

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСА ТОКА НА МНОГОСЛОЙНУЮ СТРУКТУРУ ОГРАНИЧИТЕЛЯ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ

Г.Б. Стеганов, Д.Л. Каргу, В.А. Власов
(Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского)

Г.А. Коршунов
(ООО «НПО «Дельта»)

Предложен анализ специализированного ограничителя напряжения блока фильтров защиты цепей питания космического аппарата от импульсных перенапряжений. Рассмотрено решение системы разностных уравнений. Представлены результаты тестового численного решения поставленной задачи, позволяющие определять параметры гарантированного отказа специализированного ограничителя напряжения и схемы защиты на его основе при воздействии мощных импульсов тока.

Ключевые слова: ограничитель напряжения, многослойная структура, нестационарный тепловой режим, сеточная модель, отказоустойчивость.

Анализ условий функционирования ряда космических аппаратов (КА), например, «Электро-Л» и «Спектр-Р», и конструктивной реализации их солнечных батарей свидетельствует о значительной электризации корпуса КА и элементов его конструкции. Накопление заряда приводит к периодическим высоковольтным электростатическим разрядам, протекающим между защитными стеклами фотопреобразователей и металлизированными поверхностями («корпусом») КА, а также между корпусами приборов и шинами питания комплекса автоматики и стабилизации. Напряжение разряда может достигать десятков киловольт и генерировать мощные помеховые импульсы в цепи питания бортовой аппаратуры. Аналогичные последствия могут иметь и искусственные внешние электромагнитные воздействия на КА. В то же время допустимая разность потенциалов между отрицательной шиной питания КА и его корпусом по условиям нормального функционирования аппаратуры приборного комплекса КА составляет десятки вольт [1].

Ограничить возникающие помеховые импульсы можно, в частности, путём установки блока фильтров защиты в центральных распределительных шинах питания, а также между минусовой шиной питания и корпусом КА.

Для защиты от импульсных перенапряжений необходимо использовать ограничители напряжения – разрядники, варисторы, TVS-диоды, TVS-тиристоры. Общей особенностью таких устройств является наличие многослойной структуры (собственно устройство полупроводников и особенности конструкции ограничителей (колонки варисторов)). Предельная защитная способность таких устройств определяется предельной рассеиваемой

мощностью, зависящей от частоты следования, амплитуды, длительности, скважности и других параметров импульсов перенапряжения. Для корректного определения защитной способности специализированных ограничителей напряжения необходим анализ нестационарных тепловых режимов ограничителя при прохождении через него мощных импульсов тока, которые генерируют в его слоистой структуре значительные тепловые потоки.

Разработанные в настоящее время математические модели процессов в многослойных структурах удовлетворительно описывают тепловые процессы в слоистых тонких структурах, если эти структуры удастся корректно заменить эквивалентными тонкими пластинами или их совокупностью [2]. Для решения задач анализа нестационарных тепловых режимов в многослойных структурах классические непрерывные модели приводят к трудоёмким алгоритмам с приближённым вычислением многих сумм бесконечных рядов. Оценивание погрешности вычисления таких рядов является достаточно сложной задачей [3, 4]. При необходимости учёта зависимостей теплофизических характеристик слоёв от их температур задача становится нелинейной и трудоёмкость её решения дополнительно возрастает. В связи с этим решение задачи аналитическим методом представляется достаточно трудным.

В связи с вышеизложенным возникает необходимость разработки численного метода решения задачи определения динамики изменения поля температур ограничителя напряжения, переходящего в режим ограничения напряжения, при воздействии на него мощных импульсов тока.

Для того чтобы ограничиться постановкой и решением одномерной задачи нестационарной



Рис. 1. Геометрическая структура и материалы слоёв объекта

теплопроводности, при этом выбирая наиболее важные для анализа сечения с учётом симметрии анализируемого неоднородного тела, необходимо принять, что площадь теплоконтактной поверхности имеет размеры, превышающие размеры слоёв исследуемой структуры.

