

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.4.15>

УДК 681.518.3

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МОЩНЫХ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

В. И. Смирнов^{1,2}, В. А. Сергеев^{1,2}, А. А. Гавриков¹

¹ Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А.Котельникова Российской академии наук,
432071, Ульяновск, ул. Гончарова д.48/2

² Ульяновский государственный технический университет
432027, Ульяновск, ул. Северный венец, 32

Статья поступила в редакцию 15 апреля 2021 г.

Аннотация. Представлены результаты измерений теплового сопротивления мощных солнечных батарей. Отличительной особенностью таких батарей является большая теплоемкость полупроводникового материала, а также высокая суммарная электрическая емкость *p-n*-переходов. Это усложняет процесс измерения теплового сопротивления, основанного на нагреве объекта импульсами греющего тока и измерении в паузах между импульсами температуры *p-n*-перехода. В работе для измерения теплового сопротивления мощной батареи использовался модуляционный метод, в котором ее нагрев осуществлялся импульсами тока с изменяющейся по гармоническому закону длительностью. В паузах между импульсами измерялся отклик на это воздействие – переменная составляющая температуры *p-n*-перехода. Для выявления компоненты теплового сопротивления «переход-корпус» производились измерения зависимости теплового импеданса батареи от частоты модуляции греющей мощности. В измеренной зависимости обнаружен диапазон частот, в котором значение вещественной части теплового импеданса остается практически постоянным. Это позволило определить компоненту теплового сопротивления «переход-корпус». Произведены оценки продолжительности однократного измерения теплового сопротивления и сделан вывод о возможности реализации выборочного технологического контроля данного параметра при производстве мощных солнечных батарей.

Ключевые слова: мощная солнечная батарея, тепловое сопротивление, модуляционный метод, продолжительность измерения, технологический контроль.

Abstract. The results of power solar batteries' thermal resistance measurements are described. A distinctive feature of such batteries is the high heat capacity of the semiconductor material, as well as the high total electrical capacity of p-n-junctions. This complicates the thermal resistance of the measuring process, based on heating the object by the heating current pulses and measuring the temperature of the p-n-junction in the pauses between pulses. To measure the thermal resistance of power solar battery the modulation method was used, a device under test (DUT) heated with current pulses with duration modulated harmonically. The response to the heat (a variable component of the p-n-junction temperature) is measured in the pauses between the pulses. To detect the thermal resistance component junction-to-case, the dependence of the thermal impedance on heating power modulation frequency was measured. In the measured dependence, a frequency range is found when the real part of the thermal impedance value remains constant. This allows the determining of the "junction-to-case" thermal resistance component. Were made estimates of the duration of a single measurement of thermal resistance and a conclusion about the possibility of implementing selective technological control of this parameter in the production of powerful solar cells.

Keywords: power solar battery, thermal resistance, modulation method, measurement time, technological control.

Введение

Кремниевые солнечные батареи мощностью 300–400 Вт составляют основу современной солнечной энергетики. На их эффективность, обычно не превышающую 20%, большое влияние оказывает температура. Максимальная мощность, генерируемая солнечной батареей, с ростом температуры на 1°C уменьшается примерно на 0,4–0,5% [1]. Учитывая, что в процессе эксплуатации температура поверхности батареи может достигать 60–70°C, снижение эффективности

может быть очень существенным. Основная часть выделяющейся в батарее тепловой мощности за счет теплопроводности переносится к элементам конструкции и далее в окружающую среду. Для сохранения высокой эффективности батареи требуется, с одной стороны, хорошая вентиляция элементов конструкции, с другой стороны – низкое тепловое сопротивление между принимающей поверхностью батареи и ее элементами конструкции. Тепловое сопротивление R_{Tjc} между активной областью батареи ($p-n$ -переходом) и ее металлической рамой (корпусом батареи) определяется приращением ΔT_j температуры перехода относительно корпуса при рассеивании в батарее единичной тепловой мощности:

$$R_{Tjc} = \frac{T_j - T_c}{P} = \frac{\Delta T_j}{P}, \quad (1)$$

где T_j – температура $p-n$ перехода батареи; T_c – температура корпуса батареи, которая в процессе измерения должна поддерживаться постоянной; P – тепловая мощность, рассеиваемая в батарее.

Тепловое сопротивление не входит в перечень рабочих параметров солнечных батарей, контролируемых в процессе производственных испытаний [1]. Тем не менее, учитывая высокую степень влияния температуры солнечных батарей на их основные характеристики, необходимость в выборочном контроле R_{Tjc} становится очевидной. Важным критерием качества методов и средств такого контроля является оперативность и достаточно высокая точность измерений. Это делает актуальным исследование особенностей измерения теплового сопротивления таких объектов, как мощные солнечные батареи.

1. Методы измерения теплового сопротивления

Методы измерения теплового сопротивления R_{Tjc} полупроводниковых приборов (диодов, транзисторов и тиристоров) подробно изложены в стандарте ОСТ 11 0944-96 [2]. Суть метода измерения R_{Tjc} для полупроводниковых диодов иллюстрирует рис. 1, на котором представлены временные зависимости тока, протекающего через объект, и падение напряжения на нем. Как следует из формулы (1), для измерения R_{Tjc} необходимо обеспечить контролируемое

выделение в объекте тепловой мощности P , что достигается пропусканием через объект импульсов греющего тока $I_{гр}$ и измерением падения напряжения $U_{гр}$ на нем. Импульсы могут иметь постоянные длительность $t_{и}$ и период следования $T_{сл}$ или изменяться по определенному закону, например, линейному или гармоническому. В методе ОСТ 11 0944-96 длительность импульсов и период следования постоянны.

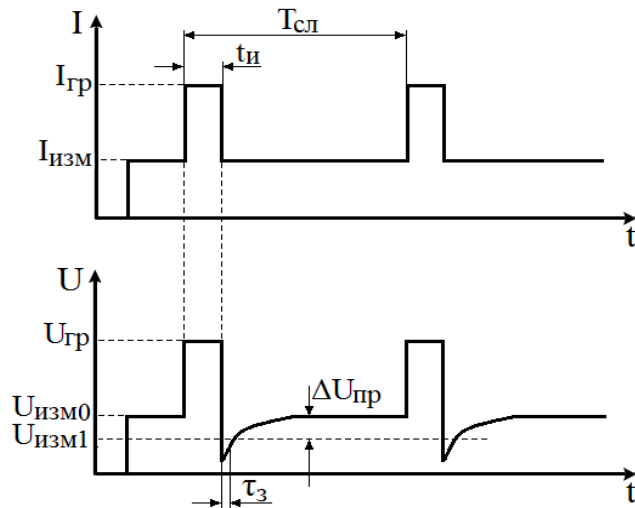


Рис. 1. Временные зависимости тока через диод (вверху) и падения напряжения на нем (внизу).

Измерение температуры перехода T_j производят в паузах между импульсами, используя для этого какой-либо температурочувствительный параметр (ТЧП), линейно зависящий от T_j . Обычно в качестве ТЧП используют падение напряжения $U_{изм}$ на $p-n$ -переходе при протекании через него в прямом направлении фиксированного измерительного тока $I_{изм}$. Измерение ТЧП после каждого греющего импульса требуется проводить с некоторой временной задержкой $\tau_з$, необходимой для завершения переходных электрических процессов, возникающих после переключения объекта из режима нагрева в режим измерения ТЧП. Приращение температуры перехода ΔT_j , вызванное протеканием через объект импульса греющего тока, определяется выражением:

$$\Delta T_j = \frac{U_{изм0} - U_{изм1}}{ТКН} = \frac{\Delta U_{пр}}{ТКН},$$

где $U_{изм0}$ – напряжение на $p-n$ -переходе до греющего импульса; $U_{изм1}$ – напряжение на $p-n$ -переходе, измеренное с задержкой τ_3 после окончания греющего импульса; ТКН – температурный коэффициент напряжения.

