

## ТРАНСПОРТНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

УДК 21.316.825 + 06

DOI 10.46973/0201-727X\_2025\_1\_141

*Н. П. Воронова***ПРИНЦИПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ СИЛЬНОТОЧНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТЕРМОРЕЗИСТОРОВ**

**Аннотация.** Рассматривается связь конструктивной особенности сильноточных полупроводниковых терморезисторов (ПТР) с некоторыми характеристиками материала его тела. Целью настоящего исследования является изучение неравномерного поля температур в массе терморезистора, так как при определенных условиях это может влиять на устойчивость его работы. Получены результаты, подтверждающие положение о том, что градиенты температур в полупроводниковой массе терморезистора подчиняются линейному закону как относительно тока, так и относительно расстояния от оси терморезистора. В результате исследований подтверждено теоретическое утверждение о том, что градиенты температур определяются только конструктивными параметрами. Как следствие, терморезисторы коаксиального типа удовлетворяют основным требованиям повышения надежности работы ПТР.

**Ключевые слова:** терморезистор, температура, резистор, задача, градиент температур, температурное поле, коаксиальный терморезистор, неравномерность, теплоотдача, ось симметрии, интеграл.

**Для цитирования:** Воронова, Н. П. Принципы конструирования сильноточных полупроводниковых терморезисторов / Н. П. Воронова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1. – С. 141–150. – DOI 10.46973/0201-727X\_2025\_1\_141.

**Введение**

Сильноточные терморезисторы в отличие от широко распространенных слаботочных обладают большой активной массой, что сопряжено со значительными выделениями тепла внутри резистора. Если в слаботочных резисторах вследствие малых тепловыделений температуру в разных точках массы можно считать одинаковой, то в сильноточных необходимость отвода значительного количества тепла приводит к появлению резко выраженных градиентов температуры. Таким образом, основной, совершенно обязательной, характеристикой сильноточных терморезисторов является наличие неравномерного поля температур в их массе, без этого они работать не могут.

Материал терморезистора обладает отрицательным температурным коэффициентом. Это обстоятельство, при наличии неравномерного поля температур, может вызвать нарушение устойчивости его работы, выражающееся в том, что в некоторых зонах материал может нагреваться до недопустимых температур и резистор через эти зоны замыкает электрическую цепь накоротко. При этом остальная масса материала охлаждается почти до температуры окружающей среды, возникают большие термические напряжения, и резистор разрушается. Таким образом, основным требованием, которое необходимо предъявлять к конструкциям терморезистора, является упорядочение температурных полей.

**Конструкция терморезистора**

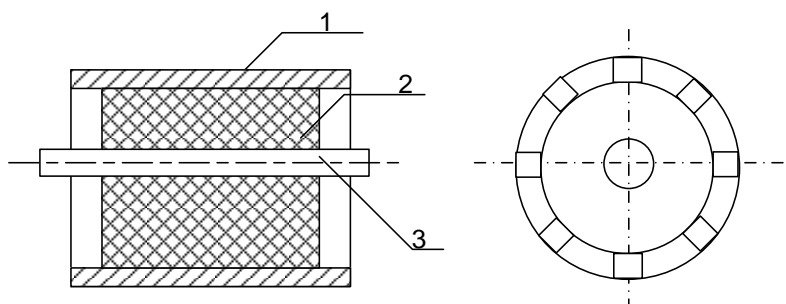
В существующих конструкциях терморезисторов описанной выше их особенности уделяется недостаточно большое внимание, в силу чего распределение температур внутри терморезистора в значительной мере подчинено фактору случайности [1–6]. Так, например, в терморезисторах сотовой конструкции при интенсивном охлаждении в различных местах могут возникать перегревы, не поддающиеся прогнозированию.

Для уменьшения влияния фактора случайности и достижения оптимальных результатов необходимо принудительно организовать форму температурного поля, что прежде всего и следует учитывать при конструировании терморезистора [7].

Очевидно, одним из оптимальных вариантов решения задачи является такой, при котором направление вектора градиента температур согласовано с требованиями интенсификации теплоотдачи.

Из возможных форм мощных терморезисторов с принудительно направленным вектором градиента температуры рассмотрим конструкцию, получившую название *коаксиального резистора* [8–10].