Тогда постановка задачи определения динамики изменения поля температур в слоистой структуре при изложенном ограничении будет следующей.

Пусть известны геометрическая структура объекта (количество слоёв, толщина материала – рис. 1), теплофизические характеристики материалов и их температурные зависимости для каждого слоя, форма и параметры импульса воздействия, определяющие плотность воздействующего теплового потока $q_{sp}(t)$, как функция времени, начальное распределение температур слоёв и условия теплообмена с окружающей средой.

Пусть направление теплового воздействия совпадает с направлением оси AB (см. рис. 1). Так как заранее степень влияния условий внешнего теплообмена на искомые температурные поля неизвестна, необходимо принять условие, что теплообменными поверхностями являются только поверхности A и B (рис. 1), причём для них характерен кондуктивный (A) и конвективный (A, B) теплообмен.

При решении задачи были приняты следующие допущения:

- градиент температуры в направлении, перпендикулярном оси AB , равен нулю;
- материалы слоёв однородны и изотропны по

теплофизическим свойствам;

- термическое сопротивление на границах контакта разных материалов равно нулю;
- энергия импульса воздействия выделяется равномерно в слое 1 конечной толщины, в остальных слоях тепловыделение отсутствует;
- многократные внутренние отражения в слоях структуры отсутствуют.

Требуется определить зависимости температур заданных характерных точек слоёв объекта, как функций времени от начала воздействия.

Для решения поставленной задачи необходимо решить систему нелинейных одномерных уравнений теплопроводности многослойного тела, расчётное число n слоёв которого может превышать фактическое (за счёт разбиения более толстых слоёв на несколько более тонких с целью обеспечения требуемых точностных характеристик решения [3, 4, 6]). Таким образом, система дифференциальных уравнений теплового баланса с граничными и начальными условиями для её решения может быть представлена в следующем виде:

$$\lambda_{Эi} \frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} + q_{vi}(t) = \gamma c \frac{\partial T_i}{\partial t}, \quad i = 1;$$

$$q_{vi}(t) = \begin{cases} q_{vi}, & 0 \leq t \leq t_n; \\ 0, & t > t_n; \end{cases} \quad (1)$$

$$\lambda_{Эi} \frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} = \gamma c \frac{\partial T_i}{\partial t}, \quad i = 2, n$$

с граничными (краевыми) условиями:

$$\text{IV рода } \lambda_{\text{Э}i} \frac{\partial T_i}{\partial x} \Big|_{x=+0} = \lambda_{\text{Э}i-1} \frac{\partial T_{i-1}}{\partial x} \Big|_{x=-0}, \quad i = 1, n-1;$$

$$\lambda_{\text{Э}n} \frac{\partial T_i}{\partial x} \Big|_{x=-0} = h_c (T_n - T_{x=+0}), \quad i = 1;$$

III рода

$$\lambda_{\text{Э}1} \frac{\partial T_i}{\partial x} \Big|_{x=+0} = h_c (T_1 - T_{x=+0}), \quad i = 1,$$

при известных начальных условиях:

$$T_i(0) = T_{\text{НАЧ}i}, \quad i = 1, n,$$

$$T_{\text{АМВ}} = \text{const} = T_{\text{ИНФ}},$$

где $L_i, \lambda_i, c_i, \rho_i$ – толщина и теплофизические характеристики слоя (коэффициент теплопроводности, удельная теплоёмкость и плотность материала слоя); q_V – плотность теплового потока; Δt – шаг по времени; h_c – коэффициент конвективной теплоотдачи; t_i – длительность импульса воздействия.

Решение задачи (1) предлагается искать сеточным методом с привлечением неявной конечно-разностной схемы [4, 6].

Для этого реальную слоистую структуру объекта необходимо представить в виде сеточной модели, узлы которой расположены в центре каждого из слоёв в общем случае неодинаковой толщины (рис. 2). Температуры в узлах – неизвестные искомые функции времени.

