

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.34.6.017.72:622

В.Г. Каширских

РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ ВО ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННОМ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИИ

Наличие в окружающей среде угольных шахт взрывоопасных газов и угольной пыли, агрессивных компонентов и высокой влажности, частые перемещения электрооборудования или его размещение на подвижных объектах с высоким уровнем ударных и вибрационных нагрузок – все эти и другие факторы предъявляют жесткие требования к конструктивному исполнению взрывозащищенного электрооборудования на основе силовых полупроводниковых приборов (СПП), которое во многом определяется именно системой охлаждения СПП. Известные системы охлаждения СПП взрывозащищенного электрооборудования недостаточно эффективны [1]. Для решения этой задачи нами был проведен комплекс исследований, на основании которого разработаны системы кондуктивного, водяного и испарительного охлаждения СПП.

Выбор параметров системы охлаждения является одним из основных вопросов при проектировании взрывозащищенного электрооборудования на основе СПП.

В качестве основного теплоотводящего элемента для **кондуктивной системы охлаждения** используется сама взрывонепроницаемая оболочка, выполняющая функцию непосредственного теплоотвода. При этом СПП располагаются на плоских медных радиаторах, которые прижимаются к внутренней части плоской стенки оболочки с помощью специального устройства через теплопе-

рход. Внешняя поверхность стенки оболочки в этом случае может охлаждаться различными путями.

Теплопередача выполняет функции электроизолирующего элемента и должен обладать соответствующей долгостойкостью и высокой теплопроводностью. Совместно с ВостНИИ, нами проведены испытания различных материалов для этих целей. Наилучшие результаты и разрешение на использование во взрывозащищенном электрооборудовании напряжением до 1000 В было получено для теплопередач на основе эпоксидных компаундов, наполненных пылью кварца [2]. Известны также теплопередачи в виде дисков или пластин из алюминиоксида и оксида бериллия [3, 4].

Для кондуктивной системы охлаждения нами была разработана методика теплового расчёта для одиночного СПП и группы СПП с учётом их теплового взаимовлияния через металл стенки, а также через воздух

внутреннего объёма оболочки. Методика позволяет определять схему размещения СПП на поверхности стенки, обеспечивающую допустимые температуры СПП при задании тепловых мощностей, рассеиваемых в каждом СПП, и параметров тепловой модели системы охлаждения: тепловых сопротивлений, коэффициентов теплоотдачи, размеров отдельных элементов и др.

В кондуктивной системе охлаждения (рис. 1) тепловой поток Q_0 от полупроводникового вентиля (1) через медное гнездо (2) в виде диска и теплопередач (3) поступает к стенке оболочки (4). При этом часть потока Q_2 распространяется по металлу стенки оболочки в радиальном направлении от источника тепла и рассеивается стенкой в окружающую среду. Другая часть теплового потока Q_1 , подведенная к поверхности F , рассеивается последней в окружающую среду:

$$Q_1 = \alpha F (\Theta_F - \Theta_C) ,$$

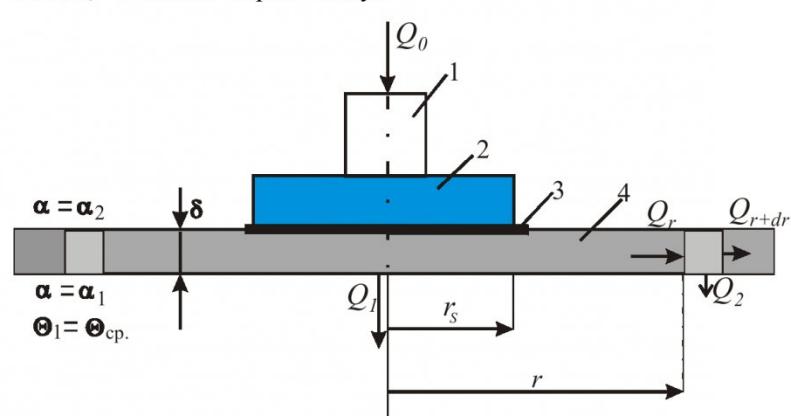


Рис. 1. Распределение тепловых потоков

где $F \cdot \pi r_s^2$ - площадь поверхности, занимаемая теплопереходом; α - коэффициент теплоотдачи поверхности А; Θ_F, Θ_C - температуры поверхности F и окружающей среды.

