

# Система измерения теплопроводности тел с внутренними источниками теплоты для контроля работоспособности современной ракетно-космической техники

И. М. Рыбаков<sup>1</sup>, Н. В. Горячев<sup>2</sup>, И. И. Кочегаров<sup>3</sup>, А. К. Гришко<sup>4</sup>, А. А. Прошин<sup>5</sup>

Пензенский государственный университет

<sup>1</sup>rybakov\_im@mail.ru, <sup>2</sup>ra4foc@yandex.ru, <sup>3</sup>pgu.kipra@yandex.ru, <sup>4</sup>alexey-grishko@rambler.ru, <sup>5</sup>digital2sed@gmail.com

**Аннотация.** Для современной доктрины перспектив развития новейшей ракетно-космической техники (РКТ) чрезвычайно важен контроль и управление системами бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Опережающие темпы развития микроэлектроники требуют непрерывного повышения их технического уровня, который определяется ростом плотности монтажа электрорадиоизделий (ЭРИ), повышения требований к надежности, увеличением частоты следования импульсов. Целью работы является обеспечения работоспособности бортовой РЭА, контроль и управление температурным режимом ЭРИ РКТ. Обеспечение этих требований зависит от достижений в области конструирования и развития технологии производства печатных плат (ПП). РЭА средств связи, вычислительной технике, в системах автоматизации РКТ обеспечивает полный контроль работоспособности и управления во время вывода космического аппарата на орбиту и при нахождении в космосе. Они также используются в контрольно-измерительной аппаратуре РКТ. При этом основным источником вывода из строя бортовой РЭА является нарушение температурного режима ЭРИ. Во многих случаях несбалансированный температурный режим ЭРИ приводит к увеличению погрешности работы датчиков, что приводит к нарушению стабильности работы всего комплекса РКТ. Работа направлена на выработку методов контроля и управления температурным режимом ЭРИ РКТ для обеспечения работоспособности бортовой РЭА. На практике встречаются случаи, когда внутри объема тела ЭРИ, или совокупности ЭРИ, за счет внутренних источников возникает теплота, такими примерами могут послужить: химические реакции, ядерные распады, прохождение электрического тока и т.д. Результатом работы является методология обеспечения нормального теплового режима РЭА за счет применения точных средств измерения с программно-аппаратной поддержкой. Область применения разработанной методологии включает весь комплекс РКТ в которой применяется РЭА. В результате разработан комплекс методологического обеспечения с программно-аппаратной поддержкой, который является универсальным инструментом для теплофизического конструирования и обеспечения стабильной работы при разработке РЭА РКТ.

**Ключевые слова:** тепловой расчет; математическая модель; программно-аппаратный комплекс; температура;

*печатная плата; контроль управления; надежность; работоспособность*

## I. ВВЕДЕНИЕ

РЭА средств связи, вычислительной техники, в системах автоматизации РКТ обеспечивает полный контроль работоспособности и управления во время вывода космического аппарата на орбиту и при нахождении в космосе. Они также используются в контрольно-измерительной аппаратуре РКТ. При этом основным источником вывода из строя бортовой РЭА является нарушение температурного режима ЭРИ. Во многих случаях несбалансированный температурный режим ЭРИ приводит к увеличению погрешности работы датчиковой аппаратуры, что приводит к нарушению стабильности работы всего комплекса РКТ. Работа направлена на выработку методов контроля и управления температурным режимом ЭРИ РКТ для обеспечения работоспособности бортовой РЭА.

На практике мы встречаемся с такими случаями, когда внутри объема тела за счет внутренних источников возникает теплота, такими примерами могут послужить: химические реакции, ядерные распады, прохождение электрического тока и т.д. Технологический процесс изготовления ПП является сложным и многооперационным с использованием большого количества оборудования. Он требует не только узких специалистов в области химии, физики, схемотехники, программирования, организации производства, но и специалистов широкого профиля, представляющих все проблемы и пути комплексного решения вопросов, стоящих в настоящее время в производстве печатных плат [1]. Как правило, объемное тепловыделение может быть равномерным и неравномерным. Важным параметром для процессов, перечисленных выше, является мощность внутренних источников теплоты  $q_v$ . Эта величина показывает количество теплоты, выделяемое единицей объема тела в единицу времени Вт/м<sup>3</sup>. В эндотермической реакции при поглощении теплоты внутри объема тела, данный параметр главным образом характеризует интенсивность объемного стока теплоты.

