

данным методам. В связи с высокой вероятностью получения недостоверных результатов моделирования, для особо ответственных расчетов, таких как расчет уставок релейной защиты и автоматики (РЗА), такие средства моделирования не применяются, а используются программные комплексы (АРМ СРЗА), с помощью которых рассчитываются установившиеся аварийные режимы. За счет целенаправленных допущений, связанных с исключением переходных процессов, возникает необходимость применять приближенную коррекцию результатов с помощью обобщенных коэффициентов. Ввиду вышеизложенного перспектива радикального решения проблем адекватности моделирования ЭЭС, с помощью используемых в настоящее время средств, не просматривается. Единственным способом получения приемлемых практических результатов, в определенном диапазоне процессов, посредством существующих программных комплексов является их надежная верификация. В настоящее время можно надежно и достоверно обеспечить верификация расчетов установившихся режимов используя *достоверизированные* данные оперативно-измерительных комплексов ЭЭС, SCADA-систем и т.п. Проблема возникает с верификацией расчетов переходных процессов. Для получения данных о переходных процессах объявлена и постепенно реализуется программа РАО "ЕЭС России" о внедрении системы мониторинга переходных режимов (СМНР) [3], которая предполагает: установку аварийных регистраторов на всех значимых присоединениях ЭЭС, организацию информационно-управляющей системы по синхронному сбору и хранению получаемой информации. Данное мероприятие является весьма затратным и рассчитанным на длительный временной период, связанный с накоплением информации о всевозможных нормальных и аномальных процессах в оборудовании и в ЭЭС в целом. Одним из альтернативных направлений верификации существующих ПК представляется подход, основанный на сравнение существующих ПК со средствами, которые позволяют методически точно, с гарантированной инструментальной погрешностью, на неограниченном временном интервале решать системы дифференциальных уравнений любой жесткости, нелинейности и дифференциального порядка. Если весь непрерывный спектр всевозможных нормальных и аномальных процессов в ЭЭС воспроизводится в результате методически точного, непрерывного решения в реальном времени всегда одной и той же математической модели ЭЭС, то любой воспроизводимый установившийся режим является результатом решения этой математической модели и представляет собой одну из составляющих всевозможного нормального и аномального спектра процессов, в частности при частоте  $f=50$  Гц. Так как происходит непрерывное, бездекомпозиционное, методически точное решение математической модели, то экспериментальную точность воспроизведения установившегося режима можно распространять на весь рабочий диапазон частот  $0 \div 1000$  Гц. При этом достоверность полученных экспериментальных результатов устанавливается путем сравнения с данными контрольных диспетчерских замеров установившегося режима любой реальной ЭЭС. Данным средством может выступать Всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем (ВМК РВ ЭЭС), созданный на базе Энергетического института Томского политехнического университета [4].

#### Список литературы:

1. Веников В.А. Теория подобия и моделирование применительно к задачам электроэнергетики. –М.: Высш. шк., 1966. –487с.
2. Щедрин Н.Н. Упрощение электрических систем при моделировании. –М. –Л.: Энергия, 1966. –156с.
3. Приказ № 344 от 01.06.05 г. ОАО РАО «ЕЭС России» «О создании системы мониторинга переходных режимов ЕЭС/ОЭС».
4. Боровиков Ю. С., Гусев А. С., Сулайманов А. О. Принципы построения средств моделирования в реальном времени интеллектуальных энергосистем // Электричество. – 2012. - №6. – С.10 – 13.

#### Анализ показателей надежности выпрямительного диода МД1-950-44-Е в корпусе М.Е1.

*Анисимов Н.С., Кравченко Е.В.*

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*

Современные полупроводниковые выпрямительные модули выдерживают средний переменный ток до 807А при температуре +85°С (частота 50Гц, в течение полупериода), напряжение до 2600В и имеют изолированный корпус с напряжением изоляции 3000В АС в течение 1 мин, соответствующий промышленным требованиям и стандартам

электробезопасности Российской Федерации. С помощью прижимных болтов с резьбой М5 осуществляется удобный и надежный контакт клемм модуля с силовыми токоведущими проводниками.

Среди сфер применения для новых модулей можно отметить:

1. устройства плавного пуска электродвигателей и другого оборудования с высокими пусковыми токами;
2. промышленные электроприводы, преобразователи напряжения для ветрогенераторов;
3. источники питания и сварочные аппараты.

Модель выпрямительного диода МД1-950-44-Е в корпусе М.Е1. представлена на рис. 1.

Области применения:

1. регуляторы переменного тока (например, для контроля температуры, регулирования скорости вращения двигателя постоянного тока);
2. управляемые ключи в узлах радиоэлектронной аппаратуры;
3. станкостроение (управление асинхронными двигателями в ключевом режиме);
4. силовоточные реле.



Рис.1 Выпрямительный диод МД1-950-44-Е в корпусе М.Е1.