Терморезистор коаксиального типа представляет собой два цилиндрических металлических (латунь, бронза) соосных электрода с полупроводниковым заполнением (рис. 1).



**Рис. 1. Устройство терморезистора:**

1 – внешний электрод; 2 – внутрипроводниковое заполнение; 3 – внутренний электрод.

Электроды изготавливаются из металла, стойкого к температурам порядка 700 К, обладающего хорошей электропроводностью и довольно высокой упругой деформацией. Внешний электрод снабжается рядом отверстий, наличие которых обусловлено технологическими причинами. Такая конструкция отличается тем, что поле плотностей тока внутри терморезистора в плоскости нормальной к оси является принципиально неравномерным и, следовательно, неравномерны поля удельных тепловыделений, температур и всех физических характеристик материала.

На первый взгляд неравномерность полей кажется дефектом конструкции, однако в действительности это не так.

Во-первых, конструкция коаксиальных терморезисторов органически обуславливает принудительное и совершенно определенное распределение плотности тока по сечению терморезистора и в связи с этим такое же определенное, четкое распределение температур, т. е. здесь удовлетворяется указанное выше требование к конструкции.

Во-вторых, градиенты температур внутри терморезистора направлены от центрального электрода к наружному, теплоотдающему электроду, т. е. соблюдается требование оптимизации условий охлаждения.

В-третьих, направления градиента температур, и, следовательно, тепловых потоков совпадают с линиями плотности тока, что еще больше способствует принудительной организации полей физических величин внутри резистора.

В-четвертых, поля температур внутри терморезистора являются плоскопараллельными, т. е. во всех плоскостях нормальных к оси терморезистора форма температурных полей одинакова (если пренебрегать концевыми эффектами и неравномерностью структуры терморезистора). Это освобождает от необходимости борьбы с термическими напряжениями, направленными вдоль оси терморезистора.

Ввиду наличия осевой симметрии и плоскопараллельного характера полей физических величин задача распределения температур и определения их градиентов в полупроводниковом заполнении может быть введена дополнительно к задаче распределения температур вдоль одной оси, что и использовано в дальнейших рассуждениях.

Вектор плотностей тока вследствие осевой симметрии направлен по радиусу терморезистора, и его модуль равен:

$$\delta = \frac{I}{2\pi r l}, \quad (1)$$

где  $I$  – ток;  
 $r$  – радиус рассматриваемого элементарного кольца;  
 $l$  – длина активной части терморезистора (рис. 2).

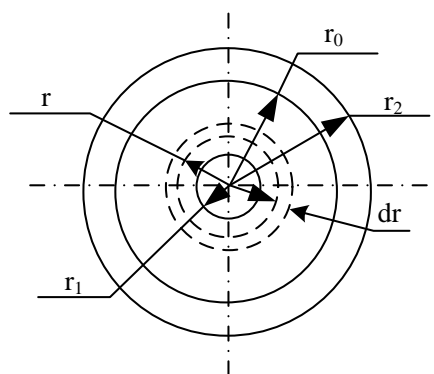


Рис. 2. Рассматриваемое элементарное кольцо

Очевидно, что величина плотностей тока обратно пропорциональна расстоянию данного элемента от оси резистора. Удельная мощность, выделяемая током, еще более неравномерна – она обратно пропорциональна квадрату расстояния от оси:

$$P = \delta^2 \rho = \frac{I^2 \rho}{2\pi r^2 l^2}. \quad (2)$$

Здесь  $\rho$  – удельное сопротивление активной массы резистора. Следовательно, резко неравномерным должно быть и поле температур.

Это обстоятельство является одним из важнейших факторов, ограничивающих мощность коаксиальных терморезисторов [11–13].

Однако имеются обстоятельства, значительно смягчающие эффект неравномерности. При полупроводниковой активной массе терморезисторов с отрицательным температурным коэффициентом зависимость температур от радиуса будет более сложной.

Действительно, удельное сопротивление полупроводника

$$\rho = \rho_{\infty} l_x P^{\frac{B}{T}}, \quad (3)$$

где  $T$  – температура полупроводника, К;  
 $\rho_{\infty}$  – удельное сопротивление при  $T = \infty$ ;  
 $B$  – температурная характеристика материала.

Как видно,  $\rho$  является резко выраженной функцией температуры, и поэтому температура в данных точках полупроводника является функцией двух противоположно действующих факторов: плотности тока, уменьшающейся с увеличением радиуса, и удельного сопротивления, возрастающего с увеличением того же радиуса. Суммарное воздействие этих двух взаимно противоположных факторов резко снижает эффект неравномерности, приводя его к величинам, дающим практически рациональное решение.

Так как от распределения температур внутри терморезистора зависят все его свойства (сопротивление, допустимая мощность, термостойкость и т. д.), то представляется весьма интересным выяснение зависимости  $T = f(r)$  (температуры от радиуса слоя). Эта зависимость является одной из важнейших.

Дифференциальное уравнение, описывающее энергетические процессы в элементарном объеме внутри терморезистора

$$-\lambda \nabla^2 dV + \rho \delta^2 dV = 0, \quad (4)$$

где  $\lambda$  – удельная теплопроводность материала;  
 $V$  – объем.

Имея в виду осевую симметрию и пренебрегая концевыми эффектами, уравнение (4) можно привести к следующему виду:

$$-\lambda 2\pi r l \frac{d^2 T}{dr^2} dr + \left( \frac{I}{2\pi r l} \right)^2 \rho^2 \pi r l dr = 0. \quad (5)$$

Отсюда

$$\frac{d^2 T}{dr^2} dr = \frac{I^2}{(2\pi r l)^2} \frac{\rho^2}{r^2} dr. \quad (6)$$

Интегрируя (6) по  $dr$ , получим градиент температуры

$$\frac{dT}{dr} dr = \frac{I^2}{(2\pi)^2 \lambda} \cdot \int \frac{\rho}{r^2} dr + K_1, \quad (7)$$

где  $K_1$  – постоянная интегрирования.

Этот интеграл непосредственно взять нельзя, т. к. зависимость  $\rho = f(r)$  является неизвестной. Таким образом, градиент температур внутри резистора является сложной функцией радиуса данного элементарного кольцевого сечения.

Количество тепла, выделившегося в элементарном объеме полупроводника:

$$dV = 2\pi r l dr. \quad (8)$$

За единицу времени (т. е. мощность в объеме  $dV$ ) примем

$$d\rho = \delta^2 \rho dV = \frac{I^2 \rho}{2\pi r l} dr; \quad (9)$$

то же по всей массе полупроводника

$$P = \frac{I^2}{2\pi l} \int \frac{\rho}{r} dr + K_2, \quad (10)$$

где  $K_2$  – постоянная интегрирования.

Интеграл  $\frac{\rho}{r} dr$  можно представить в следующем виде:

$$\int \frac{\rho}{r} dr = r \int \frac{\rho}{r^2} dr - f \left( \int \frac{\rho}{r^2} dr \right). \quad (11)$$

Используя (7), получим:

$$\int \frac{\rho}{r} dr = \left( \frac{dT}{dr} - K_1 \right) \frac{(2\pi l)^2 \lambda}{I^2}. \quad (12)$$

Совместно решим (11) и (12):

$$\int \frac{\rho}{r} dr = \frac{(2\pi l)^2 \lambda}{I^2} \left[ r \left( \frac{dT}{dr} - K_1 \right) - \int \left( \frac{dT}{dr} - K_1 \right) dr \right], \quad (13)$$

$$\int \frac{\rho}{r} dr = \frac{(2\pi l)^2 \lambda}{I^2} \left( r \frac{dT}{dr} - K_1 \right) = \frac{(2\pi l)^2 \lambda}{I^2} \frac{rdT - Tdr}{r^2 d^2} r^2. \quad (14)$$

Отсюда

$$\int \frac{\rho}{r} dr = \frac{(2\pi l)^2 \lambda}{I^2} \cdot \frac{d(\text{grad}T)^2}{dr}. \quad (15)$$

Подставим выражение (15) в (10):

$$P = 2\pi r^2 l \lambda \frac{d(\text{grad}T)r}{dr} + K_2, \quad (16)$$

здесь  $P \neq f(r)$ , т. к. это полная мощность, выделяемая резистором.

$$\frac{d(\text{grad}T)_r}{dr} = \frac{P - K_2}{2\pi l \lambda} \cdot \frac{1}{r^2}, \quad (17)$$

$$d(\text{grad}T)_r = \frac{P - K_2}{2\pi l \lambda} \cdot \frac{dr}{r^2}. \quad (18)$$

Выполним интегрирование:

$$d(\text{grad}T)_r = \frac{dT}{dr} = -\frac{P - K_2}{2\pi l \lambda} \cdot \frac{1}{r} + K_3, \quad (19)$$

где  $K_3$  – постоянная интегрирования.

Интегрируем еще раз:

$$T = -\frac{P - K_2}{2\pi l \lambda} \ln r + K_3 r + K_4. \quad (20)$$

Следует иметь в виду, что видимая сравнительно простая структура управления (20) является кажущейся, так как постоянные интегрирования  $K_3$  и  $K_4$  являются постоянными только для резистора с определенным материалом и отношением диаметров, т. е. для определенной связи  $\rho = f(T)$  и, следовательно,  $\rho = f(r)$ .

Определим постоянные интегрирования.

Рассмотрим уравнение (16).

При  $r = 0$ ;  $P = 0$ .

В силу осевой симметрии и отсутствия тепловыделения при  $r = 0$   $(\text{grad}T)_{r=0} = 0$ .

$$\frac{d(\text{grad}T)_{r=0}}{dr} \neq \infty,$$

$$K_2 = 0 \text{ и } P = 2\pi l \lambda r^2 \frac{d(\text{grad}T)_r}{dr},$$

$$T = -\frac{P}{2\pi l \lambda} \ln r + K_3 r + K_4. \quad (21)$$

Считая, что равны и соответствующие температуры  $T_2 = T_3$  (что справедливо с достаточной степенью точности), мощность теплового потока, рассеиваемого резистором за счет охлаждения, можно определить следующим образом:

$$P = \alpha F (T_2 - T_{ox}) = \alpha 2\pi l r^2 (T_2 - T_{ox}), \quad (22)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от поверхности резистора к воздуху;

$F$  – поверхность охлаждения;

$T_{ox}$  – температура охлаждающего воздуха в К;

$r = r_2$  из уравнения (21).

$$T_2 = -\frac{P}{2\pi l \lambda} \ln r_2 + K_3 r_2 + K_4. \quad (23)$$

Решая совместно (22) и (23), определим

$$K_4 = \frac{P}{2\pi l \lambda} \ln r^2 + \frac{P}{2\pi l \lambda_2 r_2} - K_3 r_2 + T_{\text{ок}}.$$

Тогда из (21)

$$T = -\frac{P}{2\pi l \lambda} \ln \frac{r_1}{r_2} - K_3(r_2 - r) + \frac{P}{2\pi l \lambda_2 r_2} + T_{\text{ок}}. \quad (24)$$

Постоянную интегрирования  $K_3$  можно определить только экспериментально. У реальных резисторов отношение  $\frac{r_1}{r_2}$  может находиться в сравнительно узких пределах – от 0,35 до 1,0.

Зависимость  $\ln \frac{r_1}{r_2} = f\left(\frac{r_1}{r_2}\right)$  изображена на рис. 3.

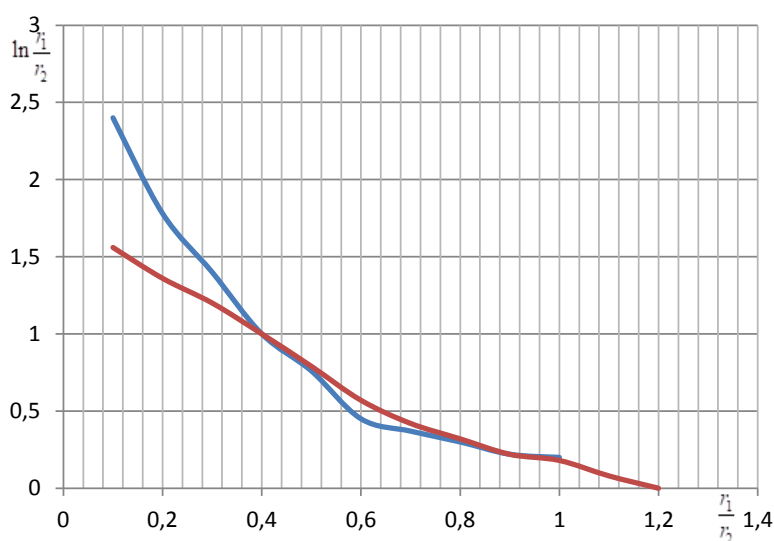


Рис. 3. Зависимость  $\ln \frac{r_1}{r_2} = f\left(\frac{r_1}{r_2}\right)$ :

$$\ln \frac{r_1}{r_2} = -a \frac{r_1}{r_2} + b; \quad a=1,63; \quad b=1,60, \quad \text{т. е.} \quad \ln \frac{r_1}{r_2} = -1,63 \frac{r_1}{r_2} + 1,60$$

В пределах  $0,4 \leq \frac{r_1}{r_2} \leq 1,0$  эту кривую можно интерпретировать с достаточной степенью точности уравнением прямой.

Максимальная погрешность, возникающая при использовании этого уравнения, не превышает 3,5 %.

Используя последнюю зависимость (25), уравнение (24) можно представить в следующем виде:

$$T = -\frac{P}{2\pi l \lambda} \left(-a \frac{r_1}{r_2} + b\right) + \frac{P}{2\pi l \lambda_2 r_2} - K_3(r_2 - r) + T_{\text{ок}}$$

или

$$T = \left(\frac{P_a}{2\pi l \lambda r_2} + K_3\right) r + \frac{P}{2\pi l} \left(\frac{1}{r_2 \lambda_2} - \frac{b}{\lambda} r\right) + (T_{\text{ок}} - K_3 r_2). \quad (25)$$

Уравнение (25) является линейным, т. е.  $T = \lambda r + \beta P + \gamma$ ,

$$\text{где } \lambda = \frac{P_a}{2\pi l \lambda r_2} + K_3; \beta = \frac{P}{2\pi l} \left( \frac{1}{r_2 \lambda_2} - \frac{b}{\lambda} \right); \quad \gamma = T_{\text{ок}} - K_3 r_2.$$

Таким образом, видно, что с достаточно высокой степенью точности температура в данной точке зависит линейно от радиуса слоя и линейно от мощности, т. е. градиент температур в этой конструкции оказывается не слишком велик и подчиняется простой, четко выраженной зависимости, что является огромным достоинством коаксиальных терморезисторов по сравнению с другими известными конструкциями. Это в конечном итоге предопределяет достаточно высокую термостойкость резисторов [14–17].

Так как вопрос о форме зависимости  $T = f(r)$  имеет кардинальное значение, а теоретические выводы содержат значительное количество допущений, полученная зависимость была проверена экспериментально,

Испытания проводились в установившемся режиме при различных значениях тока, поскольку этот режим является наиболее опасным с точки зрения распределения температур, и поэтому применительно именно к нему рассмотрена вышеизложенная теория.

В результате обработки данных опытов получена зависимость

$$T = 1,98I - \frac{43,3r}{r_1} + 471K,$$

где  $I$  – ток в амперах.

Значительный интерес представляет также зависимость температуры различных точек терморезистора от диаметра внешнего электрода, по температуре которого можно контролировать перегрев в процессе эксплуатации [18].

Приведенные результаты относятся к группе точек, расположенных в средней части терморезистора, в остальных сечениях картина аналогичная.

Таким образом, опыт подтвердил теоретические выводы, причем, сравнивая опытные данные с теоретическими формулами, можно получить коэффициенты  $\lambda$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ :

$$\lambda = -\frac{43,3}{r_2}; \quad \beta = \frac{19,8}{U}; \quad \gamma = 4,71.$$

### **Выводы**

1 Несмотря на резко неравномерное поле плотностей тока, разбег температур в массе терморезисторов не очень велик и подчинен линейному закону по отношению как к току, так и к расстоянию от оси терморезистора.

2 Градиенты температур в полупроводниковой массе терморезистора не зависят от тока и определяются только конструктивными параметрами.

3 Численные результаты проведенных исследований можно переносить только на геометрически подобные резисторы; полученные же функциональные связи (управления в общем виде) и сделанные общие выводы могут быть распространены на любые типы коаксиальных резисторов.

4 Терморезисторы коаксиальной конструкции удовлетворяют основным требованиям, предъявляемым к конструкциям терморезисторов в части обеспечения упорядоченности полей физических величин и повышения надежности работы терморезисторов.

### **Список литературы**

1 Колпахчян, П. Г. Особенности создания асинхронного тягового электропривода магистральных электровозов / П. Г. Колпахчян, А. А. Зарифьян // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2007. – № 2 (11). – С. 160–169. – ISSN 1815-588X.

### **References**

1 Kolpakhchyan, P. G. Features of the creation of an asynchronous traction electric drive of mainline electric locomotives / P. G. Kolpakhchyan, A. A. Zarifian / Proceedings of Petersburg Transport University. – 2007. – No. 2 (11). – P. 160–169. – ISSN 1815-588X.

2 Математическое моделирование и определение параметров регулирования линейной электрической машины возвратно-поступательного действия / П. Г. Колпахчян, В. Г. Щербakov, А. Е. Кочин, А. Р. Шайхiev // Электротехника. – 2007. – № 5. – С. 18–24. – ISSN 0013-5860.

3 **Ворон, О. А.** Совершенствование системы электроснабжения изотермического подвижного состава / О. А. Ворон, М. М. Туляганов, А. Д. Петрушин // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 4 (53). – С. 28–32. – ISSN 1818-5509.

4 **Швалов, Д. В.** Существующие и перспективные методы контроля технического состояния стрелочных электродвигателей постоянного тока / Д. В. Швалов, Е. А. Булат // Цифровые инфокоммуникационные технологии : сборник научных трудов. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2021. – С. 184–187. – EDN QOHNON.

5 **Зарифьян, А. А.** Моделирование тягового электропривода локомотива в ПК MATLAB/SIMULINK / А. А. Зарифьян, П. Г. Колпахчян, В. В. Сироткин // Транспорт : наука, образование, производство : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. Т. 1. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2017. – С. 131–135. – EDN YSNZFY.

6 **Патент на изобретение RU 2058604 C1.** Полупроводниковый терморезистор / К. А. Тузовский, В. М. Андреев, Д. В. Зиновьев, А. А. Гришаев. – № 93031956/07 ; заявл. 16.06.1993 ; опубл. 20.04.1996.

7 Моделирование тепловых процессов в терморезисторах с положительным коэффициентом сопротивления / В. Н. Шут, С. Р. Сырцов, Е. Л. Гавриленко, А. В. Гаврилов // Инженерно-физический журнал. – 2005. – Т. 78, № 4. – С. 97–101. – ISSN 0021-0285.

8 **Косминов, Т. Р.** Терморезисторы на основе гидроксипатита / Т. Р. Косминов, Е. А. Тарасов, Ю. В. Зайцев // Новая наука: теоретический и практический взгляд. – 2016. – № 2–2 (63). – С. 212–215. – ISSN 2412-9720.

9 Электрические и тепловые процессы в электрических цепях с терморезисторами / А. С. Богатин, В. Н. Богатина, С. А. Ковригина, И. О. Носачев // Проблемы учебного физического эксперимента : сборник научных трудов / Российская академия образования. – Глазов, 2017. – С. 59–60. – EDN ZBDCGR.

10 **Гаврилов, А. В.** Методы повышения устойчивости терморезисторов к электрическим нагрузкам / А. В. Гаврилов // Актуальные проблемы прочности : сборник материалов 50-го

2 Mathematical modeling and determination of control parameters of a linear electric reciprocating machine / P. G. Kolpakhchyan, V. G. Shcherbakov, A. E. Kochin, A. R. Shaikhiev // Electrical Engineering. – 2007. – No. 5. – P. 18–24. – ISSN 0013-5860.

3 **Voron, O. A.** Improving the power supply system of isothermal rolling stock / O. A. Voron, M. M. Tulyaganov, A. D. Petrushin // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2020. – No. 4 (53). – P. 28–32. – ISSN 1818-5509.

4 **Shvalov, D. V.** Existing and promising methods for monitoring the technical condition of DC pointer electric motors / D. V. Shvalov, E. A. Bulat // Digital Infocommunication Technologies : collection of scientific papers. – Rostov-on-Don : RSTU, 2021. – P. 184–187. – EDN QOHNON.

5 **Zarifyan, A. A.** Modeling of locomotive traction electric drive in the MATLAB/SIMULINK PC / A. A. Zarifyan, P. G. Kolpakhchyan, V. V. Sirotkin // Transport : Science, Education, Production : collection of scientific papers of the International scientific and practical conference. Vol. 1. – Rostov-on-Don : RSTU, 2017. – P. 131–135. – EDN YSNZFY.

6 **Patent for invention RU 2058604 C1.** Semiconductor thermistor / K. A. Tuzovsky, V. M. Andreev, D. V. Zinoviev, A. A. Grishaev. – No. 93031956/07 ; declared 16.06.1993 ; publ. 20.04.1996.

7 Modeling of thermal processes in thermistors with a positive resistance coefficient / V. N. Shut, S. R. Syrtsov, E. L. Gavrilenko, A. V. Gavrilov Gavrilov // Engineering Physics Journal. – 2005. – Vol. 78, No. 4. – P. 97–101. – ISSN 0021-0285.

8 **Kosminov, T. R.** Hydroxyapatite-based thermistors / T. R. Kosminov, E. A. Tarasov, Yu. V. Zaitsev // New Science: Theoretical and Practical View. – 2016. – No. 2–2 (63). – P. 212–215. – ISSN 2412-9720.

9 Electrical and thermal processes in electrical circuits with thermistors / A. S. Bogatin, V. N. Bogatina, S. A. Kovrigina, I. O. Nosachev // Problems of Educational Physical Experiment : collection of scientific papers / Russian Academy of Education. – Glazov, 2017. – P. 59–60. – EDN ZBDCGR.

10 **Gavrilov, A. V.** Methods for increasing the resistance of thermistors to electrical loads / A. V. Gavrilov // Current Problems of Strength : collection of materials of the 50th International Scientific Symposium. – Vitebsk, 2010. – P. 35–38.

Международного научного симпозиума. – Витебск, 2010. – С. 35–38.

11 **Шут, В. Н.** Влияние конфигурации электродов на термоупругие напряжения в ПТКС терморезисторах / В. Н. Шут, А. В. Гаврилов, Д. А. Ильющенко // Актуальные проблемы прочности : материалы 53-й Международной научной конференции : в 2 ч. – Витебск, 2012. – С. 34–37.

12 **Носков, В. Н.** Использование термозависимых поликристаллических сопротивлений в пусковых устройствах электрических двигателей подъемно-транспортных машин / В. Н. Носков, Н. П. Воронова // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2021. – № 3 (100). – С. 39–45. – DOI 10.30987/1999-8775-2021-3-39-45.

13 Эффективные устройства защиты от аварийных режимов работы / С. В. Оськин, Г. М. Оськина, А. В. Мирошников, А. С. Макаренко // Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность. – 2018. – № 1 (33). – С. 118–126. – ISSN 2305-6843.

14 **Воронова, Н. П.** Влияние геометрических параметров и электрофизических характеристик на работу полупроводниковых терморезисторов коаксиального типа / Н. П. Воронова // Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи : сборник научных трудов V Международной научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2021. – С. 17–22. – ISBN 978-5-907295-50-6.

15 **Тутов, Е. А.** Особенности проводимости поликристаллического ванадия на переменном токе / Е. А. Тутов, П. И. Крюков, В. П. Зломанов // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2014. – Т. 16, № 2. – С. 220–224. – ISSN 1606-867X.

16 **Воронова, Н. П.** Поликристаллические термозависимые полупроводниковые сопротивления коаксиального типа и пусковые устройства на их основе / Н. П. Воронова, М. А. Трубицин, Е. Ю. Микаэлян // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 3. – URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4823](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4823) (дата обращения: 29.11.2024).

17 **Воронова, Н. П.** Электрофизические и тепловые характеристики полупроводниковых термосопротивлений коаксиального типа / Н. П. Воронова, М. А. Трубицин // Инженерный вестник Дона, 2018. – № 2. – URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4823](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4823) (дата обращения: 27.11.2024).

18 **Воронова, Н. П.** Оптимизация пусковых процессов с использованием полупроводниковых терморезисторов / Н. П. Воронова, М. А. Трубицин // Инженерный вестник Дона. –

11 **Shut, V. N.** Influence of electrode configuration on thermoelastic stresses in PTCS thermistors / V. N. Shut, A. V. Gavrilov, D. A. Ilyushchenko // Current Problems of Strength : materials of the 53rd International Scientific Conference : in 2 parts. – Vitebsk, 2012. – P. 34–37.

12 **Noskov, V. N.** Use of temperature-dependent polycrystalline resistances in starting devices of electric motors of hoisting-and-transport machines / V. N. Noskov, N. P. Voronova // Bulletin of Bryansk State Technical University. – 2021. – No. 3 (100). – P. 39–45. – DOI 10.30987/1999-8775-2021-3-39-45.

13 Effective devices for protection against emergency operating modes / S. V. Oskin, G. M. Oskina, A. V. Miroshnikov, A. S. Makarenko // Emergencies: Industrial and Environmental Safety. – 2018. – No. 1 (33). – P. 118–126. – ISSN 2305-6843.

14 **Voronova, N. P.** Influence of geometric parameters and electrophysical characteristics on the operation of coaxial semiconductor thermistors / N. P. Voronova // Transport Power Engineering. Topical problems and tasks : collection of scientific papers of the V International scientific and practical conference. – Rostov-on-Don : RSTU, 2021. – P. 17–22. – ISBN 978-5-907295-50-6.

15 **Tutov, E. A.** Features of the conductivity of polycrystalline vanadium on alternating current / E. A. Tutov, P. I. Kryukov, V. P. Zlomanov // Condensed Matter and Interphases. – 2014. – Vol. 16, No. 2. – P. 220–224. – ISSN 1606-867X.

16 **Voronova, N. P.** Polycrystalline temperature-dependent semiconductor resistances of coaxial type and starting devices based on them / N. P. Voronova, M. A. Trubitsyn, E. Yu. Mikaelyan // Engineering Journal of Don. – 2015. – No. 3. – URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4823](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4823) (date of access: 11/29/2024).

17 **Voronova, N. P.** Electrophysical and thermal characteristics of coaxial semiconductor thermal resistors / N. P. Voronova, M. A. Trubitsin // Engineering Journal of Don, 2018. – No. 2. – URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4823](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4823) (date of access: 11/27/2024).

18 **Voronova, N. P.** Optimization of starting processes using semiconductor thermistors / N. P. Voronova, M. A. Trubitsin // Engineering Journal of Don. – 2020. – No. 8 (68). – P. 77–84. – URL:

2020. – № 8 (68). – С. 77–84. – URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2020/6585](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2020/6585) (date of access: 11/25/2024).  
(дата обращения: 25.11.2024).

*N. P. Voronova*

### PRINCIPLES OF DESIGNING HIGH-CURRENT SEMICONDUCTOR THERMISTORS

**Abstract.** The connection of the design feature of high-current semiconductor thermistors (SCT) with some characteristics of the material of their body is considered. The purpose of this research is to study the non-uniform temperature field in the mass of a thermistor, since under certain conditions this can affect the stability of its operation. The results obtained confirm the position that the temperature gradients in the semiconductor mass of the thermistor obey a linear law both with respect to current and with respect to the distance from the axis of the thermistor. As a result of the research, the theoretical statement that temperature gradients are determined only by design parameters has been confirmed. As a consequence, coaxial type thermistors meet the basic requirements for improving the reliability of the SCT.

**Keywords:** thermistor, temperature, resistor, problem, temperature gradient, temperature field, coaxial thermistor, non-uniformity, heat transfer, symmetry axis, integral.

**For citation:** Voronova, N. P. Principles of designing high-current semiconductor thermistors / N. P. Voronova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2025. – No. 1. – P. 141–150. – DOI 10.46973/0201-727X\_2025\_1\_141.

#### Сведения об авторах

**Воронова Наталья Павловна**

Ростовский государственный университет  
путей сообщения (РГУПС),  
кафедра «Теоретические основы  
электротехники»,  
кандидат технических наук, доцент,  
e-mail: voronova044@inbox.ru

#### Information about the authors

**Voronova Natalya Pavlovna**

Rostov State Transport University (RSTU),  
Chair “Theoretical Foundations of Electrical  
Engineering”,  
Candidate of Engineering Sciences,  
Associate Professor,  
e-mail: voronova044@inbox.ru