Актуальной задачей при наличии внутренних источников теплоты является расчет температурного поля внутри тела.

## II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУР ДЛЯ ОБЛАСТИ С ВЫСОКОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЙ

Рассмотрим однородную плоскую стенку толщиной  $2\delta$  при постоянном коэффициенте теплопроводности  $\lambda$ . Внутри данной стенки источники теплоты распределены равномерно  $q_v$ . Через боковые поверхности плоской стенки выделяется теплота и передается в окружающую среду. Относительно площади стенки в среднем сечении процесс теплопроводности будет протекать симметрично, поэтому именно здесь помещаем начало координат, а ось абсцисс направляем перпендикулярно боковым поверхностям (рис. 1).[2]

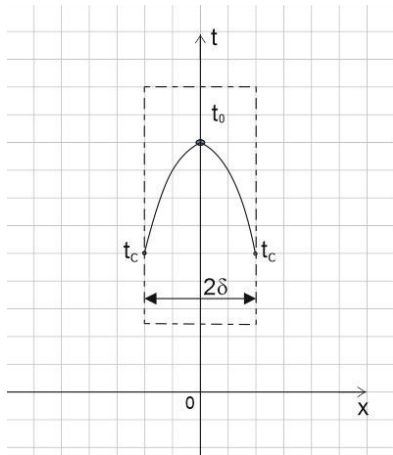


Рис. 1. Модель однородной плоской стенки

Из уравнения теплового баланса можно сделать следующий вывод: при наличии внутренних источников теплоты плотность теплового потока в плоской стенке линейно возрастает с увеличением  $x$  и равна:

$$q_x = q_v x \quad (1)$$

Из уравнения (1) видно, что при  $x = 0, q = 0$ , а при  $x = \delta, q_\delta = q_v \delta$ , т.е. достигает своего максимального значения. Согласно закону Фурье:

$$q_x = q_v x = -\lambda \frac{dt}{dx} \quad (2)$$

Произведя разделение переменных, получим:

$$dt = -\frac{1}{\lambda} q_v x dx \quad (3)$$

Проинтегрируем данное уравнение:

$$t_x = -\frac{1}{2\lambda} q_v x^2 + C \quad (4)$$

Заметим, что постоянная интегрирования  $C$  определяется из граничных условий. При  $x = 0, t = t_0 = C$ , уравнение изменения температуры принимает вид:

$$t_x = t_0 - q_v \frac{x^2}{2\lambda} \quad (5)$$

При  $x = \delta, t = t_c$ ; в данном случае из уравнения (5) следует:

$$t_0 - t_c = q_v \frac{\delta^2}{2\lambda} = q_\delta \frac{\delta}{2\lambda} \quad (6)$$

Здесь разность  $t_0 - t_c$  – перепад температур между серединой и внешними поверхностями плоской стенки, а  $q_\delta = q_\lambda \delta$  – плотность теплового потока на этих граничных поверхностях (при  $x = \delta$ ).

Если температура  $t_0$  неизвестна, то значение постоянной интегрирования  $C$  можно выразить через  $t_c$ , тогда уравнение кривой в этом случае принимает следующий вид:

$$t_x = t_c + \frac{q_v \delta^2}{2\lambda} \left[ 1 - \left( \frac{x}{\delta} \right)^2 \right] \quad (7)$$

Приведенные выражения показывают, что при наличии равномерно распределенных внутренних источников теплоты распределение температур в плоской стенке имеет параболический характер (рис. 1). В средней плоскости при  $x = 0$  значение температуры наибольшее.

Если перепады температуры велики, то в данном случае необходимо учитывать зависимость коэффициента теплопроводности от температуры,  $\lambda = \lambda_0(1 + bt)$ . В этом случае уравнение (3) принимает вид:

$$(1 + bt)dt = -\frac{1}{\lambda_0} q_v x dx \quad (8)$$

Если проинтегрировать уравнение (8), получим:

$$t + \frac{bt^2}{2} = -\frac{1}{\lambda_0} q_v \frac{x^2}{2} + C \quad (9)$$

При  $x = 0, t = t_0$  и  $C = \frac{bt_0^2}{2} + t_0$ .

