

УДК: 629.7.064.5; 629.78.05; 89.25.21

Оценка конструкторских решений в части потерь на токосъемных устройствах при передаче электрической энергии от солнечных батарей

Гришин А.А.*, Струговец А.Г.**

*«Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева»,
ул. Ленина, 52, Железногорск, 662972, Россия*

**e-mail: grishin_aa@list.ru*

***e-mail: ags24@mail.ru*

Аннотация

Представлены математические модели, позволяющие проверять влияние конструкторско-технологических решений на величину тепловыделения на токосъемных устройствах. Аналитически установлена связь между потерей энергии на тепловыделение и величиной контактных сопротивлений в токосъемном устройстве. Доказана корректность методики путем верификации полученных данных и сравнения их с экспериментальными результатами.

Ключевые слова: система электропитания, токосъемное устройство, кольцо, переходное сопротивление, схема замещения.

Введение

Солнечные батареи (СБ) являются первичным источником системы электропитания (СЭП) [1], обеспечивающей автономное непрерывное энергопитание космического аппарата (КА) в условиях неравномерности электрической нагрузки при переменной освещенности солнечных батарей на орбите [2-4]. Ключевое место в СЭП занимают устройства передачи электрической энергии от вращающихся СБ к стационарным устройствам, передающим ее ко всем бортовым системам КА. Вся электрическая энергия, полученная в СБ, поступает через токосъемные устройства и далее – к передающим системам для функционирования всего КА.

Эффективная, надежная, высококачественная с минимальными потерями передача электрической энергии от СБ токосъемными устройствами, является необходимым требованием для создания и проектирования всех систем КА, начиная с момента создания первого искусственного спутника Земли [5].

В условиях космического пространства, как подтверждается отечественной (АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева» г. Железногорск, АО «Сибирские приборы и системы» г. Омск, ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина» г. Химки) и зарубежной («Diamond-Roltran» США, «Eurofarad» Франция, «Honeywell» США) практиками эксплуатации, создания и конструирования токосъемных устройств для КА, наиболее приемлемым устройством передачи электрической энергии от непрерывно вращающихся СБ является способ катящегося токосъема [6] системой набора слоев кольцевых токосъемных устройств (КТУ), рис. 1.

Конструкция КТУ представляет собой набор слоев ТК. Каждый слой ТК состоит из трех основных элементов: подвижного внутреннего ТК, неподвижного наружного ТК и промежуточных упругих контактных колец [7].



Рис. 1 Схема кольцевого токосъемного устройства

Постоянно возрастающие энергетические мощности СБ и передача от них энергии предъявляют повышенные требования к функционально-эксплуатационным характеристикам СЭП КА, так как при этом значительно увеличиваются потери при протекании электрического тока в токосъемном устройстве.

Следовательно, необходимо проводить конструктивные изменения, совершенствование методов расчета и минимизировать потери, в том числе рассеиваемую тепловую энергию при протекании электрического тока через КТУ.

При проектировании новых образцов КТУ первоочередной задачей является получение информации о падении напряжения и рассеиваемой тепловой мощности на КТУ, приводящих к потере части электрической энергии, передаваемой на КА, перегреву токопроводящих частей устройства и приборов вблизи него и, как следствие, к возможному выходу их из строя.

В существующих литературных источниках [5–15] отсутствует методика расчета полного сопротивления слоя ТК КТУ, которую можно было бы использовать в расчетно-проектно-конструкторской практике при совершенствовании и создании новых токосъемных устройств. Проверка и подтверждение конструкторских решений в части снижения выделяемой тепловой мощности на токопроводах осуществляется приблизительно по результатам анализа натуральных экспериментальных данных на этапе лабораторно-отрабочных испытаний.

Сложившаяся практика создания, проектирования и этапов разработки КТУ состоит в том, что создается макет и проводятся его испытания по определению тепловыделения устройства в процессе его функционирования, в результате чего проверяется правильность заложенных конструкторских решений. При этом часто возникает необходимость проведения неоднократных повторных испытаний, что значительно повышает затраты на разработку.

Нами предлагается создание методики расчета для проведения предварительного имитационного численного моделирования процессов в получении данных о падении напряжения и рассеиваемой тепловой мощности, перегреву токопроводящих частей устройства, приводящих к потере части электрической энергии, передаваемой от СБ на КА через создаваемое КТУ и до его изготовления.

