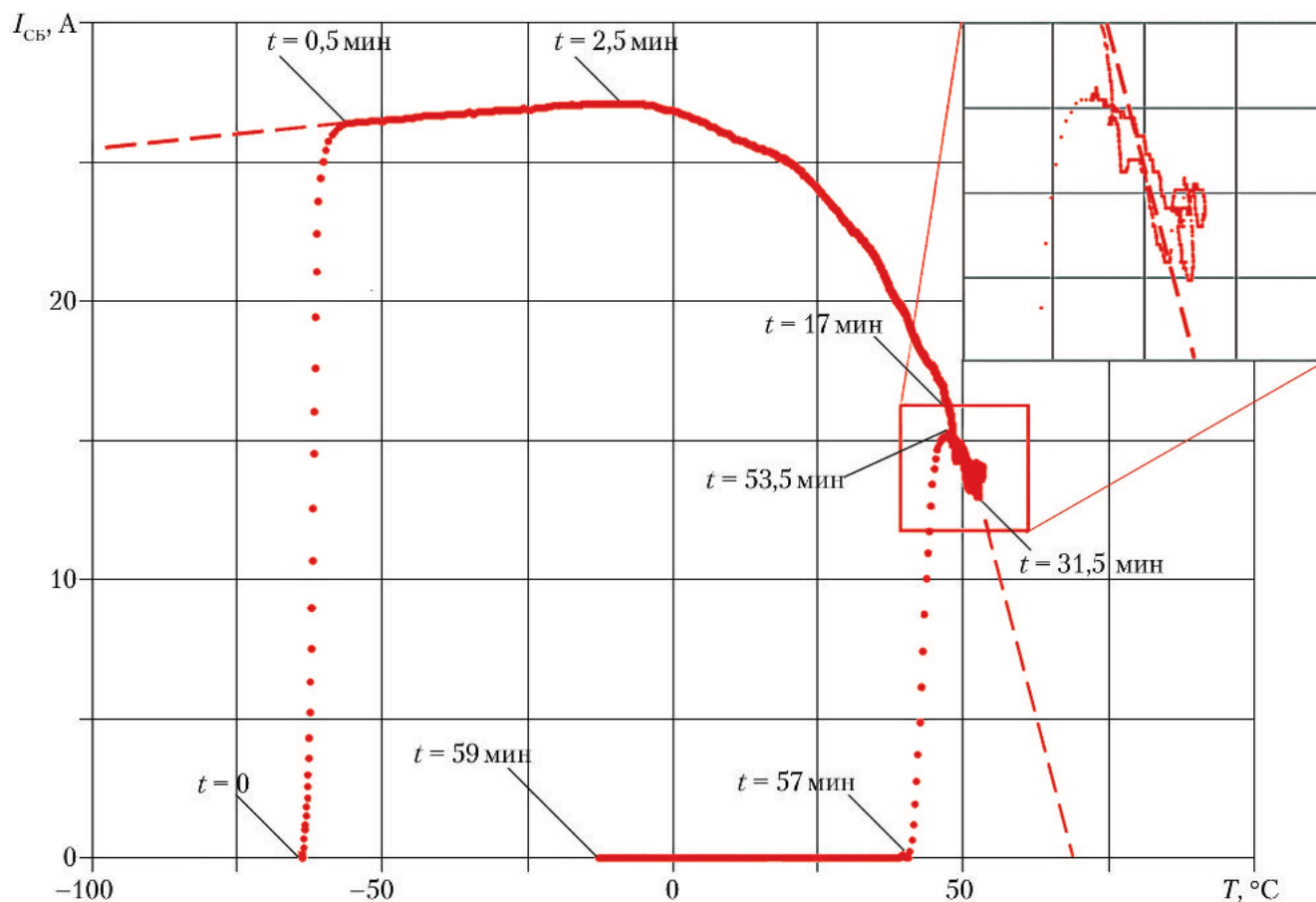


Рис. 6. Взаимное изменение температуры и тока СБ корабля «Прогресс МС-07» при выключенной секции СБ2 (данные ТМИ от 07.04.2018 г., виток 2721)

Оценка погрешности расчета мощности СБ без учета изменений температуры

Исследование позволяет ответить на вопрос, в каких случаях и в какой степени допустимо пренебречь учетом изменения температуры ФЭП при расчете мощности СБ. Вообще, точный расчет предполагает учет тепловых и электрических процессов в СБ в их взаимной связи. Должно быть определено состояние каждого ФЭП с учетом теплового и электрического взаимодействия с другими,

и общая постановка задачи приводит к нелинейным уравнениям с тысячами переменных. На практике совершенно необходимо задачу упростить [6, 9].

Если СБ согласована с нагрузкой путем стабилизации напряжения на шине питания, то, как видно на рис. 2, размах изменений тока батарей из-за непостоянства температуры зависит от рабочего напряжения ФЭП и диапазона эксплуатационных температур. Например, если СБ должна работать при температуре $-50 \dots +100$ °С, а напряжение ФЭП $0,4$ В,

сила тока преобразователей может составлять 0,47...0,55 А.

Следовательно, в общем случае необходим расчет мощности СБ для нескольких значений температуры. Особый интерес представляют наименьшая, наибольшая, температура максимальной мощности и наиболее вероятная. Расчет при предельных температурах дает минимальную мощность СБ, а при наиболее вероятной позволяет вычислить средневитковую мощность.

При разработке КА, у которых напряжение на шине питания стабилизировано, стремятся, насколько возможно, обеспечить независимость тока СБ от температуры. Достигается это, как правило, путем увеличения количества ФЭП в генераторах тока и, соответственно, уменьшения рабочего напряжения преобразователей. Кроме того, запас ФЭП должен учитывать возможные отказы и постепенную деградацию под действием факторов космического пространства. В результате рабочая точка ВАХ ФЭП оказывается значительно левее оптимальной, и — на пологой части кривой, где сила тока слабо зависит от вариаций температуры (см. рис. 1).

В приведенном примере (эксплуатационная температура $-50...+100$ °С, зависимость тока от температуры согласно рис. 2) с уменьшением рабочего напряжения ФЭП до 0,3 В диапазон возможных значений тока сужается до 0,54...0,56 А. Теперь вместо нескольких расчетов достаточно одного, без учета вариаций температуры. Его погрешность составит $\pm 2\%$.

В случае применения экстремального регулятора мощность СБ при повышении температуры монотонно уменьшается, поэтому учет ее изменения необходим. На практике интересны расчеты при минимальной и максимальной температурах эксплуатации, а также при наиболее вероятной.

Выводы

Характер влияния температуры на выходную мощность СБ зависит от способа согласования СБ с потребителями тока. Если согласование СБ и нагрузки обеспечено за счет стабилизации напряжения питания (регуляторами тока или буферными аккумуляторами), то с повышением температуры до некоторого предела сила тока и, соответственно,

мощность СБ незначительно возрастают, а при дальнейшем повышении температуры падают вплоть до нуля. Например, ток секции СБ1 корабля «Прогресс МС» с ростом температуры от -60 до -10 °С повышается на 2–3%, с нагревом до 50 °С уменьшается на 50%, а при температуре ~ 70 °С исчезает.

Обеспечить практически стабильную работу СБ в необходимом диапазоне температур можно, если увеличить количество ФЭП в последовательных цепочках (генераторах тока), т.е. уменьшив рабочее напряжение ФЭП. Например, включение секции СБ2 последовательно с секцией СБ1 на корабле «Прогресс МС» делает ток СБ практически нечувствительным к колебаниям температуры в диапазоне $-60...+60$ °С. Однако такая мера, в целом, снижает реализуемый КПД ФЭП.

В случае применения экстремальных регуляторов мощность солнечных батарей с ростом температуры монотонно уменьшается.

Авторы выражают благодарность Татьяне Владимировне Матвеевой за активное участие в проведении эксперимента.

Список литературы

1. Легостаев В.П., Марков А.В., Сорокин И.В. Целевое использование Российского сегмента МКС: значимые научные результаты и перспективы // Космическая техника и технологии. 2013. № 2. С. 3–18.
2. Зернов А.С., Николаев В.Д. Опыт эксплуатации солнечных батарей служебного модуля Международной космической станции // Космическая техника и технологии. 2016. № 1(12). С. 29–38.
3. Бидеев А.Г., Семин А.Ю., Кузнецов А.В., Ахмедов М.Р. Проектирование системы энергоснабжения научно-энергетического модуля для Российского сегмента Международной космической станции // Космическая техника и технологии. 2015. № 2(9). С. 64–74.
4. Ахмедов М.Р. Оптимизация проектных параметров систем энергоснабжения орбитальных станций на примере СЭС НЭМ // Сб. материалов конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической техники. V Козловские чтения». Самара, 2017. Т. 1. С. 544–545.
5. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей. М.: Энергоатомиздат, 1983. 360 с.

6. Ахмедов М.Р., Бидеев А.Г., Макарова Е.Ю., Сазонов В.В., Хамиц И.И. Сравнительный анализ расчетной и экспериментальной производительности солнечных батарей орбитального космического аппарата на примере служебного модуля Российского сегмента МКС // Космическая техника и технологии. 2018. № 3(22). С. 69–81.

7. Андреев В.В., Артамонов В.В., Атманов И.Т., Березин В.И., Жукин В.М., Трошин В.С., Черенков В.Б. Автоматические планетные станции. М.: Наука, 1973. 280 с.

8. Рулев Д.Н., Черемисин М.В., Сармин Э.Э., Рулев Н.Д. Отработка методов учета уходящего от Земли излучения при моделировании прихода электроэнергии на Российском сегменте МКС в эксперименте «Альbedo» // Труды LI Научных чтений К.Э. Циолковского. Секция «Проблемы ракетной и космической техники». Калуга, 2016. С. 132–138.

9. Сазонов В.В. Алгоритм определения освещенности солнечных батарей Российского сегмента Международной космической станции // Известия МГТУ «МАМИ». 2014. Т. 3. № 2(20). С. 65–70.

Статья поступила в редакцию 08.10.2018 г.

Reference

1. Legostaev V.P., Markov A.V., Sorokin I.V. Tselevoe ispol'zovanie rossiyskogo segmenta MKS: znachimye nauchnye rezul'taty i perspektivy [The ISS Russian Segment utilization: research accomplishments and prospects]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2013, no. 2, pp. 3–18.

2. Zernov A.S., Nikolaev V.D. Opyt ekspluatatsii solnechnykh batarey sluzhebnogo modulya Mezhdunarodnoy kosmicheskoy stantsii [Experience of operating solar arrays on the Service Module of the International Space Station]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2016, no. 1(12), pp. 29–38.

3. Bideev A.G., Semin A.YU., Kuznetsov A.V., Akhmedov M.R. Proektirovanie sistemy energosnabzheniya nauchno-energeticheskogo modulya dlya Rossiyskogo segmenta Mezhdunarodnoy kosmicheskoy stantsii [Designing a power supply system of the Science and Power Module for the International Space Station Russian Segment]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2015, no. 2(9), pp. 64–74.

4. Akhmedov M.R. Optimizatsiya proektnykh parametrov sistem energosnabzheniya orbital'nykh stantsiy na primere SES NEM [Optimization of design parameters of power supply systems of orbital stations by the example of SPM PSS]. *Sb. materialov konferentsii «Aktual'nye problemy raketno-kosmicheskoy tekhniki. V Kozlovskie chteniya»*. Samara, 2017. Vol. 1, pp. 544–545.

5. Raushenbakh G. Spravochnik po proektirovaniyu solnechnykh batarey [Handbook for the design of solar arrays]. Moscow, Energoatomizdat publ., 1983. 360 p.

6. Akhmedov M.R., Bideev A.G., Makarova E.YU., Sazonov V.V., Khamits I.I. Sravnitel'nyy analiz raschetnoy i eksperimental'noy proizvoditel'nosti solnechnykh batarey orbital'nogo kosmicheskogo apparata na primere sluzhebnogo modulya Rossiyskogo segmenta MKS [Comparative analysis of calculated and experimentally measured output capacity of the orbital space vehicle solar batteries on the example of the Service Module of the International Space Station Russian Segment]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2018, no. 3(22), pp. 69–81.

7. Andreyanov V.V., Artamonov V.V., Atmanov I.T., Berezin V.I., Zhukin V.M., Troshin V.S., Cherenkov V.B. Avtomaticheskie planetnye stantsii [Automatic planetary stations]. Moscow, Nauka publ., 1973. 280 p.

8. Rulev D.N., Cheremisin M.V., Sarmin E.E., Rulev N.D. Otrabotka metodov ucheta ukhodyashchego ot Zemli izlucheniya pri modelirovani prikhoda elektroenergii na rossiyskom segmente MKS v eksperimente «Al'bedo» [Testing methods of accounting for radiation escaping from the Earth when simulating the arrival of electricity on the Russian Segment of the ISS in the Albedo experiment]. *Trudy LI Nauchnykh chteniy K.E. TSiolkovskogo. Sektsiya «Problemy raketnoy i kosmicheskoy tekhniki»*. Kaluga, 2016. Pp. 132–138.

9. Sazonov V.V. Algoritm opredeleniya osveshchennosti solnechnykh batarey Rossiyskogo segmenta Mezhdunarodnoy kosmicheskoy stantsii [Algorithm for determining the illumination of solar arrays of the Russian Segment of the International Space Station]. *Izvestiya MGTU «MAМИ»*, 2014, vol. 3, no. 2(20), pp. 65–70.