Переход от дифференциальных уравнений (1) к уравнениям в конечных разностях по неявной схеме осуществляется, исходя из уравнений баланса энергии для любого узла сетки:

$$\sum_{i \neq j}^n q_{i \rightarrow j} = \frac{\partial U_j}{\partial t}, \quad (2)$$

где U_j – коэффициент теплоусвоения узла.

Из этого выражения (для краткости обозначая температуры в узлах в моменты времени t и $t + \Delta t$ как T_i^t и $T_i^{t+\Delta t}$ соответственно) можно получить следующие разностные уравнения баланса.

Из формулы (2) для первого граничного узла ($i = 1$):

$$\frac{1}{R_{12}} (T_2^{t+\Delta t} - T_1^{t+\Delta t}) + h_c (T_{\text{ИНФ}}^{t+\Delta t} - T_1^{t+\Delta t}) + \frac{q_V(t)}{L_1} = \mu_1 (T_1^{t+\Delta t} - T_1^t), \quad (3)$$

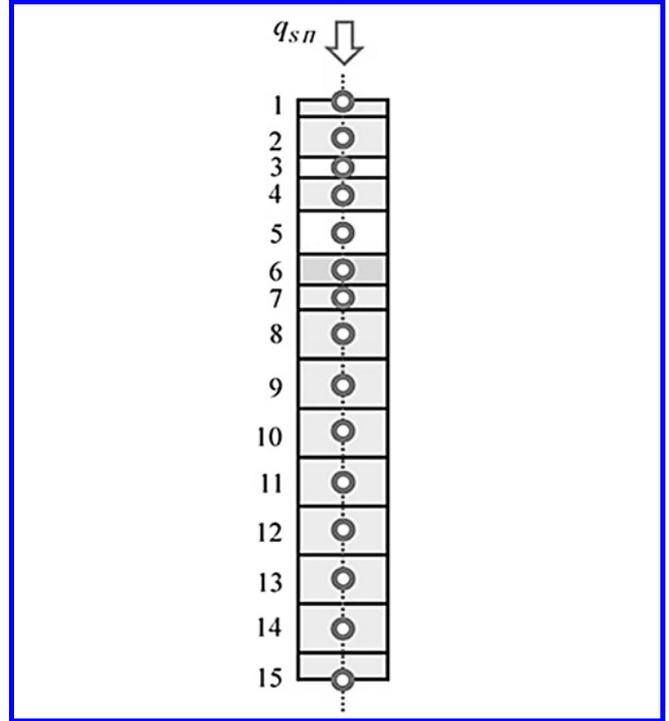


Рис. 2. Сеточная модель слоистой структуры ограничителя

$$\text{где } R_{12} = \frac{L_1}{\lambda_1} + \frac{L_2}{2\lambda_2}, \quad \mu_i = \frac{c_i \gamma_i L_i}{\Delta t}.$$

Для i -го (внутреннего) узла:

$$\frac{1}{R_{i1}} (T_{i-1}^{t+\Delta t} - T_i^{t+\Delta t}) + \frac{1}{R_{i2}} (T_{i+1}^{t+\Delta t} - T_i^{t+\Delta t}) = \mu_i (T_i^{t+\Delta t} - T_i^t), \quad (4)$$

$$\text{где } R_{i2} = \frac{1}{2} \left(\frac{L_i}{\lambda_i} + \frac{L_{i-1}}{\lambda_{i-1}} \right); \quad R_{i1} = \frac{1}{2} \left(\frac{L_i}{\lambda_i} + \frac{L_{i+1}}{\lambda_{i+1}} \right).$$

Для n -го граничного узла ($i = n$):

$$\frac{1}{R_{n2}} (T_n^{t+\Delta t} - T_{n-1}^{t+\Delta t}) + h_c (T_{\text{ИНФ}}^{t+\Delta t} - T_n^{t+\Delta t}) = \mu_n (T_n^{t+\Delta t} - T_n^t). \quad (5)$$