Среди зарубежных производителей полупроводниковых приборов широкое распространение получил метод на основе измерения переходных характеристик [3]. Для реализации этого метода через объект пропускают последовательность импульсов греющего тока с возрастающей по логарифмическому закону длительностью и для каждого импульса вычисляют тепловой импеданс Z_{Tjc} , который определяется отношением разности температур перехода T_j и начальной температуры $T_j(t=0)$ к мощности рассеивания P . Зависимости теплового импеданса от длительности греющих импульсов при различных коэффициентах заполнения показаны на рис. 2. Анализ переходных характеристик позволяет определить тепловое сопротивление «переход-корпус» R_{Tjc} .

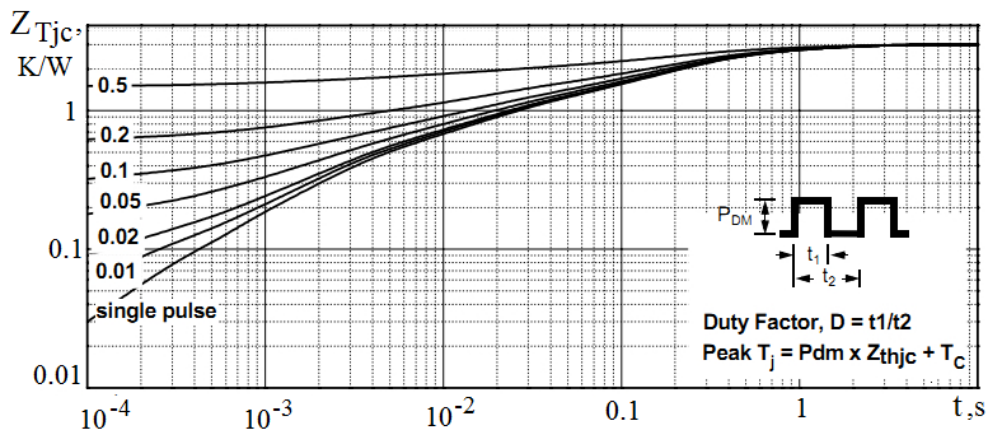


Рис. 2. Зависимости теплового импеданса от длительности греющих импульсов.

Для солнечных батарей стандартов измерения R_{Tjc} не существует. В работе [4] предложено рассматривать солнечную батарею как совокупность диодов, соединенных друг с другом последовательно и параллельно. Это позволяет использовать для измерения R_{Tjc} стандартные методы [2, 3], основанные на нагреве объектов импульсами греющего тока и измерении в паузах между импульсами температурного отклика. Вместе с тем, у солнечных батарей в

сравнении с обычными диодами есть и важные особенности, которые следует учитывать при планировании измерений их теплового сопротивления. Во-первых, солнечные батареи при наличии даже слабого освещения способны генерировать электрический ток, поэтому в процесс измерения $R_{Tjс}$ их следует полностью экранировать от воздействия оптического излучения. Во-вторых, солнечные батареи обладают большой теплоемкостью, что увеличивает тепловую постоянную времени «переход-корпус» до нескольких секунд. Пропорционально тепловой постоянной времени увеличивается и длительность импульсов греющего тока. Учитывая, что при использовании стандартных методов измерения $R_{Tjс}$ нагрев объекта производится последовательностью импульсов с низким коэффициентом заполнения, продолжительность однократного измерений $R_{Tjс}$ может достигать десятков минут. В-третьих, солнечные батареи обладают большой суммарной электрической емкостью $p-n$ -переходов, что в сотни раз увеличивает продолжительность переходных электрических процессов по сравнению с обычными диодами. Поэтому время задержки (временная пауза между окончанием греющего импульса и началом измерения ТЧП) может достигать сотен микросекунд. При этом результат измерения теплового сопротивления в значительной степени зависит от времени задержки.