Расчет температуры корпуса СПП, его полупроводниковой структуры, гнезда крепления и температурного поля стенки оболочки будем производить с помощью метода, основанного на аналитическом расчете температурного поля с использованием последовательных приближений.

Сформулируем задачу следующим образом: найти распределение перегревов стенки оболочки $\Theta(r)$ в стационарном режиме для $r_s \leq r < \infty$ (рис. 1) при условии, что внутренняя поверхность стенки оболочки адиабатическая и вся тепловая энергия, выделившаяся в СПП, отводится через его основание и теплопереход к стенке оболочки и рассеивается последней в охлаждающую среду. Толщину стенки оболочки δ и температуру охлаждающей среды Θ_c считаем заданными.

Для упрощения решения поставленной задачи вводим следующие допущения: 1) коэффициент теплоотдачи внешней поверхности стенки оболочки α и коэффициент теплопроводности материала оболочки λ заданы и неизменны; 2) стенка оболочки бесконечная, достаточно тонкая и в направлении нормали к ней нет градиента температуры; 3) принимаем поверхность $F = \pi r_s^2$ со стороны охлаждающей среды изотермической.

Рассматривая условия закона сохранения энергии для дифференциального кольца стенки в стационарном режиме, можно поставленную задачу представить в виде системы уравнений:

$$Q_r = -2\pi\lambda\delta r \frac{d\Theta}{dr};$$

$$Q_2 = 2\pi\alpha(\Theta_r - \Theta_c);$$

$$Q_r - Q_{r+dr} - Q_2 = 0;$$

$$Q_{r+dr} = -2\pi\lambda\delta r \times \\ \times \left(\frac{d^2\Theta}{dr^2} dr + \frac{1}{r} \frac{d\Theta}{dr} + \frac{d\Theta}{dr} \right), \quad (1)$$

решение которой имеет вид:

$$\Theta(r) = \frac{Q_0}{2\pi\lambda\delta r_s} \cdot \frac{K_0(\varepsilon r)}{K_1(\varepsilon r_s)}, \quad (2)$$

где $\Theta(r) = \Theta_F - \Theta_c$ - перегрев стенки относительно охлаждающей среды на расстоянии r от центра источника тепла; K_0 и K_1 - модифицированные функции Бесселя; коэффициент $\varepsilon = \sqrt{\alpha/\lambda\delta}$.

Уравнение (2) будет верно при условии, что поверхность источника тепла F со стороны охлаждающей среды адиабатическая. Подобное допущение возможно при незначительной величине r_s и с увеличением площади, занимаемой теплопереходом, увеличивается ошибка в определении температурного поля. В нашем случае необходимо учитывать теплообмен поверхности F с охлаждающей средой. Составим эквивалентную тепловую схему узла охлаждения (рис. 2), где $R_I = 1 / (\alpha F)$ - тепловое сопротивление поверхности F относительно охлаждающей среды;

$$Z_I = \frac{1}{2\pi\lambda\delta r_s} \cdot \frac{K_0(\varepsilon r)}{K_1(\varepsilon r_s)} - теп-$$

ловой коэффициент стенки оболочки; $R_{CПП}$, $R_{CПП-TP}$, R_{TP} - тепловые сопротивления СПП, контакта «СПП - теплопереход», непосредственно теплоперехода.

Считаем, что тепловые потери, выделившиеся в вентиле, разделяются на два тепловых потока Q_1 и Q_2 . Тепловой поток Q_1 рассеивается поверхностью F в охлаждающую среду, а Q_2 - рассеивается остальной частью стенки - $Q_0 = Q_1 + Q_2$. Зная температуру Θ_F поверхности F , можно для стационарного режима определить температуру полупроводниковой структуры по формуле:

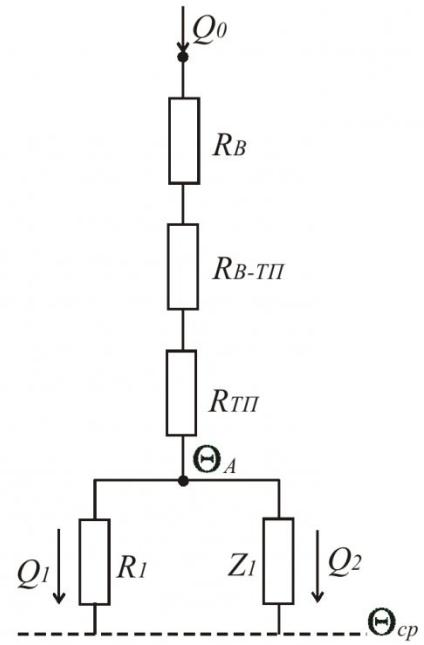


Рис. 2. Эквивалентная тепловая схема узла охлаждения

$$\Theta_{cpr} = \Theta_F + Q \times \\ (R_{CПП} + R_{CПП-TP} + R_{TP}) \quad (3)$$

Температуру Θ_F будем определять методом последовательных приближений. В первом приближении задаемся величиной $\alpha = \alpha^{(1)}$ и считаем, что $\Theta_1 = Q_1^{(1)} = 0$, а $\Theta_2 = Q_2^{(1)} = Q_0$ и по выражению (2) определим перегрев $\Theta_{(r=r_s)}^{(1)}$. Затем рас-

считаем тепловую мощность, рассеиваемую поверхностью F при ее перегреве $\Theta_{(r=r_s)}^{(1)}$, счи-

тая поверхность F изотермической. Во втором приближении

$$Q_1^{(2)} = \frac{\Theta_{(r=r_s)}^{(1)}}{R_1^{(1)}} = \alpha^{(1)} F \Theta_{(r=r_s)}^{(1)},$$

где $\alpha^{(1)} = \alpha_k^{(1)} + \alpha_l^{(1)}$ - суммарный коэффициент теплоотдачи конвекцией и лучеиспусканием поверхности F при ее перегреве $\Theta_{(r=r_s)}^{(1)}$. Далее, счи-

тая, что $Q_2^{(2)} = Q_0 - Q_1^{(2)}$, определим по (2) $\Theta_{r=r_s}^{(2)}$ и так далее.

При

$$\left| \Theta_{(r=r_s)}^{(n)} - \Theta_{(r=r_s)}^{(n-1)} \right| \leq \Delta \Theta_{(r=r_s)}^{\text{зад.}}$$

расчет прекращаем и принимаем

$$\Theta_F = \Theta_c + \frac{\Theta_{(r+r_s)}^{(n)} + \Theta_{(r+r_s)}^{(n-1)}}{2} \quad (4)$$

$$Q_2 = \frac{Q_2^{(n)} + Q_2^{(n-1)}}{2}. \quad (5)$$

Подставляя (5) в (2), определим температурное поле стенки в радиальном от источника тепла направлении. Затем, зная температурное поле стенки, определяем величину $\alpha_{\text{расч}}^{(l)}$ по известным зависимостям [5, 6] и сравниваем ее с $\alpha^{(l)}$. В том случае, если они различаются на величину, большую наперед заданной, производим корректировку коэффициента теплоотдачи - $\alpha^{(2)}$ и вновь делаем расчет. Обычно трех-четырех приближений бывает достаточно для получения удовлетворительных результатов.

Определив температурное поле стенки и температуру поверхности F и зная тепловые сопротивления $R_{\text{СПП}}$, $R_{\text{СПП-П}}$, $R_{\text{П}}$, можно рассчитать температуру полупроводниковой структуры вентиля. Для этого нужно подставить (4) в (3) и произвести расчет.

При жидкостном охлаждении теплоотводящей поверхности этот метод расчета полностью не подходит потому, что в первом приближении нельзя принимать $Q_1^{(l)} = 0$, а $Q_1^{(2)} = Q_0$, так как в отличие от воздушного охлаждения, большая часть тепла рассеивается поверхностью F и меньшая - остальной поверхностью стенки. Поэтому в первом приближении в этом случае следует ориентировочно принять, например, $Q_1^{(l)} = 0.7 Q_0$, а $Q_2^{(l)} = 0.3 Q_0$.