После преобразований можно получить систему разностных уравнений тепловой модели (3) – (5) в виде:

$$\begin{cases} a_{11}T_1 + a_{12}T_2 + a_{13}T_3 + \dots + a_{1n}T_n = b_1; \\ a_{21}T_1 + a_{22}T_2 + a_{23}T_3 + \dots + a_{2n}T_n = b_2; \\ \dots \\ a_{n1}T_1 + a_{n2}T_2 + a_{n3}T_3 + \dots + a_{nn}T_n = b_n, \end{cases} \quad (6)$$

где $T_i^t = T_i^{t+\Delta t}$ или в матричной форме

$$AT(t + \Delta t) = B, \tag{7}$$

из чего следует

$$T(t + \Delta t) = A^{-1}B. \tag{8}$$

Пусть $C = A^{-1}$. Тогда искомые температуры в момент $(t + \Delta t)$:

$$\begin{aligned} c_{11}b_1 + c_{12}b_2 + c_{13}b_3 + \dots + c_{1n}b_n &= T_1; \\ c_{21}b_1 + c_{22}b_2 + c_{23}b_3 + \dots + c_{2n}b_n &= T_2; \\ &\dots \\ c_{n1}b_1 + c_{n2}b_2 + c_{n3}b_3 + \dots + c_{nn}b_n &= T_n. \end{aligned} \tag{9}$$

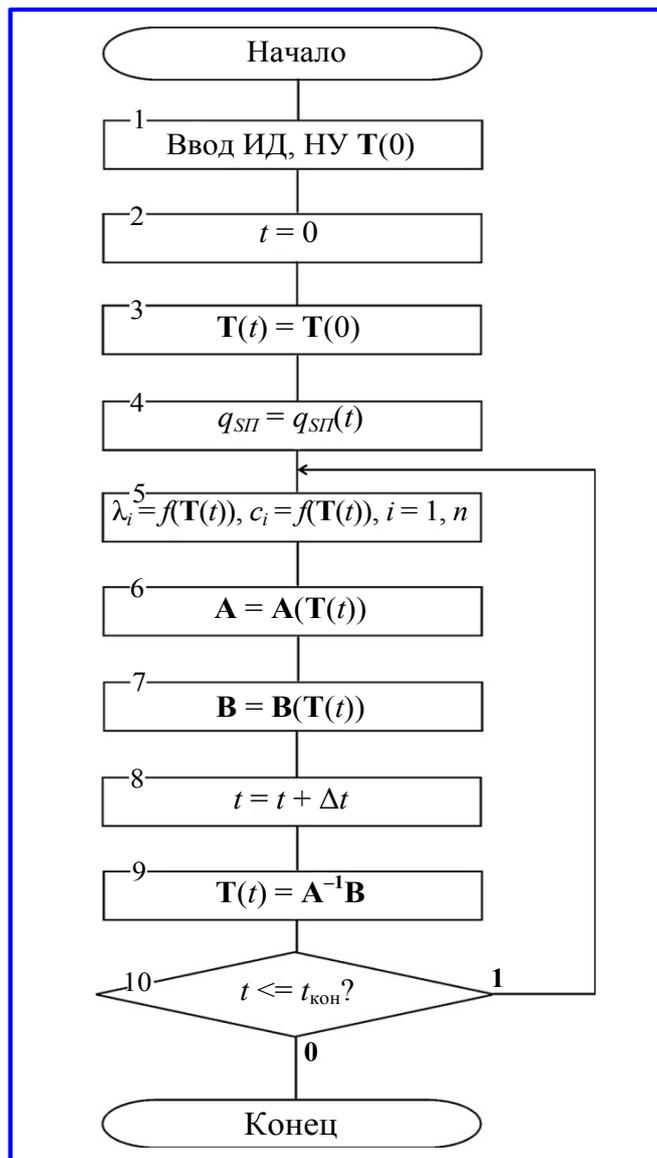


Рис. 3. Алгоритм решения сеточной задачи методом конечных разностей по неявной схеме

Таблица 1

ID материала	γ , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	c , Дж/(кг·К)
1	2500	0,745	840
2	2300	1,26	760
3	2800	0,81	840
4	2330	1,1	670
5	2300	1,26	760

На рис. 3 представлен алгоритм решения данной задачи на основе формул (3) – (9).

