

Поликристаллические термозависимые полупроводниковые сопротивления коаксиального типа и пусковые устройства на их основе

Н.П. Воронова, М.А. Трубицин, Е.Ю. Микаэльян

Ростовский государственный университет путей сообщения

Аннотация: Подвижной состав в настоящее время оснащен электроприводом большой мощности. Регулировка частоты вращения, защита двигателей от перегрева и ограничения пусковых токов выполняются при помощи полупроводниковых элементов. Для повышения надежности пускорегулирующей аппаратуры целесообразно использовать малое число полупроводниковых элементов. Увеличение токов протекаемых, через пускорегулирующие устройства упрощает электрические схемы управления и регулирования. В качестве основных элементов, авторами предложено использовать терморезисторы. В статье рассматриваются конструктивные особенности исполнения и положительные стороны полупроводниковых поликристаллических термозависимых сопротивлений коаксиального типа большой мощности. Приводятся основные теоретические положения характеризующие работу терморезисторов. Даны алгоритмы для синтеза пусковых реостатов коаксиального. Выполнено математическое моделирование различных типов пусковых реостатов выполненных на основе терморезисторов. Представлены графические зависимости, характеризующие пусковые процессы.

Ключевые слова Терморезисторы большой мощности. Терморезисторы коаксиального типа, плотность тока, удельные тепловыделения, критерии подобия, пусковой реостат, пусковой ток, синтез пусковых устройств.

Современный железнодорожный транспорт является одним из самых существенных потребителей электрической энергии. Насыщенность его электрическими устройствами и главным образом электродвигателями непрерывно растет [1]. Например, современный пассажирский состав потребляет на различные нужды электрическую мощность порядка 800кВт.

Более 70% всего электропотребления железных дорог страны приходится на электропривод, что характеризует тот весомый экономический эффект, который может быть получен путем автоматизации соответствующих процессов управления и совершенствования различных звеньев цепи электропривода [2]. Ключевая проблема здесь – повышение надежности автоматических устройств, применяемых на подвижном составе железных дорог. Её решение должно проводиться, в частности, путем разработки максимально простых элементов и средств автоматики, преимущественно с минимальным количеством контактной аппаратуры. Ввиду большого разнообразия и сравнительно малой мощности отдельных потребителей электрической энергии подвижного состава, исключая тяговые двигатели электровозов, вопросы о простоте, дешевизне, малых габаритах систем автоматического управления электроустановками приобретают особое значение [2]. В этой связи применение полупроводниковых устройств открывает широкую перспективу достижения указанных преимуществ.

Область применения полупроводниковых терморезисторов (ПТР), имеющих резко выраженную нелинейную падающую зависимость величины сопротивления от температуры весьма обширна [3]. Они используются в области измерений и регулирования температуры, измерений скоростей газов и жидкостей и т.д. [4]. Другой областью применения терморезисторов является конструирование пускорегулирующих устройств для электродвигателей различных видов, применяемых на вспомогательном оборудовании электровозов и на пассажирском подвижном составе. Здесь

преимущества замены обычной, весьма громоздкой аппаратуры на малогабаритную, простую и дешевую конструкцию из термосопротивлений особенно очевидны, учитывая требования максимальной мощности на электроподвижном составе.

Вопрос об ограничении бросков пускового тока является особенно актуальным в автономных системах электроснабжения ограниченной мощности и в инверторных установках, так как здесь большие значения токов включения могут привести к нарушению работы установки. В последние годы проводятся значительные исследования по разработке рациональной системы централизованного электроснабжения пассажирских поездов на электрифицированных участках. Необходимость решения данного вопроса обусловлена тем, что подвагонные генераторы уже не могут обеспечить постоянно растущие мощности электроустановок вагонов. При этом крайне велики потери и крайне низок коэффициент полезного действия. Кроме того, недопустимо велик вес источников электроэнергии. Так, например вес генераторов постоянного тока вагонов без кондиционирования воздуха достигает 345 кг, а при наличии кондиционеров возрастает 1200 кг [1].