В сложившейся ситуации одной из актуальных задач является установление электрических связей между всеми кинематическими парами одного слоя создаваемого КТУ (рис.1), получение электрической схемы замещения и решение

задачи по моделированию тепловыделения на КТУ в рамках каждого слоя в отдельности, что в конечном итоге сводится к имитации процесса токосъема всей энергии от СБ к системам КА в целом с определением потерь.

Имитационное численное моделирование процесса тепловыделения на ТК КТУ на основе электрической схемы замещения слоя ТК позволит значительно сократить издержки производства ввиду отсутствия необходимости изготовления макетов КТУ, сократить время, затрачиваемое на проверку конструкторских решений при проектировании устройств, повысить достоверность получаемых результатов, оперативно оценивать и рассматривать различные конструктивные варианты создаваемых токосъемных устройств.

Постановка задачи. Необходимо иметь ответы из аналитического решения на основе разрабатываемой методики для расчета величины полного сопротивления слоя ТК и выделяемой тепловой мощности с проведением верификации полученных данных и сравнения их с экспериментальными результатами.

Одной из составляющих полного сопротивления является переходное сопротивление в месте контакта колец одной кинематической пары в схеме замещения слоя ТК.

Величина рассеиваемой тепловой мощности на устройстве зависит от величины полного сопротивления слоя ТК (рис.2), на которое влияет изменение величин переходных (контактных) сопротивлений между ТК.

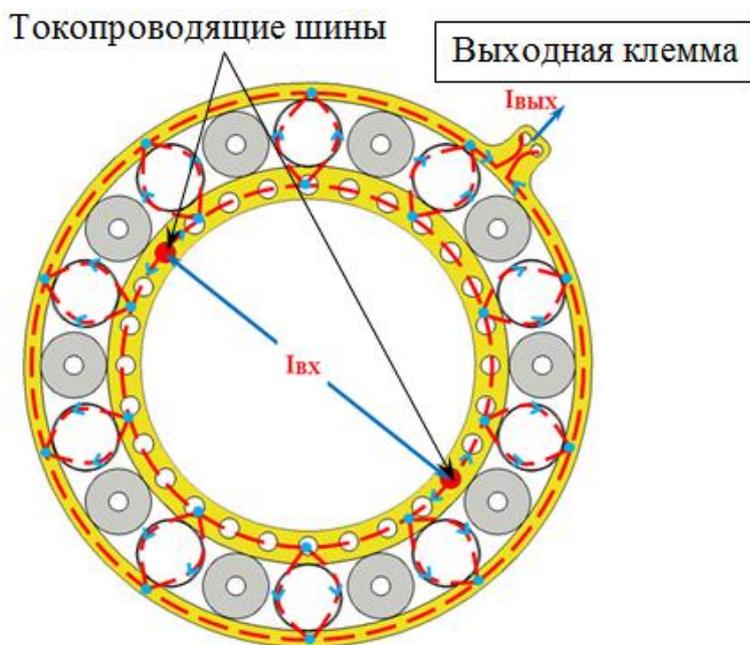


Рис. 2 Схема прохождения тока через слой токосъемных колец

Для анализа выбран слой ТК, включающий в себя десять контактных колец, через который будет протекать электрический ток силой не более 7 А. Ток является максимальным для электрических цепей в токосъемных устройствах подобного типа.

Установление связей между контактным сопротивлением и тепловыделением позволит исследовать токосъемное устройство и все причины, влияющие на повышение тепловыделения при различных воздействиях на КТУ.

Схема замещения слоя токосъемных колец

Для составления схемы замещения слоя ТК необходимо последовательно выполнить анализ процесса протекания тока через токосъемное устройство. При вращении крыла солнечной батареи вращается внутреннее ТК, которое, в свою очередь, приводит в движение группу контактных колец (рис.2). Электрический ток поступает к внутреннему ТК через две токопроводящие шины, далее – к наружному ТК через катящиеся контактные кольца и по проводам, припаянным к выходной клемме наружного ТК – к внутренним системам КА (рис. 2).

Электрическая схема соединений исследуемой цепи при любой геометрии ТК, двумя симметрично расположенными питающими шинами и десятью контактными кольцами, то есть схема замещения слоя ТК, будет иметь вид, приведенный на рис.

3.