Подставляя значение  $C$  в уравнение (9) и решая относительно  $t$ , получаем следующее уравнение температурной кривой:

$$t_x = -\frac{1}{b} + \sqrt{\left( t_0 + \frac{1}{b} \right)^2 - \frac{q_v x^2}{\lambda_0 b}} \quad (10)$$

В результате получена математическая модель, предназначенная для контроля температурных параметров области, содержащей множество источников тепловыделений.

## III. РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЙ ЧАСТИ ДЛЯ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТЕЛ С ВНУТРЕННИМИ ИСТОЧНИКАМИ ТЕПЛОТЫ

В современных системах измерения используются различные виды реализации программно-аппаратной части систем измерения, предназначенных для контроля и управления температурным режимом бортовой космической аппаратуры. Существующие системы измерения характеризуются широким спектром выполняемых задач в области обеспечения нормального теплового режима бортовой РЭА.

В работе предложен вариант расчета теплового режима участка печатной платы с высоким тепловыделением. В

большинстве случаев при выводе космического аппарата на орбиту в его электронно-компонентной части возникают значительные тепловые перегрузки, характеризующиеся нестационарным режимом работы элементов. Представленная на рис. 2 программа расчета температуры участка проводника предназначена для выявления на ранних стадиях проектирования критически нестабильных участков печатной платы.

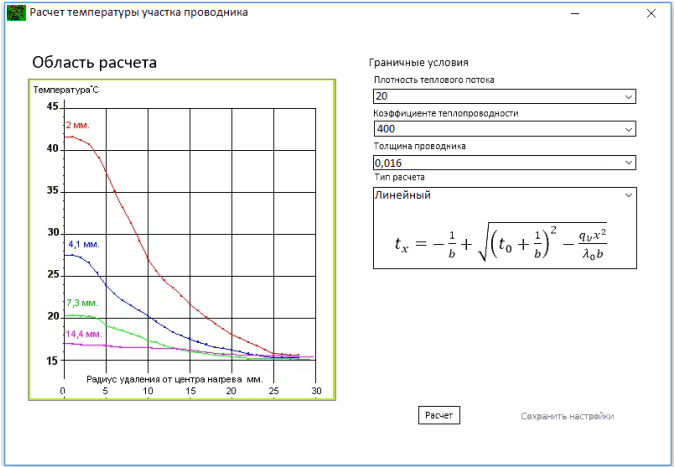


Рис. 2. Программа расчета температуры участка печатной платы

В основе программы лежит математическая модель для расчета теплового режима участка печатной платы с высоким тепловыделением. Используя представленную программу расчета, разработчик печатной платы уже на ранних стадиях проектирования имеет возможность рассчитать тепловой режим ПУ, для разрабатываемой конструкции, и внести необходимые корректировки. В большинстве случаев ЭРИ РЭА РКТ имеют импульсные режимы работы, что является ухудшающим фактором при тепловом анализе. Сложность теплового расчета при импульсных режимах работы заключается в том, что РЭА РКТ имеет неустановившийся тепловой режим. Следовательно, расчет проводится для определенного диапазона температур, которые потенциально способны привести к выходу из строя бортовой РЭА.

#### IV. БЛОК-СХЕМА АЛГОРИТМА МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ РЭА РКТ ДЛЯ ПОДДЕРЖАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ В ЖЕСТКИХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Предложенная методика контроля теплового режима ПУ базируется на алгоритме поддержки работоспособности РЭА РКТ в жестких условиях эксплуатации. Рассмотрим основные элементы алгоритма, представленного на рис. 3. Отличительной особенностью алгоритма является разделение плоскости печатной платы на элементарные квадраты со стороной, равной расстоянию между осями соседних печатных проводников. На каждом этапе алгоритма выбирается «Элемент», для которого определяется тепловой режим при заданных условиях эксплуатации.