В последние годы для электротехнической промышленности требуются ПТР рассчитанные на токи, измеряемые не десятками, а сотнями ампер, с номинальными сопротивлениями менее 10 Ом [5]. Дело в том, что схемы с терморезисторами типа СТ2-27 на токи в сотни ампер оказываются довольно сложными и требуют применения линейных стабилизирующих сопротивлений. Упрощение схем и существенное увеличение допускаемых токов может быть достигнуто за счет снижения номинального сопротивления резисторов до единиц и даже долей Ома [6]. Такое уменьшение номинала ПТР вызывает новый качественный скачок свойств резисторов. Противоречивость требований к ПТР резко усиливается особенно в части

контактных устройств [7]. За недопустимые границы уходит основной показатель устойчивости работы резистора - отношение коэффициента теплопередачи к теплопроводности материала. При конструктивном решении, заложенном в выпускаемых резисторах, задача (на данном уровне) оказывается неразрешимой.

Анализ дифференциальных уравнений энергетического баланса терморезисторов и влияния различных факторов, привели к созданию нового типа ПТР, которые в значительной степени свободны от недостатков, свойственных терморезисторам СТ2-27.

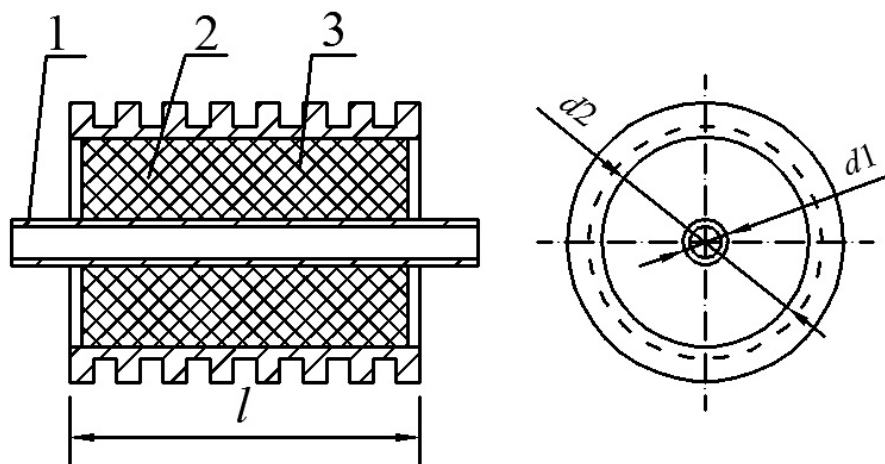


Рис. 1 Конструктивное оформление сильноточных терморезисторов коаксиального типа

Эти терморезисторы можно изготавливать на достаточно большие значения тока (100-150А), при номинальном сопротивлении (R_{20}) порядка единиц и долей Ома, такие терморезисторы получили название коаксиальных (рис.1).

В конструктивном исполнении коаксиальный терморезистор представляет собой два соосных цилиндрических электрода с полупроводниковым термочувствительным наполнением [8]. В качестве полупроводниковой композиции использованы поликристаллические

мелкодисперсные системы тройных окислов (на основе Co, Mn, Ni, Cu) в различных соотношениях [9].

Регулирование сопротивления достигается за счет подбора соотношения диаметров электродов, длины терморезистора и состава полупроводниковой термочувствительной композиции и рассчитывается по следующей формуле

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{d_2}{d_1}, \quad (1)$$

где ρ - удельное сопротивление полупроводниковой композиции.

Такое конструктивное исполнение терморезистора достаточно органично решает ряд вопросов технологического характера, а именно: обеспечение контакта металл-полупроводник, создание полупроводникового тела и др. В тоже время такое конструктивное исполнение создает условия работы полупроводниковой массы, при этом плотность тока и удельные тепловыделения являются функцией расстояния от оси терморезистора [10].