Существенно снизить влияние времени задержки позволяет модуляционный метод, использующий нагрев объекта импульсами греющего тока, длительность которых изменяется по гармоническому закону [5]. Метод основан на разогреве объекта импульсами тока амплитуды $I_{гр}$ и длительности $\tau(t)$, изменяющейся по синусоидальному закону:

$$\tau(t) = \tau_{ср}(1 + a \cdot \sin 2\pi ft),$$

где $\tau_{ср}$ – средняя длительность импульсов; a – коэффициент модуляции греющей мощности; f – частота модуляции.

Модуляция греющей мощности вызывает соответствующие изменения температуры перехода $T_j(t)$ объекта измерения:

$$T_j(t) = T_0 + T_1 \cdot \sin(2\pi ft - \varphi),$$

где T_0 – постоянная составляющая температуры перехода; T_1 – амплитуда переменной составляющей температуры перехода на частоте модуляции f ; φ – фазовый сдвиг между переменными составляющими температуры перехода и греющей мощности.

Измерив амплитуды переменных составляющих температуры перехода T_1 и мощности $P_1 = I_{гр} U_{гр} \frac{\tau_{ср}}{T_{сл}}$ а, можно определить модуль $Z_T(f)$ и фазу $\varphi(f)$ теплового импеданса на частоте модуляции f . Для определения теплового сопротивления «переход-корпус» производят измерение частотной зависимости вещественной части $ReZ_T(f)$ теплового импеданса, которая имеет особенности в виде пологих участков и точек перегиба, связанных с той или иной компонентой теплового сопротивления. Выявление этих особенностей производится с помощью вычисления и анализа производной $ReZ_T(f)$ по частоте модуляции [6].

2. Объект и средство измерения теплового сопротивления

Объектом исследований являлась солнечная батарея JASolar JAP6 60-260W, изготовленная из поликристаллического кремния и смонтированная в алюминиевой раме. Номинальные значения напряжения, тока и мощности равны соответственно 30,6 В; 8,5 А и 260 Вт. Батарея состоит из 60 солнечных элементов, имеющих размеры $156 \times 156 \text{ мм}^2$ каждый. Измеренное значение электрической емкости составило 0,8 мкФ.

Измерения теплового сопротивления солнечных батарей производились с помощью аппаратно-программного комплекса, включающего в себя измеритель теплового сопротивления, компьютер и специализированное программное обеспечение [7]. Функционирование измерителя осуществляется под управлением микроконтроллера, получающего из компьютера информацию о различных режимах работы и рабочих параметрах измерения теплового сопротивления. Микроконтроллер управляет работой формирователя импульсов греющего тока, генерирующего импульсы постоянной или линейно нарастающей длительности, а также импульсы с широтно-импульсной модуляцией по гармоническому закону. Он производит измерения напряжений

на объекте в момент прохождения через него импульсов греющего тока и в паузах между ними, пересылает результаты измерений в компьютер для последующей обработки, контролирует возникновение в измерителе нештатных ситуаций и передает в компьютер коды для их идентификации. Программное обеспечение позволяет реализовать несколько режимов измерений теплового сопротивления, включая однократное измерение при установленной оператором величине греющего тока и частоте модуляции греющей мощности, сканирование по частоте модуляции, измерение переходной характеристики, измерение теплового сопротивления согласно ОСТ 11 0944-96 и др.

Функциональная схема формирователя импульсов греющего тока представлена на рис. 3. Цифровой потенциометр ЦП согласно двоичному коду, поступившему из микроконтроллера МК, формирует напряжение, определяющее амплитуду импульсов греющего тока $I_{гр}$. Преобразователь уровня ПУ стабилизирует напряжение U относительно шины питания $U_{п}$. Электронный ключ Кл осуществляет ШИМ-модуляцию греющих импульсов. Операционный усилитель ОУ совместно с силовым транзистором VT и токозадающими резисторами R поддерживают амплитуду импульсов постоянной.