Одним из способов увеличения теплоотдачи внешних стенок оболочки является их оребрение. Путем обоснованного выбора профиля оребрения, соотношения высоты и толщины

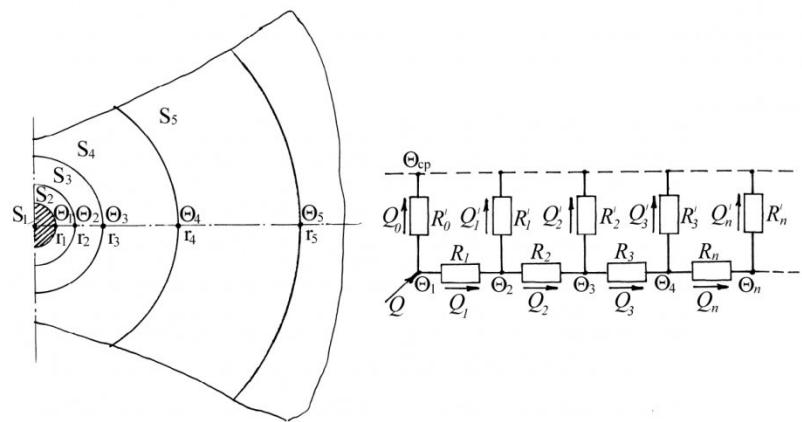


Рис. 3. Определение температурного поля стенки оболочки:
а) температурное поле стенки; б) эквивалентная тепловая схема

ны ребер, расстояния между ними можно создать оптимальную по критерию максимума теплоотвода конструкцию теплоотводящей поверхности для конкретных условий эксплуатации проектируемого устройства. Решению задачи посвящено значительное количество публикаций, например [5, 6].

Таким образом, данный метод расчета температурного поля стенки оболочки можно использовать для гладких и оребренных стенок при естественном и принудительном воздушном и жидкостном их охлаждении.

Для облегчения и упрощения процесса расчета температуры СПП и температурного поля стенки оболочки разработаны nomogramмы, где представлены расчетные зависимости, рассмотренные выше, и программа расчета на ЭВМ.

Для решения этой задачи можно использовать также метод эквивалентных тепловых схем. Условия задачи и допущения принимаем те же, что и ранее. При этом среднюю температуру поверхности S_1 (рис. 3, а) считаем заданной. Источник тепла представляет собой диск радиусом r_1 , соединенный с поверхностью стенки с помощью теплоперехода.

Задаваясь температурой Θ_2 (рис. 3, а, б), определим расстояние от центра источника тепла до линии изотермы стенки

с температурой Θ_2 .

Эту задачу можно решить, используя систему уравнений:

$$\begin{aligned} Q_1 &= \frac{(\Theta_1 - \Theta_2)2\pi r_1}{\ln r_2/r_1}, \\ Q_1' &= \left(\frac{\Theta_1 + \Theta_2}{2} - t_c \right) \alpha S_2; \\ Q_1 + Q_1' &= Q - Q_0, \end{aligned} \quad (6)$$

где r_2 – расстояние от центра источника тепла до изотермы Θ_2 ; $S_2 = \pi r_2^2 - S_1$ - площадь теплоотдачи; Q - тепловой поток от источника тепла к стенке оболочки; Q_0 - тепловой поток, рассеиваемый поверхностью S_1 ; Q_1 - тепловой поток, распространяющийся по стенке от источника тепла до изотермы Θ_2 ; Q_1' - тепловой поток, рассеиваемый поверхностью S_2 .

Решая эту систему уравнений, получим зависимость:

$$\begin{aligned} (\Theta_1 - \Theta_2)2\pi r_1 \lambda + \left(\frac{\Theta_1 + \Theta_2}{2} - \Theta \right) \times \\ \times \alpha \pi (r_2^2 - r_1^2) \ln \frac{r_2}{r_1} = \\ = (Q - Q_0) \ln \frac{r_2}{r_1}. \end{aligned} \quad (7)$$

Введем обозначения:

$$A = (\Theta_1 - \Theta_2)2\pi r_1 \lambda;$$

$$B = \left(\frac{\Theta_1 + \Theta_2}{2} - \Theta_c \right) \alpha \pi;$$

$$C = Q - Q_0.$$

Тогда (7) запишется в виде:

$$\begin{aligned} A + B(r_2^2 - r_1^2)(\ln r_2 - \ln r_1) &= \\ &= C(\ln r_2 - \ln r_1). \end{aligned} \quad (8)$$

Для общности заменим r_2 на x и обозначим:

$$D = Br_1^2 + C; \quad E = B \cdot \ln r_1;$$

$$F = A + Br_1^2 \cdot \ln r_1 + C \cdot \ln r_1$$

и в окончательном виде будем иметь

$$\ln x(Bx^2 - D) = (Ex^2 - F). \quad (9)$$

Решая (9), определим расстояние от центра источника тепла до изотермы Θ_2 . Таким же образом последовательно определяются расстояния до линий изотерм $\Theta_3, \Theta_4, \dots, \Theta_n$.