Уравнение энергетического баланса терморезистора в цилиндрической системе координат имеет вид:

$$-\lambda \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \rho \delta^2 + C \frac{\partial T}{\partial \tau} = 0, \quad (2)$$

Граничные условия :

$$\int_{r_1}^{r_2} \delta^2 \rho dV = \lambda F (T - T_{охл}) + \int_{r_1}^{r_2} C \frac{\partial T}{\partial r} dr dV, \quad (3)$$

где $\rho = \rho_0 e^{\frac{B}{T}}$ - удельное сопротивление полупроводника; r - радиус (текущая координата); δ - плотность тока; C - удельная теплоемкость; τ - время; V - объем полупроводника; α - коэффициент теплопередачи; $T_{охл}$ - температура охлаждающей среды; λ - удельная теплопроводность полупроводника; F - внешняя поверхность терморезистора.

Следует отметить, что эти уравнения трансцендентны, приведены приближенно и решаются весьма сложно. Но воспользовавшись теорией подобия и моделирования можно получить четыре критерия подобия, из которых состоит интегральная форма уравнения:

$$K_1 = \frac{\lambda T}{\rho \delta^2}; (4) \quad K_2 = \frac{\lambda \tau}{Cr}; (5) \quad K_3 = \frac{\delta^2 \rho r^2}{\lambda F \theta}; (6) \quad K_4 = \frac{CTV}{\lambda F \theta}; (7)$$

где $\theta = T_3 - T_{охла}$.

Уравнение состояния терморезистора представляет собой функциональную связь между этими критериями. Изучение критериев подобия, а именно их функциональных связей полученных экспериментально, позволило найти оптимальные соотношения при конструировании терморезисторов коаксиального типа [7].

При проектировании пусковых схем с применением ПТР возникает ряд затруднений, связанных с нахождением оптимального решения. Критериями оптимизации решения могут быть приняты различные показатели: чаще всего соответствие Ом-секундной характеристики параметрам проектируемой схемы, требуемой для данного устройства; заданная кратность пускового тока; время выхода схемы в условно установившейся режим [8].

Рассмотрим методику синтеза пусковых устройств на терморезисторах для электродвигателя.

Целью синтеза является обеспечение пуска и разгона двигателя до 90% от номинальных оборотов. После чего пусковой реостат закорачивается. В качестве ограничений примем максимальное значение тока i_m и время пуска (разгона) t_n . При этом $i_m \leq i_{доп}; t_n \leq t_{доп}$.

Так как пусковой ток в значительной степени зависит от наклона кривой набора оборотов в зависимости от времени $\omega = f(t)$, что показал анализ многочисленных пусков электродвигателей проведенных с помощью

реостатов, построенных на ПТР, то представляется целесообразным в основу синтеза положить две модели пусковых токов (рис.2), которые реализуют пуск электродвигателя в технически допустимой области изменения тока i и времени t достаточно экономичным образом.

Синтез реостата для первой модели весьма прост, однако расчет пусковых процессов показал, что первая модель пускового тока не всегда обеспечивает пуск двигателя при $i_{дон} \geq 5i_{ном}$.

Для всех остальных случаев необходимо использовать вторую модель пускового тока, так как площадь ограниченная кривой 2 оказывается больше, чем площадь ограниченная кривой 1(см.рис.2).

Для реализации алгоритма синтеза реостатов на ПТР по второй модели пускового тока:

1.Задаем некоторым значением $i_0 \leq i_m = i_{дон}$.

2.Рассчитываем компоновочный коэффициент K по формуле

$$K = \frac{\frac{e+1}{e} - 1}{r_0} \cdot i_0, \quad (8)$$

где $e = \frac{I_n R_{я}}{U - I_n R_{я}}$ паспортный параметр двигателя.