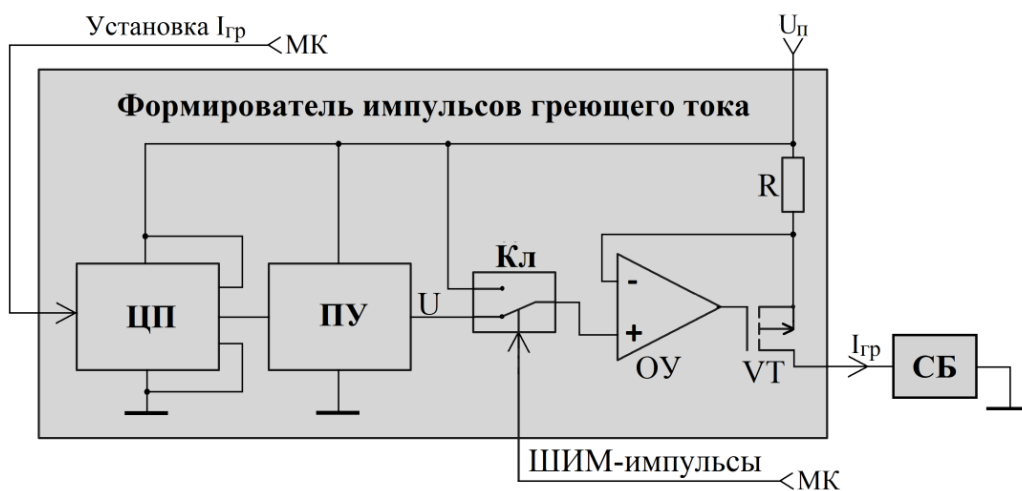


Рис. 3. Функциональная схема формирователя импульсов греющего тока:
 ЦП – цифровой потенциометр; ПУ – преобразователь уровня;
 Кл – электронный переключатель; СБ – солнечная батарея.

Выходной каскад формирователя импульсов реализован по известной схеме, описанной в [8]. Амплитуда импульсов греющего тока $I_{гр}$ определяется выражением:

$$I_{гр} = \frac{U_{п} - U}{R}.$$

Поскольку напряжение U с помощью преобразователя уровня поддерживается постоянным относительно шины питания, то на амплитуду импульсов $I_{гр}$ не оказывают влияние изменения напряжения питания $U_{п}$, а также изменения параметров транзистора VT, вызванные рассеиванием в нем тепловой мощности.

Для повышения точности измерения теплового сопротивления необходимо максимально увеличивать величину рассеиваемой в солнечной батарее мощности, что достигается увеличением амплитуды греющих импульсов. Однако эксперименты показали, что при достижении определенной величины $I_{гр}$ формирователь импульсов перестает работать – на объекте измерения возникают осцилляции напряжения, вызванные самопроизвольным переходом транзистора VT в закрытое состояние. Такие осцилляции возникают при увеличении $I_{гр}$ от 6 А (рис. 4а) до 7 А (рис. 4б). При замене в качестве объекта солнечной батареи на мощную светодиодную матрицу осцилляций напряжения не возникает даже при $I_{гр} = 10$ А (рис. 4в). Это указывает на влияние большой электрической емкости батареи по сравнению с емкостью светодиодной матрицы. Устранение осцилляций, как показал эксперимент, возможно за счет увеличения количества транзисторов VT, соединенных параллельно между собой.