При размещении нескольких СПП на теплоотводящей поверхности стенки оболочки необходимо определить такую схему их размещения с учетом тепловой совместимости, чтобы занимаемая площадь была минимальной и при этом обеспечивался бы нормальный тепловой режим всех СПП.

При этом электрические зазоры и пути утечки должны соответствовать требованиям ПИВРЭ, а габариты оболочки не должны превышать допустимых по механической прочности и условиям эксплуатации.

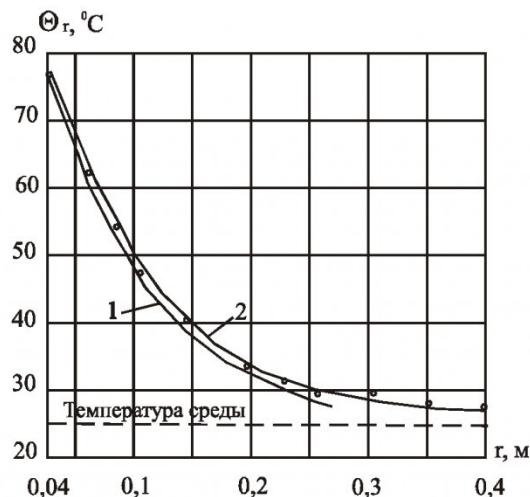


Рис. 4. Сравнение расчетных данных температурного поля с опытными: 1 – расчет методом тепловых схем; 2 – расчет аналитическим методом; ° – экспериментальные данные

Для решения (9) и определения параметров схемы размещения совокупности СПП на теплоотводящей стенке оболочки разработаны программы для проведения расчетов на ЭВМ.

На рис. 4 для сравнения представлены расчетные и экспериментальные данные определения температурного поля плоской стенки, подтверждающие применимость методик расчета для практических целей.

Разработан также алгоритм теплового расчета и программное обеспечение для проектирования системы охлаждения электрооборудования на основе

СПП с размещением их во взрывонепроницаемой оболочке с учетом теплового взаимовлияния элементов схемы, объединенных в эквивалентные нагреваемые зоны, через внутренний объем оболочки.

Промышленные испытания опытного образца тиристорного регулятора скорости рудничного электровоза 13 АРП-900, разработанного с использованием данной методики, показали, что погрешность расчета тепловых режимов СПП не превышает 10%, что вполне допустимо для практических расчетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Плетнев А.И. Охлаждение полупроводниковых вентилей рудничных выпрямителей // Взрывозащищенные электрические аппараты: Сб. науч. тр. ВНИИВЭ; Под общ. ред. В.С. Дзюбана. – Донецк, 1991. – С. 81-90.
- Исследование стойкости эпоксидных компаундов к поверхностным разрядам / Л.В. Гладилин, Н.В. Терехова, П.Д. Гаврилов, В.Г. Каширских // Борьба с травматизмом при эксплуатации электрооборудования и повышение безопасности в угольных шахтах: Сб. науч. тр., вып. 23, ВостНИИ, Кемерово, 1974. – С. 50-55.
- Изоляционные диски ДК и ДКМ. Технические условия ТУ 16.528.190-80.
- Славик И. Конструирование силовых полупроводниковых преобразователей. – М.: Энергоатомиздат, 1989. - 180 с.
- Краус А.Д. Охлаждение электронного оборудования. – Л.: Энергия, 1971. - 247 с.
- Дульнев Г.Н. Теплообмен радиоэлектронных аппаратов / Г.Н. Дульнев, Э.М. Семяшкин. – Л.: Энергия, 1968. – 360 с.

□ Автор статьи:

Каширских

Вениамин Георгиевич

- канд. техн. наук, доц., зав. каф.
электропривода и автоматизации