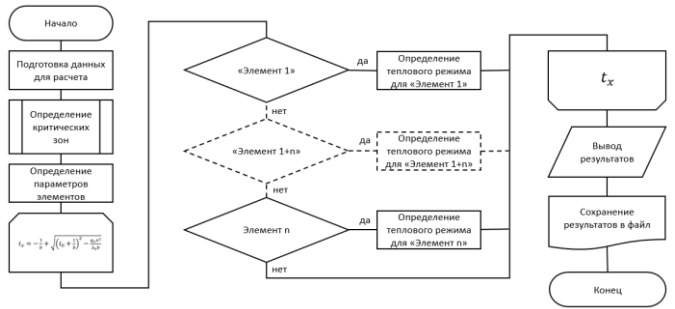


Рис. 3. Блок-схема алгоритма методики контроля параметров РЭА РКТ для поддержания работоспособности в жестких условиях эксплуатации

В результате работы алгоритма разработчик получает данные о возникающих температурных полях и температуре элементов на ПП.

#### V. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТЕЛ С ВНУТРЕННИМИ ИСТОЧНИКАМИ ТЕПЛОТЫ

Следующим этапом является внедрение программной части в процесс разработки печатной платы, структурная схема которого в упрощенном виде представлена на рис. 4.

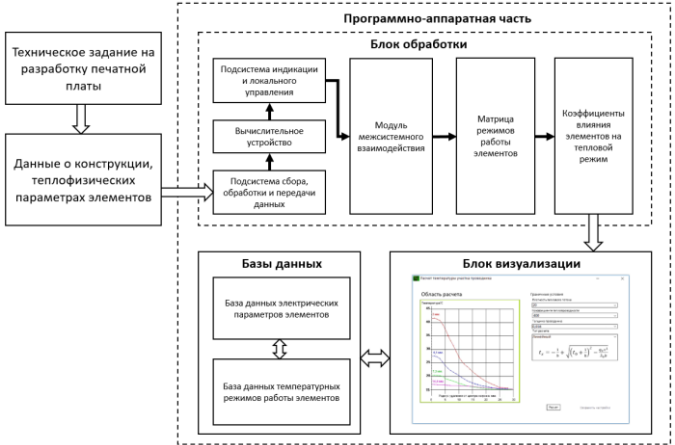


Рис. 4. Структурная схема методики расчета теплопроводности тел с внутренними источниками теплоты

Основными блоками структурной схемы методики расчета теплопроводности тел с внутренними источниками теплоты являются блок обработки, базы данных и блок визуализации, что в совокупности представляет собой программно-аппаратную часть методологии обеспечения нормального теплового режима РЭА. В блоке обработки происходит процесс сбора и передачи данных на вычислительное устройство, где с помощью встроенной подсистемы индикации и локального управления происходит детектирование температурных полей с помощью инфракрасных датчиков измерения температуры. В момент измерения ПУ находится под нагрузкой и, как минимум, на него должно быть подано напряжение питания. Для достижения максимально допустимой точности измерений ПУ должен находиться в сигнальном режиме работы. В модуле межсистемного

взаимодействия происходит корреляция полученных данных о температурных полях, объединяющиеся в матрицу режимов работы элементов. В результате получаем коэффициенты влияния элементов на тепловой режим. Полученные данные передаются в блок визуализации, в котором с помощью баз данных электрических параметров и температурных режимов работы элементов преобразуются в оптимальный для разработчика вид. Таким образом, реализована методология обеспечения нормального теплового режима РЭА с применением точных средств измерения и программно-аппаратной поддержкой.

## VI. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ПЕЧАТНОГО УЗЛА

Примером использования разработанной методологии является расчет теплового режима ПУ типовой конструкции РЭА, предназначенной для использования в РКТ. На рис. 5 представлена диаграмма распределения температур для случаев расчета теплового режима ПУ без учета проводников ПП и ее элементов и с их учетом.