После ввода исходных данных и начальных условий (блоки 1 – 3) вычисляется текущая плотность теплового потока воздействия и производится вычисление теплофизических характеристик слоев как функций текущей температуры. Затем вычисляются текущие значения коэффициентов матриц A и B . Далее текущее время увеличивается на величину Δt и находится вектор температур в узлах на последующий момент времени $(t + \Delta t)$. Расчёты повторяются до достижения заданного времени окончания процесса расчёта.

Достоинством полученной модели является то, что в её основе лежат всевозможные виды уравнений теплообмена между слоями: уравнение (3) с внутренними источниками тепла (с теплоподводом), уравнение (5) с теплоотводом (в данном случае конвективным) и уравнение (4), описывающее только теплопередачу между слоями. Исходя из этого на основе этих уравнений может быть описан любой процесс теплообмена для каждого слоя произвольной многослойной структуры, что делает модель универсальной. Для каждого следующего узла сетки в качестве исходных данных используются результаты расчёта предыдущего узла, что позволяет достаточно легко перестраивать модель при изменении, как характера теплообмена, так и структуры самого слоя (например, при фазовых переходах вещества, формирующего слой).

После решения задачи был выполнен проверочный расчёт объекта с использованием сеточной модели (15) – (17) для исходных данных, соответствующих тепловой перегрузке исследуемого объекта в целом [5].

Характеристики материалов слоев объекта при стандартном значении температуры приведены в табл. 1, где ID – идентификаторы (номера) материалов слоёв.

Характеристики материалов слоёв объекта

Исходные данные, принятые в расчётах, сведены в табл. 2.

Исходные данные исследуемого объекта

Графики зависимости температур в узлах ограничителя перенапряжений от времени приведены на рис. 4. Начальный момент времени соответствует моменту начала теплового воздействия.

Из графиков видно, что наиболее уязвимыми к тепловому воздействию являются «тонкие» приповерхностные слои, а более «толстые» слои становятся менее уязвимыми. Это может стать причиной взрывного расслоения (растрескивания) частей многослойной структуры вследствие интенсивного теплового воздействия с последующим отказом всего прибора (диодной матрицы). Однако более точные выводы могут быть сделаны после перехода от рассмотренной к двумерной тепловой динамической модели, которая более точно отражает некоторые свойства объекта, например, неоднородность тепловыделения по сечению объекта [3].

Полученных результатов моделирования (рис. 4, 5) достаточно для определения критериальных параметров, при которых наступает гарантированный отказ объекта, а также параметры, при которых вероятность наступления отказа выше заданного порогового значения.

Таблица 2

Диапазон изменения плотности потока теплового воздействия от импульсов большого тока [4]	$q_{СП} = 10^3 \dots 10^7$ Вт/м ²
Шаг по времени	$\Delta t = 10^{-4}$ с
Коэффициент пропускания	$\rho = 0,5$
Длительность импульса (прямоугольная аппроксимация формы)	$t_{и} = 1 \dots 30$ мс
Начальные температуры в узлах ограничителя перенапряжений и температура газовой среды	$T_{нач} = T_{INF} = 20^\circ\text{C}$
Коэффициент конвективной теплоотдачи	$h_c = 25$