**Цель настоящей работы** – анализ интенсивностей отказов силовых полупроводниковых приборов (СПП) на основе численного моделирования нестационарных неоднородных полей температур при наличии одного локально расположенного источника тепловыделения в условиях естественной конвекции и рабочих температурах окружающей среды.

Анализ теплового режима работы проводился на основе типичного для силовой электротехники выпрямительный диода МД1-950-44-Е рис. 1. с температурой перехода  $T_{пер}=125^{\circ}\text{C}$ . (рис.2).

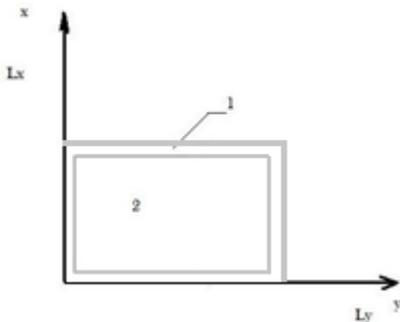


Рис. 2. Геометрия области решения (1,2 – области с различными теплофизическими характеристиками).

Математическая постановка задачи будет иметь

вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \left( \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} \right) + Q(x, y) \quad \left[ \begin{array}{l} 0 < x < l_1, 0 < y < H; \\ l_1 \leq x \leq l_1 + l_2, 0 < y < h_1, h_1 + h_2 < y < H; \\ l_1 + l_2 < x < L, 0 < y < H; \end{array} \right. \\ \rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \left( \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} \right) + Q(x, y), l_1 < x < l_1 + l_2, h_1 < y < h_1 + h_2 \end{array} \right. \quad (1)$$

Начальные и граничные условия запишутся следующим образом:

$$\begin{aligned}
 t = 0 : T = T_0, 0 \leq x \leq L, 0 \leq y \leq H; \\
 x = 0 : T = T_h, t > 0; \\
 x = L : T = T_c, t > 0; \\
 y = 0 : \frac{\partial T}{\partial y} = T_h, t > 0; \\
 y = H : \frac{\partial T}{\partial y} = T_c, t > 0;
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Проведено численное моделирование температурного поля в неоднородной пластине с размерами по осям  $x$  и  $y$  равными  $L_x$  и  $L_y$ .  $x \in [0; L_x]$ ,  $y \in [0; L_y]$ , где  $x, y$  – координаты.

Предполагалось, что модель (пластина) включает области с отличающимися теплофизическими характеристиками (табл.1). На краях пластины заданы граничные условия 3 рода [1].

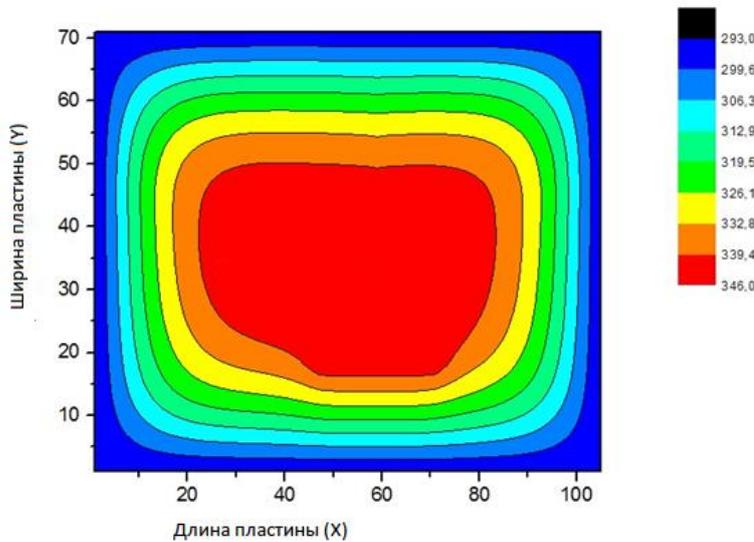
**Таблица 1.** Теплофизические свойства материалов (пластины)

Материал	$\lambda, \text{Вт/м}^{\circ}\text{К}$	$C, \text{кДж/кг}^{\circ}\text{К}$	$\rho, \text{кг/м}^3$
Полистирол	0.17	1110	1060
Кремний	149	800	2330

Основные допущения, используемые при постановке задачи:

1. Теплофизические характеристики материалов не зависят от температуры.
2. Тепловой контакт на границах между областями (1,2) считается идеальным.

Характерный вид температурного поля моделируемого объекта (диодного модуля) при



температуре окружающей среды  $T=25^{\circ}\text{C}$  в момент времени  $t=600$  с показан на рис.3 [2].

**Рис.3.** Температурное поле моделируемого объекта

**Постановка задачи прогнозирования показателей надежности СПП.**

Для анализа показателей надежности выпрямительного диода выбраны

математические модели – Аррениуса и мультипликативная модель [3].