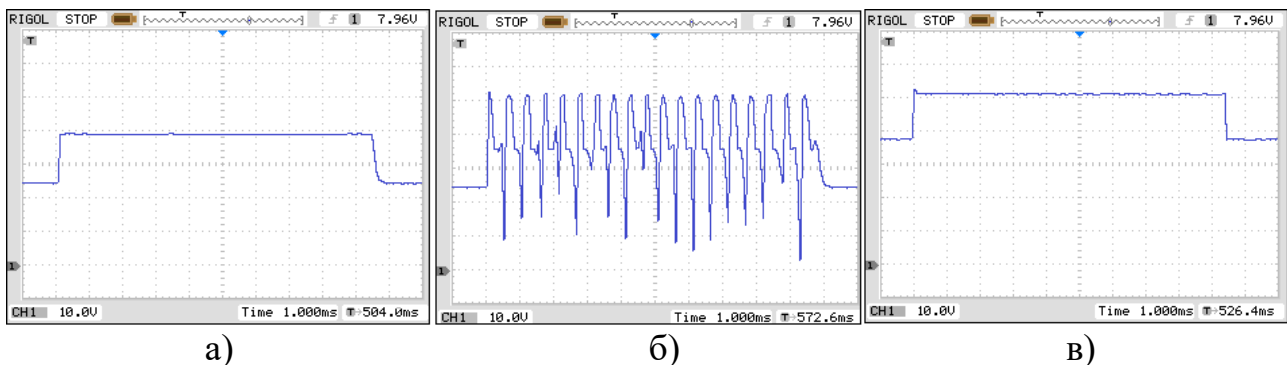


Рис. 4. Осциллограммы напряжений на солнечной батарее (СБ) и светодиодной матрице (СДМ) при различной амплитуде импульсов греющего тока:
а) СБ, $I_{гр}=6$ А; б) СБ, $I_{гр}=7$ А; в) СДМ, $I_{гр}=10$ А.

3. Результаты измерения теплового сопротивления

Измерение теплового сопротивления солнечной батареи JASolar JAP6 60-260W производилось модуляционным методом. Предварительно измерялся температурный коэффициент напряжения ТКН, который при измерительном токе $I_{изм} = 10$ мА составил 123,1 мВ/К. Поскольку на результаты измерения теплового сопротивления оказывает влияние фототок, возникающий при облучении солнечной батареи светом, то в процессе измерений батарея со всех сторон закрывалась светонепроницаемым экраном. На рис. 5 показан результат измерения теплового импеданса в режиме «Однократное измерение».

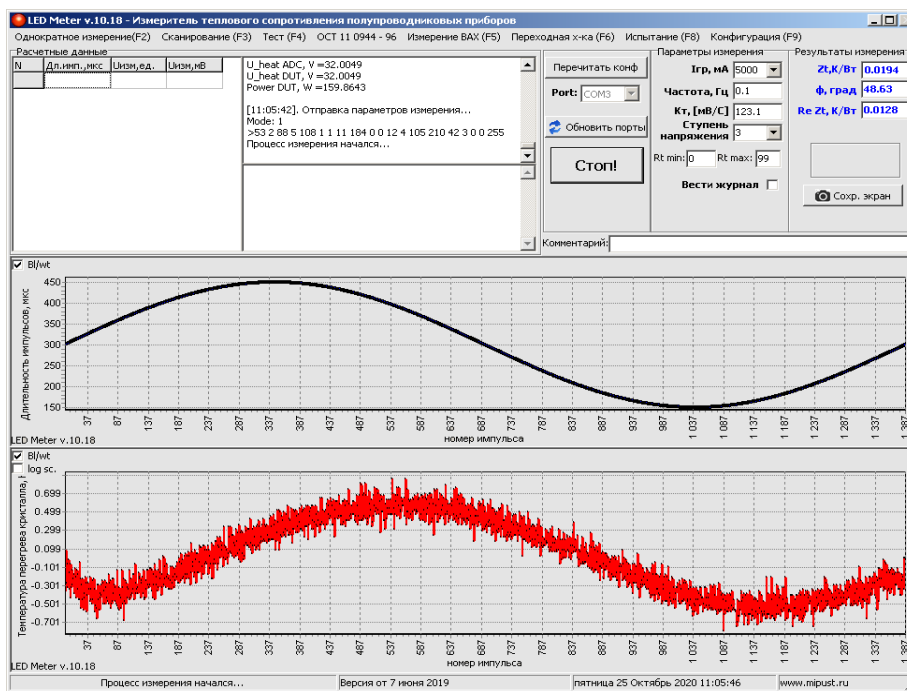


Рис. 5. Осциллограммы температуры перехода в режиме «Однократное измерение».