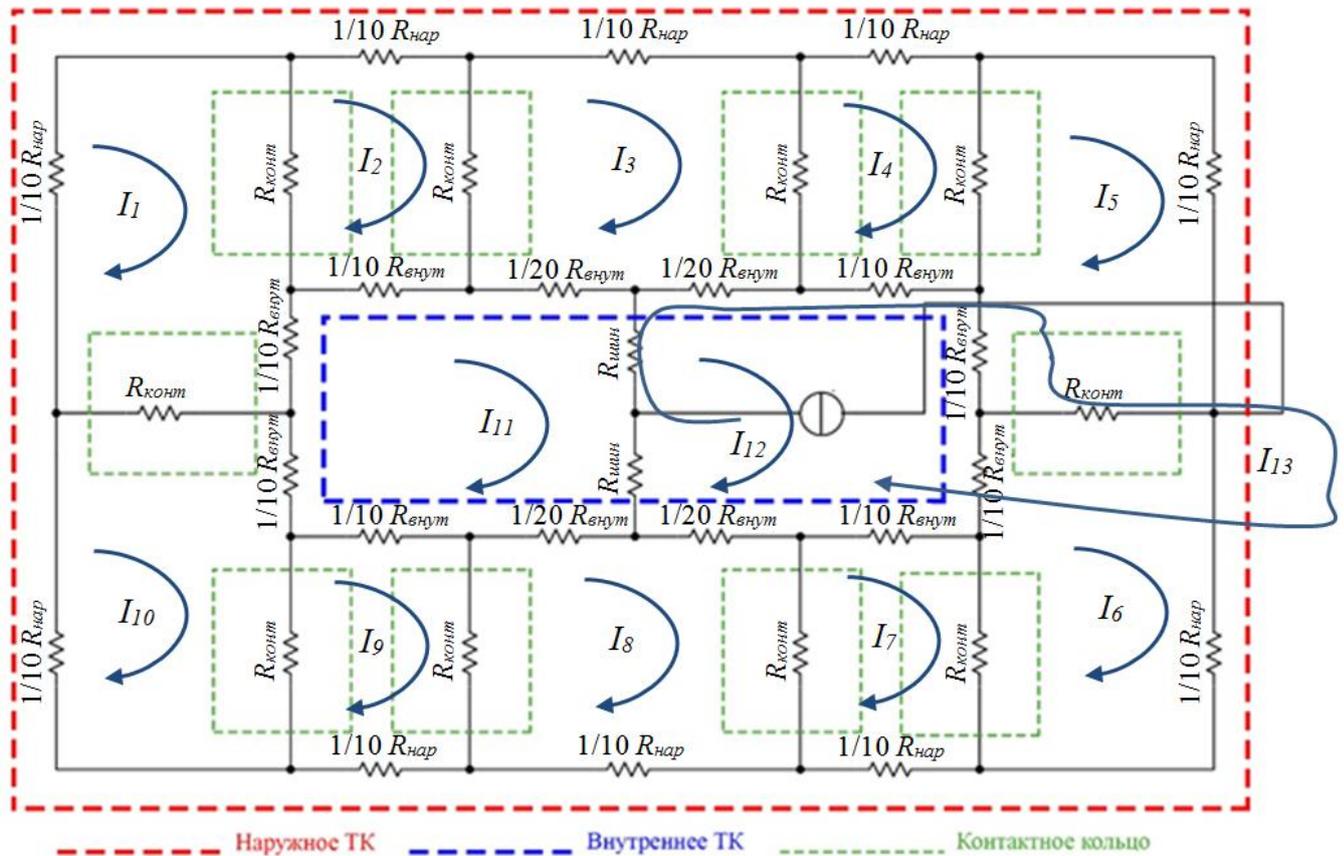


Рис. 3 Схема замещения слоя ТК

На рис. 3 введены следующие обозначения: I_1, I_2, \dots, I_{13} – токи, протекающие через ТК; $R_{шин}$ – электрическое сопротивление токопроводящей шины; $R_{конт}$ – электрическое сопротивление кантатного кольца; $R_{нар}$ – электрическое сопротивление наружного ТК; $R_{внут}$ – электрическое сопротивление внутреннего ТК.

Предположим, что контактные кольца равномерно распределены по поверхностям внутреннего и наружного ТК и условно делят их на 10 равных

секторов. Тогда участки внутреннего и наружного колец можно представить как последовательное соединение десяти резисторов с номинальным сопротивлением, равным десятой части полного сопротивления соответствующего кольца $R_{нар}$ – наружного и $R_{внут}$ – внутреннего. Используя закон Кирхгофа, получим систему уравнений для схемы замещения, описывающую процесс токопрохождения по слою ТК, которая представляет собой сложную многоконтурную схему, сочетающую в себе соединения проводников звездой и треугольником:

$$\begin{cases}
 I_1 \cdot R_{нар} / 10 + (I_1 - I_2) \cdot R_{конт} + (I_1 - I_{11}) \cdot R_{внут} / 10 + (I_1 - I_{11}) \cdot R_{конт} = 0 \\
 I_2 \cdot R_{нар} / 10 + (I_2 - I_3) \cdot R_{конт} + (I_2 - I_{11}) \cdot R_{внут} / 10 + (I_2 - I_1) \cdot R_{конт} = 0 \\
 I_3 \cdot R_{нар} / 10 + (I_3 - I_4) \cdot R_{конт} + (I_3 - I_{12} - I_{13}) \cdot R_{внут} / 20 + (I_3 - I_{11}) \cdot R_{внут} / 20 + (I_3 - I_2) \cdot R_{конт} = 0 \\
 I_4 \cdot R_{нар} / 10 + (I_4 - I_5) \cdot R_{конт} + (I_4 - I_{12} - I_{13}) \cdot R_{внут} / 10 + (I_4 - I_3) \cdot R_{конт} = 0 \\
 I_5 \cdot R_{нар} / 10 + (I_5 - I_6 - I_{13}) \cdot R_{конт} + (I_5 - I_{12} - I_{13}) \cdot R_{внут} / 10 + (I_5 - I_4) \cdot R_{конт} = 0 \\
 I_6 \cdot R_{нар} / 10 + (I_6 - I_7) \cdot R_{конт} + (I_6 - I_{12}) \cdot R_{внут} / 10 + (I_6 + I_{13} - I_5) \cdot R_{конт} = 0 \\
 I_7 \cdot R_{нар} / 10 + (I_7 - I_8) \cdot R_{конт} + (I_7 - I_{12}) \cdot R_{внут} / 10 + (I_7 - I_6) \cdot R_{конт} = 0 \\
 I_8 \cdot R_{нар} / 10 + (I_8 - I_9) \cdot R_{конт} + (I_8 - I_{11}) \cdot R_{внут} / 20 + (I_8 - I_{12}) \cdot R_{внут} / 20 + (I_8 - I_7) \cdot R_{конт} = 0 \\
 I_9 \cdot R_{нар} / 10 + (I_9 - I_{10}) \cdot R_{конт} + (I_9 - I_{11}) \cdot R_{внут} / 10 + (I_9 - I_8) \cdot R_{конт} = 0 \\
 I_{10} \cdot R_{нар} / 10 + (I_{10} - I_1) \cdot R_{конт} + (I_{10} - I_{11}) \cdot R_{внут} / 10 + (I_{10} - I_9) \cdot R_{конт} = 0 \\
 (I_{11} - I_1) \cdot R_{внут} / 10 + (I_{11} - I_2) \cdot R_{внут} / 10 + (I_{11} - I_3) \cdot R_{внут} / 20 + (I_{11} - I_{12} - I_{13}) \cdot R_{шин} + \\
 + (I_{11} - I_{12}) \cdot R_{шин} + (I_{11} - I_8) \cdot R_{внут} / 20 + (I_{11} - I_9) \cdot R_{внут} / 10 + (I_{11} - I_{10}) \cdot R_{внут} / 10 = 0 \\
 (I_{12} + I_{13} - I_3) \cdot R_{внут} / 20 + (I_{12} + I_{13} - I_4) \cdot R_{внут} / 10 + (I_{12} + I_{13} - I_5) \cdot R_{внут} / 10 + (I_{12} - I_6) \cdot \\
 \cdot R_{внут} / 10 + (I_{12} - I_7) \cdot R_{внут} / 10 + (I_{12} - I_8) \cdot R_{внут} / 20 + (I_{12} - I_{11}) \cdot R_{шин} + (I_{12} + I_{13} - I_{11}) \cdot R_{шин} = 0 \\
 (I_{13} + I_{12} - I_{11}) \cdot R_{шин} + (I_{13} + I_{12} - I_3) \cdot R_{внут} / 20 + (I_{13} + I_{12} - I_4) \cdot R_{внут} / 10 + (I_{13} + I_{12} - I_5) \cdot \\
 \cdot R_{внут} / 10 + (I_{13} + I_6 - I_5) \cdot R_{конт} = E_1,
 \end{cases} \quad (1)$$

где E_1 – измерительное напряжение; $R_{шин}$, $R_{конт}$, $R_{внут}$, $R_{нар}$ – электрическое сопротивление элементов схемы замещения по рис. 3; I_1, I_2, \dots, I_{13} – контурные токи схемы замещения по рис. 3.