3. Из кривых (рис.3)в соответствии с принятыми значениями i_0 и e , определяем обобщенную константу γ . Тогда масса реостата определится по

$$N = \frac{B}{T_0^2 \gamma C e}, \quad (9)$$

где: B - константа, определяемая свойствами полупроводниковой композиции; T_0 - температура окружающей среды; C - удельная (объемная) теплоемкость полупроводниковой композиции;

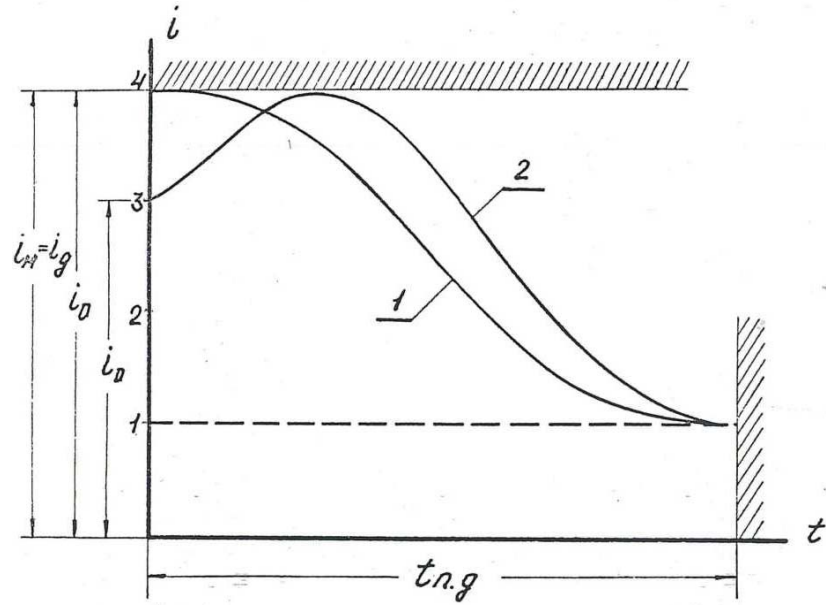


Рис2. Первая и вторая модель пускового тока

4. Продольный (x) и поперечный (y) параметры реостата определяются

по формулам : $x = \sqrt{\frac{N}{K}}$; $y = \frac{N}{x}$.

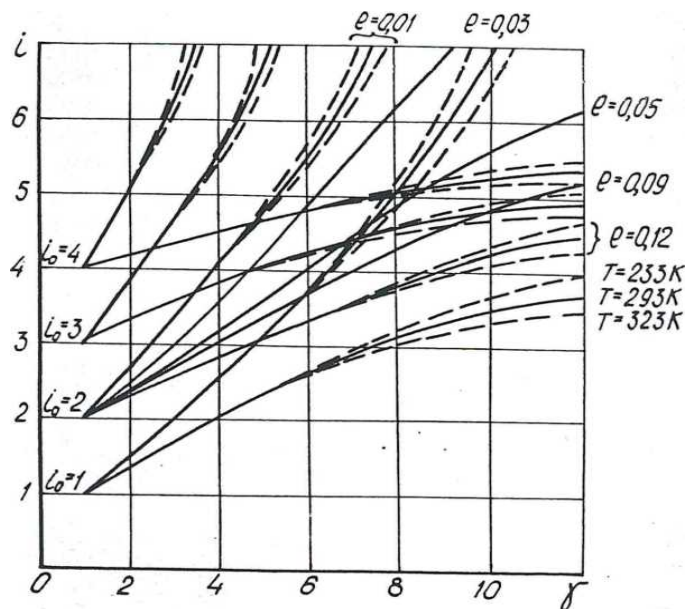


Рис.3 Обобщенные расчетные токовые характеристики терморезисторных реостатов

Анализ конструктивного исполнения разработанного ПТР коаксиального типа и теоретического материала характеризующего работу реостатов на их основе подтверждает актуальность и экономическую эффективность данных устройств.