В верхнем графическом окне показана временная зависимость длительности греющих импульсов, которая определяет характер модуляции греющей мощности. В нижнем окне показан температурный отклик на воздействие переменной мощности – временная зависимость температуры кристалла батареи. Амплитуда переменной составляющей температуры кристалла, как видно из рисунка, примерно равна 0,5°C. Результаты измерения теплового импеданса выведены в текстовое окно в верхнем правом углу.

Модуль и фаза теплового импеданса равны соответственно $Z_T = 0,0128 \text{ K/Wt}$, $\phi = 48,6^\circ$. Данные значение получены при установленных амплитуде импульсов греющего тока 5 А и частоте модуляции мощности 0,1 Гц. В действительности необходимо учитывать, что рабочая частота таймера в микроконтроллере уменьшена в 8 раз, поскольку из-за большой теплоемкости батареи длительности греющих импульсов и их период следования должны быть существенно больше, чем для обычных дискретных полупроводниковых приборов. Поэтому все устанавливаемые оператором значения частоты модуляции в действительности уменьшены в 8 раз.

Для определения теплового сопротивления солнечной батареи в режиме «Сканирование по частоте» производились измерения зависимости теплового импеданса $Z_T(f)$ от частоты модуляции греющей мощности. Измерения производились в диапазоне частот от 1,0 Гц до 0,001 Гц с равномерным по логарифмической шкале частот шагом. Результаты измерений представлены на рис. 6. В верхнем графическом окне показана зависимость вещественной части теплового импеданса $\text{Re } Z_T(f)$ от номера измерения, в нижнем окне – аналогичная зависимость его фазы $\phi(f)$. Соответствие номера измерения и частоты модуляции приведено в таблице справа от графических окон.

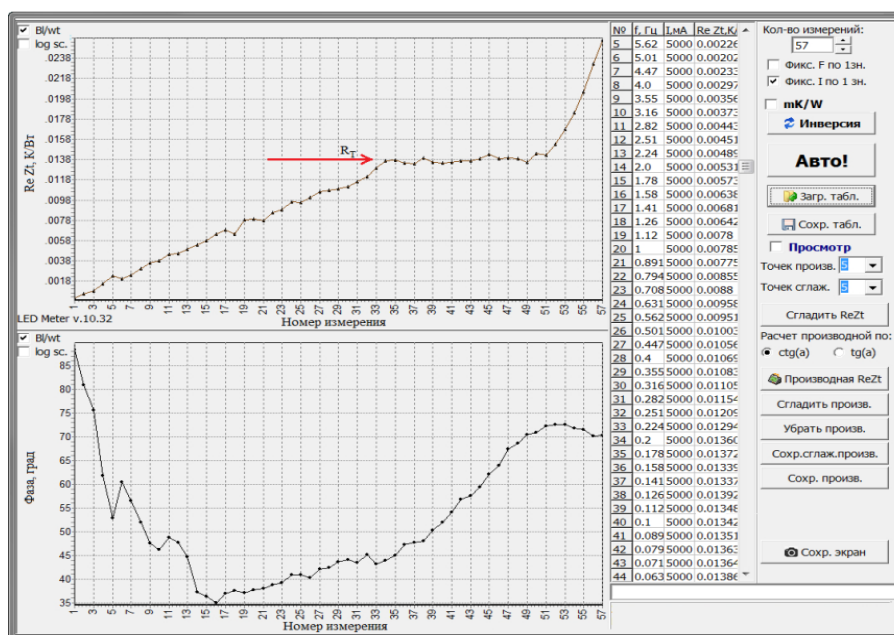


Рис. 6. Частотные зависимости теплового импеданса в режиме «Сканирование по частоте».