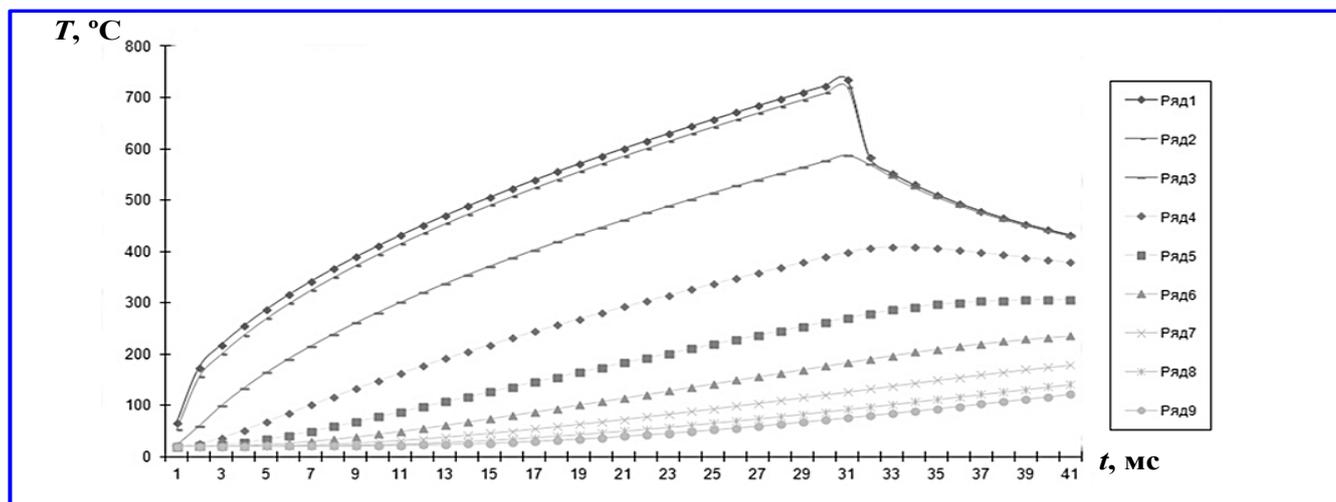


Рис. 4. Результаты решения задачи для плотности потока $q_{СП} = 10^5$ Вт/м²

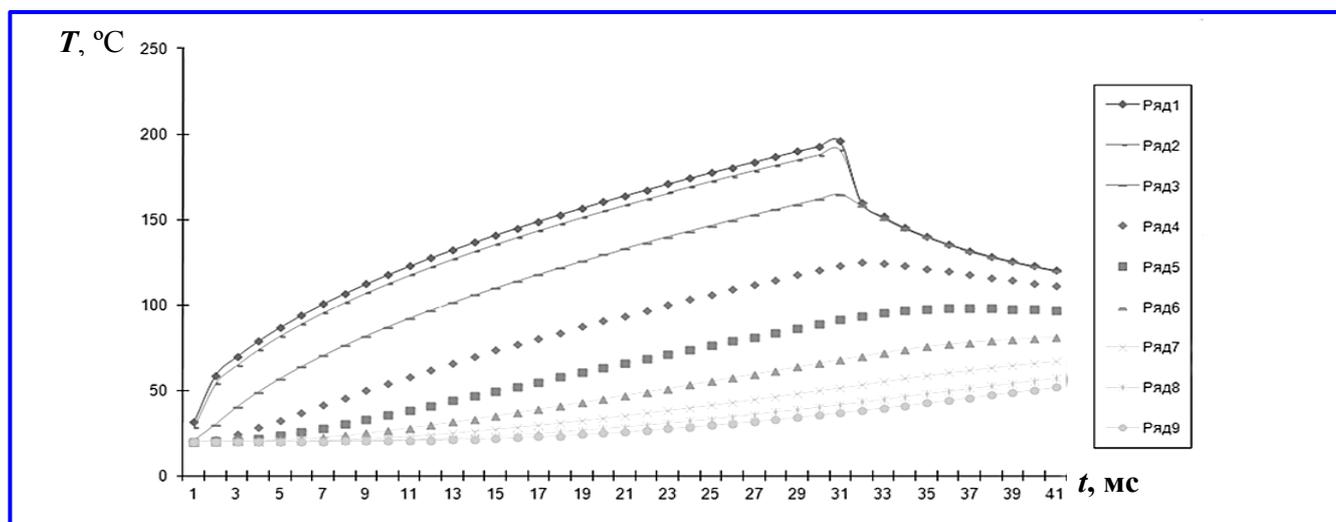


Рис. 5. Результаты решения задачи для плотности потока $q_{СП} = 10^7$ Вт/м²

Температура плавления кремния при нормальных условиях составляет 1415°C (при нагревании выше 800°C он становится пластичным), а температура плавления германия при нормальных условиях составляет 937,6°C. Температура плавления оксида кремния (обычного стекла) составляет 1680 – 1728 °C (в зависимости от условий), а температура плавления нитрида кремния составляет 1900°C. При этом при температуре выше 1850°C возникает термическая диссоциация (разложение) нитрида кремния на азот и чистый кремний.

Анализ рис. 4 позволяет предположить, как наличие предпосылок к растрескиванию слоёв ограничителя напряжений, так и предпосылок к нарушению структуры кристалла вследствие проявления пластичности кремния под действием сил поверхностного натяжения.

Анализ рис. 5 позволяет предположить нарушение структуры кристалла вследствие приближения к температуре плавления оксида кремния (ряды 1, 2), а также значительного превышения температуры плавления чистого кремния (ряд 3). Несмотря на то, что фаза плавления в данной модели не учтена для её упрощения, данный результат не исключает растрескивания и пластических деформаций оставшихся слоёв ограничителя напряжения.

Результаты тестового численного решения поставленной задачи с произвольными, но лежащими в реальных диапазонах исходными данными, показывают, что разработанная модель позволяет определять параметры импульсных перенапряжений, соответствующие гарантированному отказу специ-

ализированного ограничителя напряжения и схемы защиты на его основе.