Литература

1. Мальцев В.Ф. Электрооборудование пассажирских вагонов. М: Маршрут , 2007.-84с
2. А.В. Гавриленко, А.Л. Кирсанов, Т.П. Елисеева Основные направления энергосбережения в региональной экономике// Инженерный вестник Дона, 2011, №1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2011/.
3. О.А. Геращенко Температурные измерения: справочник // Киев : Наукова думка, 1984.– 494 с
4. В. И. Винокуров, С. И. Каплин, И. Г. Петелин Электрорадиоизмерения: Учебное пособие для вузов.– М: Высшая школа ,1986. –351
- 5.В.К. Игнатъев, А.В. Никитин, С.В. Перченко, Д.А. Станкевич Динамическая компенсация дополнительной погрешности прецизионного АЦП // Инженерный вестник Дона, 2012, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/.
6. Henry, M.P., Clarke D.W. The self-validating sensor: rationale, definitions and examples – Oxford: Department of Engineering Science, 1993.585-610 pp.
7. Xu, X. On-Line sensor calibration monitoring and fault detection forcemical processes //Maintenance and Reliability Center. – 2000.12-14 pp.
- 8.Г.Е. Соловьев, Н.П. Воронова. Тепловые и электрофизические характеристики терморезисторов коаксиального типа для запуска электродвигателей вентиляторов // Известия РГСУ. 2011. № 115.

9.Г.Е. Соловьев, Н.П. Воронова, Пусковые устройства заданных параметров на полупроводниковых терморезисторах коаксиального типа // Вестник Восточнoукраинского университета им. В. Даля. 2013. №3, ч1.стр148-150

10. Воронова, Н.П., Соловьев Г.Е., Безуглый А.В. Синтез пусковых реостатов на полупроводниковых термосопротивлениях для электроподвижного состава: монография; ФГБОУ ВПО РГУПС. – Ростов н/Д, 2014. – 103 с.: ил. – Библиогр.: с. 99-100

References

1. Mal'tsev V.F. Elektrooborudovanie passazhirskikh vagonov [Electrical equipment of passenger cars]. Moscow, Marshrut, 2007. 84 p
2. A.V. Gavrilenko, A.L. Kirsanov, T.P. Eliseeva Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2011, №1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2011/.
3. O.A. Gerashchenko Temperaturnye izmereniya [Temperature measuring]: spravochnik, Kiev : Naukova dumka, 1984, 494 p.
4. V. I. Vinokurov, S. I. Kaplin, I. G. Petelin Elektroradioizmereniya: [Electro- and radio metering] : Uchebnoe posobie dlya vuzov. Moscow: Vysshaya shkola, 1986, 351 p.
5. V.K. Ignat'ev, A.V. Nikitin, S.V. Perchenko, D.A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus),2012, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/.
6. Henry, M.P., Clarke D.W. The self-validating sensor: rationale, definitions and examples. Oxford: Department of Engineering Science, 1993.585-610 pp
7. Xu, X. On-Line sencor calibration monitoring and fault detection forcemical processes. Maintenance and Reliability Center. 2000.12-14 pp.
8. G.E. Solov'ev, N.P.Voronova. Izvestiya RGSU, 2011, № 115, 135-140 p
9. G.E. Solov'ev, N.P. Voronova. Vestnik Vostochnoukrainskogo universiteta im. V. Dalya., 2013, № 3, ch1. 148-150 p



10. Voronova N.P., Solov'ev G.E., Bezuglyy A.V. Sintez puskovykh reostatov na poluprovodnikovyykh termosoprotivleniyakh dlya elektropodvizhnogo sostava [Rheostatic starter synthesis with semiconducting thermistors for electrical rolling stock]: monografiya; FGBOU VPO RGUPS. Rostov n/D, 2014. 103 p.: il. Bibliog.: pp. 99-100