На представленном в верхнем окне графике в диапазоне частот от 0,025 до 0,005 Гц имеется пологий участок, на котором значение $\operatorname{Re} Z_T$ практически не зависит от частоты модуляции греющей мощности. Это указывает на наличие компоненты теплового сопротивления «переход-корпус», значение R_T которой равно 0,0138 К/Вт. Продолжительность однократного измерения в диапазоне частот пологого участка составляет от 40 до 200 с. Даже с учетом времени на предварительный прогрев батареи для вывода ее в стационарное тепловое состояние, которое для объектов данного типа не превышает 30 с, общая продолжительность выборочного технологического контроля теплового сопротивления мощных солнечных батарей является вполне приемлемой.

Заключение

Важным фактором, влияющим на эффективность работы мощных солнечных батарей, является их температура. Эффективность отвода тепла от активных областей батареи в элементы конструкции и далее в окружающую среду определяется тепловым сопротивлением между активной областью батареи и ее металлической рамой. Для его измерения предложен модуляционный метод, в котором используется нагрев объекта тепловой мощностью, модулированной по гармоническому закону. Отличительной особенностью объекта измерения является его большая теплоемкость, а также большая суммарная электрическая емкость p - n -переходов.

Исследования показали принципиальную возможность измерения теплового сопротивления мощных солнечных батарей модуляционным методом. На частотной зависимости теплового импеданса имеется участок, на котором изменение частоты модуляции греющей мощности практически не влияет на температуру T_j перехода батареи. Это позволило определить тепловое сопротивление R_{Tjc} батареи. Как показали оценки, продолжительность однократного измерения на частоте модуляции, на которой проявляется компонента теплового сопротивления «переход-корпус», находится в диапазоне 70-230 с.

Работа выполнена в рамках государственного задания при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-48-730018).

Литература

1. ГОСТ Р 56124.7.1-2014. Возобновляемая энергетика. Гибридные электростанции на основе возобновляемых источников энергии, предназначенные для сельской электрификации. Рекомендации. Часть 7-1. Генераторы. Фотоэлектрические батареи. Москва, Стандартинформ. 2015. 68 с.
2. ОСТ 11 0944-96. Микросхемы интегральные и приборы полупроводниковые. Методы расчета, измерения и контроля теплового сопротивления. Москва, ГУП НПП Пульсар. 1997. 110 с.
3. Test Methods for Semiconductor Devices. MIL-STD-750-3. Department of Defense, 2012.
4. Siegal B. Solar Photovoltaic Cell thermal measurement issue. *26th Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM)*. 2010. P.132-135.
5. Сергеев В.А., Смирнов В.И., Гавриков А.А., Фролов И.В. Измерение теплового импеданса мощных светодиодов с применением широтно-импульсной модуляции мощности. *Известия вузов. Электроника*. 2012. №3. С.64–68.
6. Смирнов В.И., Гавриков А.А., Шорин А.М. Метод измерения компонент теплового сопротивления полупроводниковых приборов и его практическая реализация. *Автоматизация процессов управления*. 2017. №2. С.98–105.
7. Смирнов В.И., Сергеев В.А., Гавриков А.А. Аппаратно-программный комплекс для измерения теплового сопротивления солнечных батарей. *Автоматизация процессов управления*. 2018. №4. С.118–126.
8. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. Москва, Бином. 2014. 704 с.

Для цитирования:

Смирнов В.И., Сергеев В.А., Гавриков А.А. Особенности измерения теплового сопротивления мощных солнечных батарей. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №4. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.4.15>