При обобщении модели поглощения тепла слоистой полупроводниковой структурой и тепловой сеточной модели для той же структуры в заданных условиях применения можно строить общие модели оценки уязвимости схем защиты различных типов к заданным условиям применения. Оценку отказоустойчивости в этом случае целесообразно производить путём сравнения результатов моделирования с паспортными характеристиками специализированных ограничителей или экспериментальными данными по их отказоустойчивости.

Литература

1. Создание блока защиты от воздействия электростатических разрядов на шины питания космических аппаратов / Ю. В. Мозговой, И. А. Сверчков // Электронные и электромеханические системы и устройства: сб. науч. тр. – Томск : Изд-во НТЛ, 2011. – С. 154 – 159.
2. Григорьев Б. А., Голубков А. И., Григорьев С. Б. Таблицы для расчёта нестационарных температур плоских тел при радиационном нагреве / Б. А. Григорьев, А. И. Голубков, С. Б. Григорьев. – М. : Наука, 1987. – 431 с.
3. Дульнев Г. Н., Парфенов В. Г., Сигалов А. В. Применение ЭВМ для решения задач теплообмена / Г. Н. Дульнев, В. Г. Парфенов, А. В. Сигалов. – М. : Высшая школа, 1990. – 207 с.
4. Пасконов В. М., Полежаев В. И., Чудов Л. А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена / В. М. Пасконов, В. И. Полежаев, Л. А. Чудов. – М. : Наука, 1984. – 288 с.
5. Грозозащита радиоэлектронных средств : справочник / В. И. Кравченко. – М. : Радио и связь, 1991. – 264 с. : ил.
6. Математические модели и методы в расчётах на ЭВМ / Г. М. Прусаков. – М. : Физматлит, 1993. – 144 с.

Поступила в редакцию 23.01.2014

Геннадий Борисович Стеганов, канд. техн. наук, доцент, т. (812) 347-96-22,
e-mail: sgb022.steganov@yandex.ru.

Дмитрий Леонидович Каргу, канд. техн. наук, доцент, т. (812) 347-95-22,
e-mail: Dmitrii_kargu@mail.ru.

Вячеслав Александрович Власов, канд. техн. наук, т. (812) 347-96-22,
e-mail: vlasovsl@rambler.ru.

Георгий Анатольевич Коришунов, зам. генерального директора, т. (812) 369-59-26,
e-mail: Dmitrii_kargu@mail.ru,