Анализируя возможные положения контактных колец в процессе функционирования КТУ (согласно рис. 2), видно, что токопроводящие шины могут

располагаться внутри сектора образованного соседними контактными кольцами. Следовательно, возможен случай, когда токопроводящая шина разделяет такой сектор на две равные половины, образуя два участка токопрохождения с сопротивлением, равным двадцатой части полного сопротивления внутреннего ТК, то есть $1/20R_{внут}$.

Анализ схемы замещения контактного кольца

Колебания величин выходных параметров КТУ, таких как падение напряжения и тепловыделение, зависят от стабильности электрического контакта между ТК [8]. В месте перехода тока из внутреннего ТК в контактное кольцо и из контактного кольца в наружное ТК образуется переходное сопротивление контакта. Следовательно, прежде чем приступить к оценке влияния величины переходных сопротивлений на полное сопротивление слоя ТК и определять рассеиваемую тепловую мощность, необходимо эту составляющую учитывать в схеме замещения слоя ТК. Величина переходного сопротивления является одной из основных характеристик электрического контакта [9]. Возникновение электрического контакта твердых тел сводится к образованию на их поверхности участков, проводящих ток.

Из-за волнистости и шероховатости поверхностей реальная площадь контакта в сотни раз меньше, чем номинальная. Действительная поверхность контакта двух проводников состоит из контактных участков (пятен) с металлическим и квазиметаллическим контактом [16-17].

В результате стягивания линий тока к площадке касания (рис. 4) их длина увеличивается, а сечение проводника, через которое фактически проходит ток, уменьшается, что вызывает увеличение сопротивления [18-20], что и необходимо учитывать при составлении схемы замещения слоя ТК.

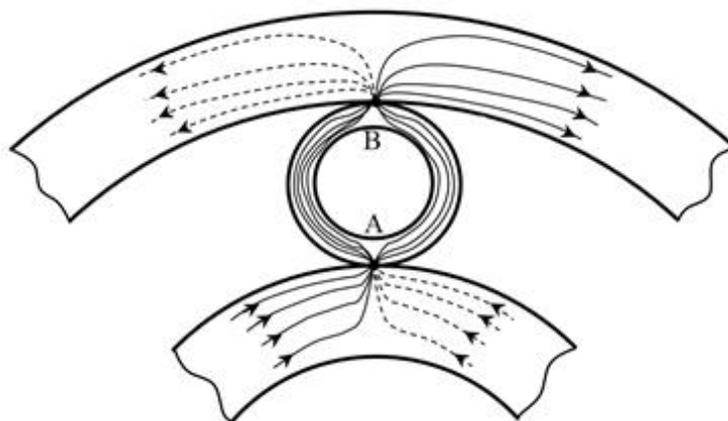


Рис.4 Схема прохождения тока через контактное кольцо

Электрический ток, проходя через контактное кольцо от внутреннего ТК к наружному, преодолевает два перехода: А – из внутреннего ТК в контактное кольцо, В – из контактного кольца в наружное ТК. При протекании электрического тока через контактное кольцо он последовательно преодолевает переходное сопротивление в точке А, затем сопротивление двух половин кольца и далее – переходное сопротивление в точке В. Схема замещения участка перехода электрического тока из внутреннего ТК в наружное через контактное кольцо будет иметь вид, представленный на рис. 5.

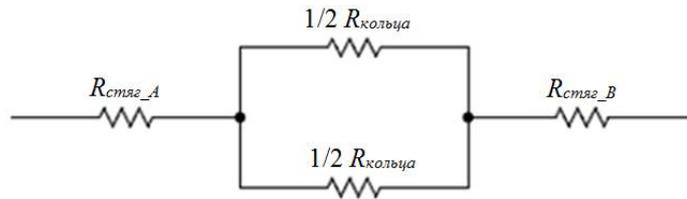


Рис.5 Схема замещения контактного кольца

На рис. 5 введены следующие обозначения: $R_{\text{стяг}_A}$ – электрическое сопротивление стягивания контакта в точке А; $R_{\text{стяг}_B}$ – электрическое сопротивление стягивания контакта в точке В; $R_{\text{кольца}}$ – электрическое сопротивление материала контактного кольца.

Выполнив преобразования и упрощения схемы замещения (рис. 5) получим выражение для величины полного сопротивления контактного кольца, включающего в себя значения контактных сопротивлений:

$$R_{\text{конт}} = \frac{4R_{\text{стяг}_A} + R_{\text{кольца}} + 4R_{\text{стяг}_B}}{4}, \quad (2)$$

Согласно (2), сопротивление контактного кольца в значительной степени зависит от величины переходного сопротивления контакта в точках А и В, когда как доля активного сопротивления контактного кольца в величине полного сопротивления цепи определяется особенностями параллельной работы обеих половин кольца, то есть параллельного их включения.

Оценка влияния переходных сопротивлений на полное сопротивление слоя ТК

Для определения величины полного сопротивления необходимо решить систему уравнений (1). С учетом (2) и схемы замещения (рис. 3) следует, что

изменение величины полного сопротивления слоя ТК, выделяемой тепловой мощности связано с величиной переходного сопротивления в местах контакта ТК.

Введем следующие начальные условия, табл. 1.

Таблица 1

Величина сопротивления ТК

Сопротивление материала контактного кольца, $R_{кольца} \cdot 10^{-3}$ Ом	Сопротивление внутреннего ТК, $R_{внут} \cdot 10^{-3}$ Ом	Сопротивление наружного ТК, $R_{нар} \cdot 10^{-3}$ Ом
3,079	4,114	4,937

Используя подстановки (табл. 1), получено решение системы уравнений (1) в виде функции полного сопротивления слоя ТК ($R_{общ}$) в зависимости от величины полного сопротивления контактного кольца ($R_{конт}$) в виде:

$$R_{общ}(R_{конт}) = \frac{0.1R_{конт}^6 \cdot 0.000885 \cdot R_{конт}^5 + 0.000002 \cdot R_{конт}^4 + 1.773180 \cdot 10^{-9} \cdot R_{конт}^3 + 7.164930 \cdot 10^{-13} \cdot R_{конт}^2}{(R_{конт} + 0.000226) \cdot (R_{конт} + 0.0002501) \cdot (R_{конт} + 0.002369) \cdot (R_{конт} + 0.000654) \cdot (R_{конт} + 0.000345)} + \frac{1.330683 \cdot 10^{-16} \cdot R_{конт} + 9.236811 \cdot 10^{-21}}{(R_{конт} + 0.000226) \cdot (R_{конт} + 0.0002501) \cdot (R_{конт} + 0.002369) \cdot (R_{конт} + 0.000654) \cdot (R_{конт} + 0.000345)} \quad (3)$$

Подставлены в (3) значения контактных сопротивлений для случая штатной установки ТК, и рассчитаны полное сопротивление слоя ТК и тепловыделение при протекании тока силой 7 А, табл. 2.

Таблица 2

Величина сопротивления слоя ТК и тепловыделение на слое ТК

Полное сопротивление контактного кольца, $R_{конт} \cdot 10^{-3}$ Ом	Полное сопротивление слоя ТК, $R_{общ} \cdot 10^{-3}$ Ом	Тепловыделение на слое ТК, $P \cdot 10^{-3}$ Вт
5,562	1,011	0,049

Были спроектированы и изготовлены ТК и проведены экспериментальные исследования КТУ. На рис. 6 приведено сравнение полученных экспериментальных и теоретических результатов изменения полного сопротивления слоя ТК.

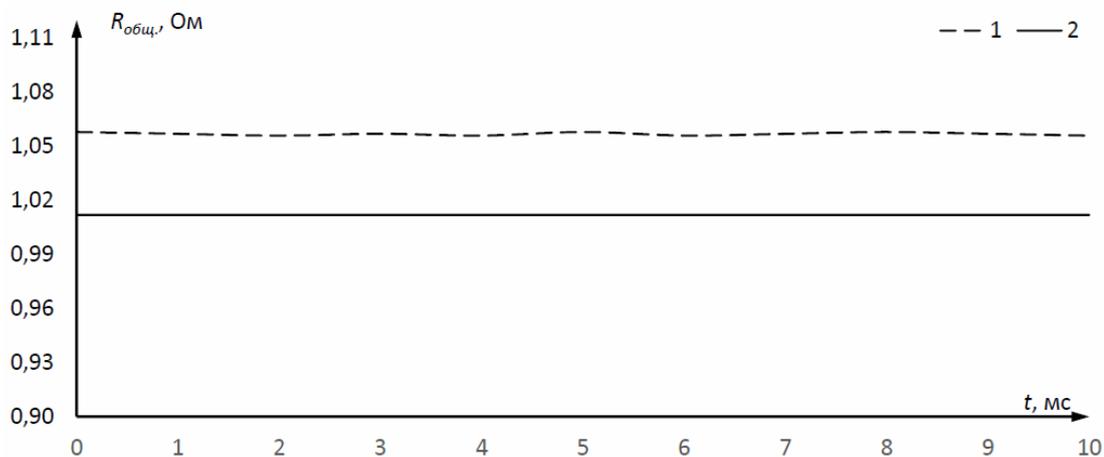


Рис.6 Сравнение экспериментальных и теоретических характеристик изменения полного сопротивления слоя ТК: 1 – экспериментальная; 2 – теоретическая

Из рис. 6 видно, что результаты теоретических расчетов хорошо согласуются с экспериментальными, полученными при автономных испытаниях слоя ТК. Сравнение рассчитанной величины полного сопротивления слоя ТК, полученной по разработанной методике расчета, дает удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными (в пределах 4,5 %), что подтверждает достоверность принятых предпосылок и приемлемость созданной методики для практического использования.

Одной из причин повышения тепловыделения и потерь электрической энергии в КТУ является ухудшение условий контактирования между токопроводами в результате осевого смещения наружных ТК относительно внутренних, что необходимо по технологии изготовления колец для их свободного качения между собой. Максимальная величина осевого смещения ТК составляет около 0,1 мм. В

современных конструкциях многоканальных КТУ не предусмотрены элементы, однозначно фиксирующие положения наружных ТК относительно внутренних.

Причин осевого смещения ТК несколько:

– осевой перепад между ТК настраивается подбором толщины нижележащих изоляторов с допуском не более 0,05 мм. Каждый последующий слой ТК опирается на предыдущий. Смещение ТК в одном слое приводит к нарушению контакта между кольцами во всем устройстве;

– технология механической обработки материала изоляторов не позволяет получать детали с допуском формы точнее, чем 0,05 мм. Отклонение геометрии изолятора в пределах допуска приводит к опусканию или подъему всего набранного пакета слоев ТК в процессе функционирования КТУ;

– отличия в конструкции изоляторов внутренних и наружных ТК, так как площадки их поверхностей в осевом направлении в процессе сборки сдавливаются и на этих площадках КТУ формируются различные внутренние напряжения. По окончании сборки и снятию с КТУ технологической оснастки, накопленное внутреннее напряжение высвобождается, что может привести к неконтролируемому осевому смещению ТК;

– в процессе функционирования КТУ подвергается воздействию температуры от -20 до +40 °С. КТУ представляет собой набор чередующихся слоев неметаллических изоляторов и металлических ТК различных диаметров и толщин, и в результате их температурных расширений будет изменяться изначально выставленное деформированное состояние конструкции всего КТУ, и настройка относительных положений ТК нарушится.

Для оценки влияния величины контактных сопротивлений на величину полного сопротивления слоя ТК и величины тепловыделения подставим в (3) значения контактных сопротивлений для случая осевого смещения внутреннего ТК относительно наружного при протекании тока силой 7 А, табл. 3.

Таблица 3

Величина сопротивления слоя ТК и тепловыделение на слое ТК

Полное сопротивление контактного кольца, $R_{конт} \cdot 10^{-3}$ Ом	Полное сопротивление слоя ТК, $R_{общ} \cdot 10^{-3}$ Ом	Тепловыделение на слое ТК, $P \cdot 10^{-3}$ Вт
42,221	4,714	0,196

Анализируя табл. 3 видно, что увеличение контактных сопротивлений в 7,6 раза приводит к увеличению полного сопротивления слоя ТК в 4,7 раза, что указывает на высокую связь между двумя этими параметрами в рамках существующей топологии схемы соединений.

Таким образом, осевое смещение ТК более чем на 0,1 мм при воздействии внешних механических нагрузок в процессе изготовления токосъемных устройств подобного типа, приводит к мгновенной деградации его выходных характеристик (к увеличению падения напряжения и тепловыделения на ТК) в результате изменения условий контактирования ТК в каждом слое.

Заключение

Результаты автономных электрических испытаний слоя ТК, проведенных в АО «ИСС» по определению тепловыделения на ТК при постоянном токе силой 7 А, подтверждают справедливость предлагаемой методики. Результаты расчета полного сопротивления слоя ТК и тепловыделения на токопроводах близки к экспериментальным данным. Изменение величины выделяемой тепловой мощности при различных вариантах контактирования ТК согласуется с результатами испытаний, проводимых в АО «ИСС». В целом можно констатировать, что результаты расчета хорошо согласуются с экспериментальными величинами полного сопротивления слоя ТК и выделяемой тепловой мощностью.

ВЫВОД. Представленная схема замещения корректна и может быть использована для определения падения напряжения и тепловыделения на слое ТК в зависимости от параметров контактирования колец на стадии проектирования и изготовления КТУ. Идеи и принципы, заложенные в моделирование, позволят прогнозировать изменение величин падения напряжения и тепловыделения на кольцах КТУ при новых конструктивных решениях и оценке изменений геометрии, количества тел качения, максимальных величин сопротивлений и ресурса КТУ.

Результаты исследований использованы АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева» при создании токосъемных устройств для космических аппаратов ЭКСПРЕСС-АМ5, ЭКСПРЕСС-АМ6, ЭКСПРЕСС-АМ8.

Библиографический список

1. Галкин В.В. Солнечные и аккумуляторные батареи ОАО «Сатурн» на космических аппаратах с электронными двигателями // Труды МАИ. 2012. № 60.
URL: <http://www.trudymai.ru/published.php?ID=35383>
2. Тестоедов Н.А. Космические вехи: сборник научных трудов. - Красноярск: Информационные спутниковые системы имени академика М.Ф. Решетнева, 2009. - 704 с.
3. Чеботарев В.Е., Косенко В.Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения. - Красноярск: Сибирский государственный аэрокосмический университет, 2011. - 488 с.
4. Графодатский О.С., Исляев Ш.Н. Взаимодействие спутников связи с окружающей средой. - Томск : РАСКО, 1993. - 208 с.
5. Santoro C., Hayes R., Herman J. Brushless slip ring for high power transmission // 13th European Space Mechanisms and Tribology Symposium – ESMATS 2009. Vienna, Austria, 2009, pp. 459 - 468.
6. Авилов В.Д., Попов Д.И. Катящийся токосъем в машинах постоянного тока // Известия Томского политехнического университета. 2007. № 4. С. 116 - 119.
7. Гришин А.А., Смирнов Н.А., Харитонов А.И. Анализ конструкции кольцевых токосъемных устройств // Вестник СибГАУ. Красноярск. 2014. № 5. С. 146 – 153.
8. Гришин А.А. Влияние количества тел качения на выходные параметры кольцевого токосъемного устройства // Материалы XIX Международной научной конференции «Решетневские чтения», Красноярск, 10–14 ноября 2015. С. 448 – 450.

9. Васильев И.С., Сунцов С.Б., Ефремов С.В., Ким В.С. Проведение испытаний обжимных электрических соединений в бортовой кабельной сети космического аппарата с целью определения их характеристик // Вестник СибГАУ. 2014. № 1. С. 114 - 118.
10. Hayes R., Mumm E., Gotthelf K. Electrical noise performance of gold-on-gold slip rings // 43th Aerospace Mechanisms Symposium. Santa Clara, California, USA. May 4-6, 2016. С. 345 - 357.
11. Koss S., Woolaway S. Lessons learned from the windsat ВАРТА design and on-orbit anomalies // 38th Aerospace Mechanisms Symposium. Cleveland, Ohio, USA. 2006. pp. 209 - 222.
12. Courtois C., Miller M. Advanced slip ring solutions (ASR) // 14th European Space Mechanisms and Tribology Symposium – ESMATS. Constance, Germany. 2011. pp. 313 - 317.
13. Mondier J.B., Sirou F., Mäusli P.A. Life test of the scarab instrument slip ring units // 9th European Space Mechanisms and Tribology Symposium – ESMATS. Liege, Belgium. 2001, pp. 99 - 106.
14. Feusier G., Mäusli P.A., Gass V. Improved characteristics of slip ring assemblies making use of gold on gold metallic contacts // 10th European Space Mechanisms and Tribology Symposium – ESMATS. Sebastian, Spain. 2003, pp. 169 - 175.
15. Косурина Т.А., Осокина О.А., Шамурин А.И., Шевчук Е.Т. Актуальные проблемы совершенствования систем электропитания космических аппаратов // Космонавтика и ракетостроение. 2012. № 3 (68). С. 66 – 69.

16. Мышкин Н.К., Концин В.В., Браунович М. Электрические контакты. Долгопрудный: Интеллект, 2008. - 560 с.
17. Шугуров А.Р., Панин А.В., Лязгин А.О., Шестериков Е.В. Изнашивание гальванических покрытий на основе золота // Физическая мезомеханика. 2015. Т. 18. № 3. С. 58 – 70.
18. Мерл В. Электрический контакт. Теория и применение на практике. М.: Госэнергоиздат, 1962. - 80 с.
19. Бiryюков Е.Н., Ершов Е.В. Математическая модель электрического сопротивления гидродинамического подшипника скольжения // Вестник Череповецкого государственного университета. 2008. № 3. С. 137 – 142.
20. Павлейно О.М. О Влиянии фрагментации контактных пятен на сопротивление сильноточных электрических контактов // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 2. С. 437 – 445.