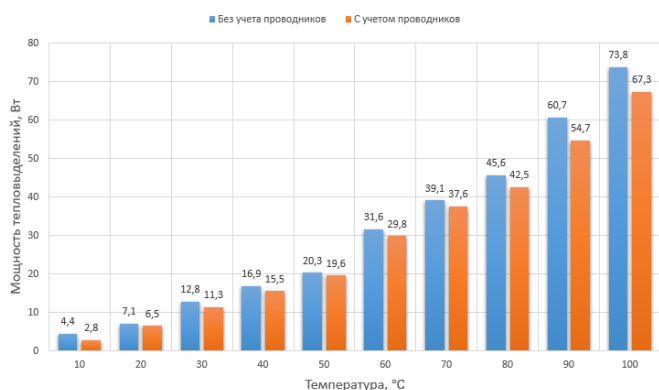


Рис. 5. Диаграмма зависимости мощности тепловыделений от температуры

Анализ диаграммы показал, что при температуре 10°C мощность тепловыделения без учета проводников ПП и ее элементов составляет 4,4 Вт, а с их учетом 2,8 Вт. При 60°C мощность тепловыделения без учета проводников ПП и ее элементов составляет 31,6 Вт, а с их учетом 29,8 Вт, при 90°C мощность тепловыделения без учета проводников ПП и ее элементов составляет 60,7 Вт, а с их учетом 54,7 Вт. Таким образом, разработанная методология обеспечения нормального теплового режима РЭА за счет применения точных средств измерения с программно-аппаратной поддержкой позволяет увеличить отвод теплового потока от ПП до 8%.

## VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований была разработана методология обеспечения нормального теплового режима РЭА. Полученных результатов удалось достичь за счет

применения инфракрасных датчиков измерения температуры, данные с которых передаются в программно-аппаратную часть в виде распределения температурных полей с последующим их анализом при помощи разработанной математической модели расчета температур для области ПУ с высокой концентрацией источников тепловыделений. Программно-аппаратная часть базируется на алгоритме поддержки работоспособности РЭА РКТ в жестких условиях эксплуатации, который в совокупности с базами данных электрических параметров и температурных режимов работы элементов позволяет увеличить отвод теплового потока от ПУ до 8%. Разработанный комплекс методологического обеспечения с программно-аппаратной поддержкой, который является универсальным инструментом для теплофизического конструирования и обеспечения стабильной работы при разработке РЭА РКТ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. Москва: Издательство Высшая школа, 1984. 247 с.
- [2] A.K. Grishko, N.V. Goryachev, I.I. Kochegarov and M.P. Kalaev, "Mathematical models of the system of measurement and analysis of temperature parameters of radio electronic modules," 2016 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE), Novosibirsk, 2016, pp. 112-115. DOI: 10.1109/APEIE.2016.7806424.
- [3] M.Yu. Mikheev, T.V. Zhashkova, A.B. Shcherban, A.K. Grishko, I.M. Rybakov. Generalized structural models of complex distributed objects. Proceedings of 2016 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTS 2016. 2017. DOI: 10.1109/EWDTS.2016.7807742
- [4] Rybakov I.M., Goryachev N.V., Kochegarov I.I., Grishko A.K., Brostilov S.A., & Yurkov N.K. (2017). Application of the model of the printed circuit board with regard to the topology of external conductive layers for calculation of the thermal conditions of the printed circuit board. Journal of Physics: Conference Series, 803(1). DOI:10.1088/1742-6596/803/1/012130.
- [5] Данилова Е.А., Кочегаров И.И., Трусков В.А. Модели технологических дефектов проводящего рисунка печатных плат // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 2 (18). С. 68-76. DOI: 10.21685/2307-4205-2017-2-12
- [6] Тюгашев А.А. Подход к обеспечению отказоустойчивости космических аппаратов на основе автоматизации проектирования интеллектуальных бортовых программных средств // Надежность и качество сложных систем. 2016. № 4 (16). С. 106-112. DOI: 10.21685/2307-4205-2016-4-15
- [7] Литвинов А.Н., Хади О.Ш., Юрков Н.К. Исследование состояния плат радиоэлектронных систем при тепловых воздействиях // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2015. № 2. С. 182-191.
- [8] Рыбаков И.М. Алгоритм исследования теплового режима печатной платы // Труды международного симпозиума Надежность и качество. 2017. Т. 1. С. 362-364.
- [9] Кочегаров И.И., Таньков Г.В. Программный пакет моделирования механических параметров печатных плат // Труды международного симпозиума Надежность и качество. 2011. Т. 2. С. 335-338.
- [10] Устинова М.В. Ключевые принципы моделирования сложных систем // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. 2017. Т. 3. С. 143-146.