Мультипликативная математическая модель оценки надежности диодного модуля :

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_{б.с.г.} \cdot K_p \cdot K_{дн} \cdot K_{\phi} \cdot K_{s1} \cdot K_{np} \cdot K_{\Sigma}
 \tag{3}$$

где:  $\lambda_{б.с.г.}$  – базовая интенсивность отказов силового прибора;  $K_p$  – коэффициент режима, зависящий от электрической нагрузки и температуры;  $K_{дн}$  – значение коэффициента  $K_{дн}$  в зависимости от максимально допустимой, установленной в ТУ, электрической нагрузки.  $K_{\phi}$  – коэффициент функциональной специфики режима работы прибора;  $K_{s1}$  – значения коэффициента  $K_{s1}$  в зависимости от величины рабочего напряжения относительно максимально допустимого по ТУ;  $K_{np}$  – коэффициент уровня качества прибора;  $K_{\Sigma}$  – коэффициент жесткости условий эксплуатации.

**Таблица 2.** Значения коэффициентов

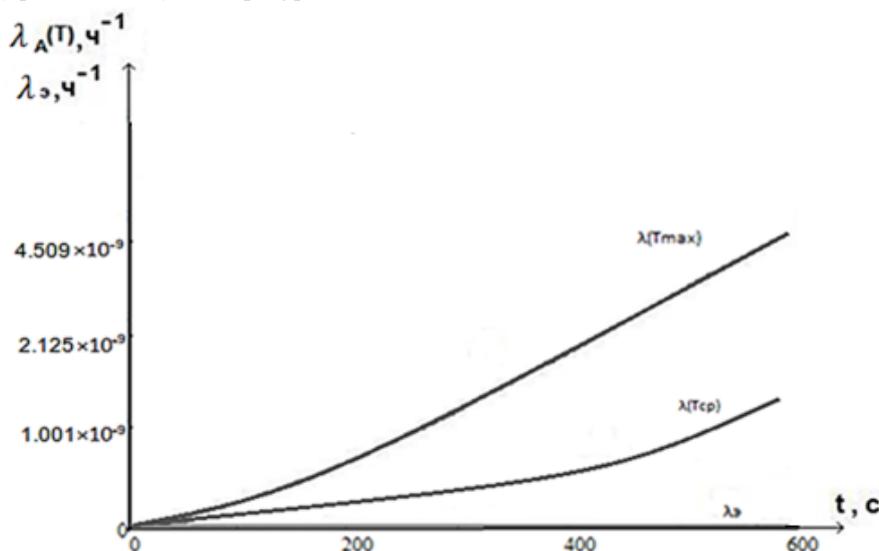
$\lambda_{б.с.г.}$	$K_p$	$K_{ди}$	$K_{ф}$	$K_{с/л}$	$K_{пр}$	$K_3$
0.1	0.0477	0.6	0.5	0.7	1	1

Модель Аррениуса для оценки надежности диодного модуля:

$$\lambda_A(T) = C \cdot \exp\left(\frac{-E}{kT}\right),$$

где:  $C$ -константа,  $E$  -энергия активации,  $k$ -постоянная Больцмана.

Результаты численного моделирования показателей надежности (интенсивности отказов) СПП приведены на рис. 5. Поведение функции интенсивности отказов  $\lambda(t)$  свидетельствует не только о значительных различиях в оценках надежности по моделям (3) и (4), но и о высокой степени зависимости прогностической модели Аррениуса (кривые  $\lambda(T_{max})$  и  $\lambda(T_{cp})$  на рис.4) от расчетной (принимаемой) температуры.



**Рис. 4.** Интенсивность отказов СПП при температуре окружающей среды  $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t=600\text{ с}$ . ( $\lambda_3$  – мультипликативная модель (1);  $\lambda(T_{cp})$  – модель Аррениуса (при  $T_{cp}$ );  $\lambda(T_{max})$  – модель Аррениуса (при  $T_{max}$ )

Анализ зависимостей представленных на рис.4 показывает, что численные значения  $\lambda(T_{max})$ , рассчитанные по модели Аррениуса (4), в 5 раз выше полученных по мультипликативной модели (3) для времени работы 600с. и температуры окружающей среды 25  $^{\circ}\text{C}$ . При этом для средней температуры по прибору показатель надежности ниже в 2 раза.

#### Заключение.

Использование мультипликативной модели (3) в оценках интенсивности отказов СПП приводит к значительному завышению эксплуатационного ресурса приборов.

Прогнозирование показателей надежности силовых полупроводниковых приборов необходимо проводить на основании анализа реального нестационарного неоднородного теплового режима прибора.

#### Список литературы:

1. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие. / Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 172 с.
2. Кузнецов Г.В., Кравченко Е.В. Анализ деструкции полимерного материала изделий электронной техники в условиях пространственной неоднородности температурных полей // Электромагнитные волны и электронные системы. 2014. №3. С. 4-12
3. Справочник «Надежность электrorадиоизделий» / Под ред. Прытков С.Ф., Горбачев В.М.
4. ГОСТ 27.301-95 Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения.