

## Основные принципы построения пусковых реостатов на полупроводниковых термосопротивлениях

*Н.П.Воронова, В.Н.Носков*

*Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону*

**Аннотация.** Применение маломощных терморезисторов в составе пусковых устройств требует наличия промежуточной аппаратуры и различных компонентов, что значительно снижает надежность аппаратуры. Увеличение токов, протекающих через пускорегулирующие устройства, упрощает электрические схемы управления и регулирования. Для использования терморезисторов в цепях с большими токами необходимо использовать особые конструкции, с целью недопущения перегрева материала терморезистора.

В статье приведены конструктивные особенности исполнения полупроводниковых поликристаллических термозависимых сопротивлений. Даны алгоритмы для синтеза пусковых реостатов. Приведены зависимости, характеризующие различные пусковые модели.

**Ключевые слова:** полупроводниковые термосопротивления, модели пусковых токов, обобщенные токовые характеристики.

Существуют различные способы пуска электродвигателей. Реостатный способ предусматривает трехступенчатый разгон двигателя, в связи с чем в моменты переключения и шунтирования пусковых сопротивлений резко возрастает сила тока и возникают значительные динамические нагрузки как в электроприводе, так и в приводном механизме. Вместе с тем, схема, реализующая данный способ, требует значительного количества релейно-контакторной аппаратуры, что усложняет и удорожает эксплуатацию, а также снижает ее надежность [1].

Тиристорные устройства, используемые в схемах пуска электродвигателей, обладают определенными достоинствами, но отличаются высокой стоимостью, сложностью схем и требуют высококвалифицированного обслуживания. Они выгодны только в тех случаях, когда необходимо обеспечить строгий режим разгона двигателя в соответствии с заданным графиком.

Ступенчатость применения релейно-контакторного управления приводит к появлению значительных бросков тока и резких изменений

динамического момента в процессе пуска, что зачастую может служить причиной выхода из строя электропривода [8].

Уменьшить эти деструктивные явления можно путем увеличения числа ступеней, однако ступенчатое регулирование невыгодно с точки зрения потерь электроэнергии, что особенно сказывается при частых пусках.

Перспективным направлением создания пусковых и пускорегулирующих устройств, в значительной степени исключающих большинство приведенных недостатков, являются реостаты, построенные на сильноточных полупроводниковых поликристаллических терморезисторах. Их основными достоинствами являются автоматизация пуска, почти полное отсутствие коммутационной аппаратуры, простота, дешевизна и малые габариты [6, 7].

Пусковые устройства, построенные на сильноточных полупроводниковых термозависимых сопротивлениях (ПТС) выгодно отличаются от существующих. Они предназначены для ограничения пиковых бросков тока, для уменьшения динамических нагрузок на различные электрические машины и аппараты.

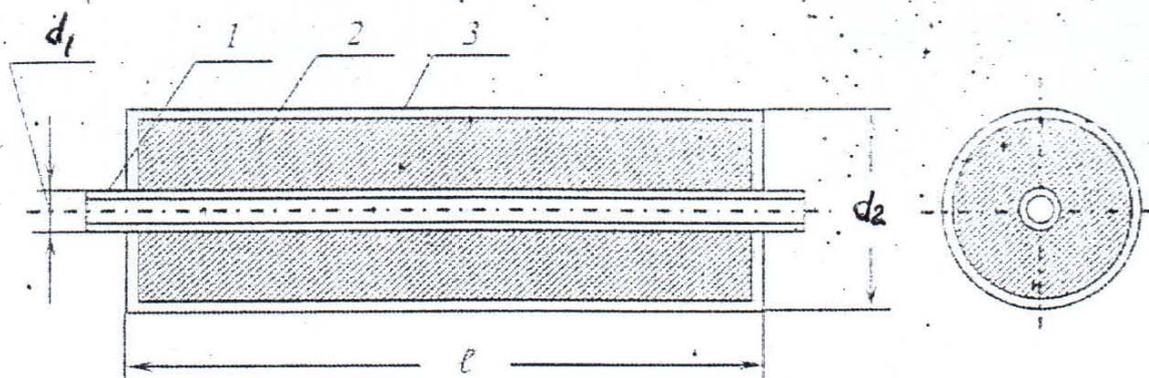


Рис. 1 Конструктивное исполнение терморезистора

- 1 – внутренний электрод; 2 – полупроводниковая композиция;
- 3 – внешний электрод.

Синтез пусковых реостатов по своей математической сущности относится к задаче оптимального управления по параметрам при ряде технических ограничений на фазовые траектории (кривые набора оборотов, пускового тока, температуры нагрева терморезисторов).

Система дифференциальных уравнений, описывающая пусковой процесс электродвигателя постоянного тока с помощью терморезисторов, имеет вид [2, 4]:

$$I \frac{d\omega}{dt} = M(I) - M_c(\omega), \quad (1)$$

$$C_p(T) \frac{d\theta}{dt} = I^2 \cdot R_p(T) - \alpha \cdot F \cdot \theta, \quad (2)$$

где  $I$  – ток электродвигателя (А);

$\omega$  – скорость электродвигателя (1/с);

$M(I)$  – вращающий момент двигателя, зависящий от потребляемого им тока (НМ). Функция  $M(I)$  известна и определяется током электродвигателя;

$M_c(\omega)$  – момент сопротивления, в общем случае зависящий от скорости вращения двигателя (Н\*м). Функция  $M_c(\omega)$ , как правило, также известна, определяется механической характеристикой производственных механизмов;

$C_p$  – теплоёмкость ПТС, определяемая его массой, линейно зависящая от абсолютной температуры (Дж/град);

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи при данных условиях охлаждения (Вт/м<sup>3</sup>\*К);

$\Theta$  – температура перегрева ПТС (К);

$F$  – площадь поверхности полюса ПТС (мм<sup>2</sup>).

Без ущерба для последующего анализа, в уравнении (2) можно опустить слагаемое, учитывающее теплообмен с окружающей средой. Это возможно потому, что мощные ПТС, в основном, предназначены для работы

в быстро протекающих переходных режимах, длительность которых соизмерима с постоянной времени резистора. Так как энергия, рассеиваемая резистором в окружающую среду, составляет приблизительно 3–5 % от общего расхода, это позволяет вести расчеты реостатов на ПТС по несколько упрощенной методике, пренебрегая теплоотдачей. При длительных запусках (свыше 3–5 секунд) такой теплообмен может быть учтен добавлением опущенного слагаемого [8].

Как видно из системы (1-2), переходный пусковой режим электродвигателя зависит как от массы реостата, так и от его электрического сопротивления, определяемого, в свою очередь, конфигурацией, а именно, либо схемой реостата – при его компоновке из стандартных элементов, либо конфигурацией его целостной конструкции. При этом указанные параметры должны быть таковы, чтобы пусковой процесс протекал в рамках технических ограничений по температуре ПТС, по току и по времени пуска. Выбор этих параметров и составляет проблему синтеза пусковых реостатов на ПТ [3].

Рассматриваемый терморезистор описывается тремя основными размерами (см. рис. 1):

$r_1$  – радиус внутреннего электрода;

$r_2$  – радиус внешнего электрода;

$l$  – длина активной части ПТС;

В данном случае, если фиксировать  $r_1$ , что чаще всего и делается в реальных условиях, то под продольным параметром подразумевается длина терморезистора  $l$ , а под поперечным параметром величина  $r_1$ .

Если по каким-либо причинам потребуется изменение величины  $r_1$ , то для этого необходимы дополнительные условия в виде уравнения (9)

Первоначально принимая в качестве изменяемых параметров  $r_1$  и  $l$ , выразим константы конструктивного подобия пусковых реостатов через исходные показатели и регулировочные параметры следующим образом:

$$r_{p0} = \frac{R_{\Sigma}}{R_{Я}} = \frac{1}{R_p} \cdot \frac{\rho_{\infty}}{2\pi l} \exp \frac{B}{T_0} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (3)$$

$$Y = \frac{B}{T_0^2 C_{об} v} = \frac{B}{T_0^2 C_{об} \pi (r_2^2 - r_1^2) l} \quad (4)$$

где  $r_{p0}$  и  $Y$  – константы конструктивного подобия пусковых реостатов,

$R_{\Sigma}$  – сопротивление терморезистора,

$R_{Я}$  – сопротивление якоря электродвигателя;

$R_p$  – сопротивление пускового реостата;

$\rho_{\infty}$  – сопротивление терморезистора при бесконечно большой температуре;

$B$  – коэффициент термической чувствительности;

$T_0$  – начальная температура ПТС;

$C_{об}$  – удельная объёмная теплоёмкость полупроводниковой композиции.

Решив совместно уравнения (3) и (4) можно определить искомые значения  $l$  и  $r_2$  уравнений (5 и 6).

Однако трансцендентный вид этих уравнений не позволяет получить решения в явном виде с достаточной точностью

$$l = \frac{\rho_{\infty}}{2\pi r_{p0} R_{Я}} = (\ln r_2 - \ln r_1) \quad (5)$$

$$r_2 = \sqrt{\frac{v}{\pi l} + r_1^2} \cong \sqrt{\frac{v}{\pi l}} \quad (6)$$

где  $v$  – объём реостата на ПТС.

$$v = \frac{B}{T_0^2 C \gamma} \quad (7)$$

Графически это решение находится путём определения точки пересечения кривых  $l$  и  $r_2$  (рис.2)

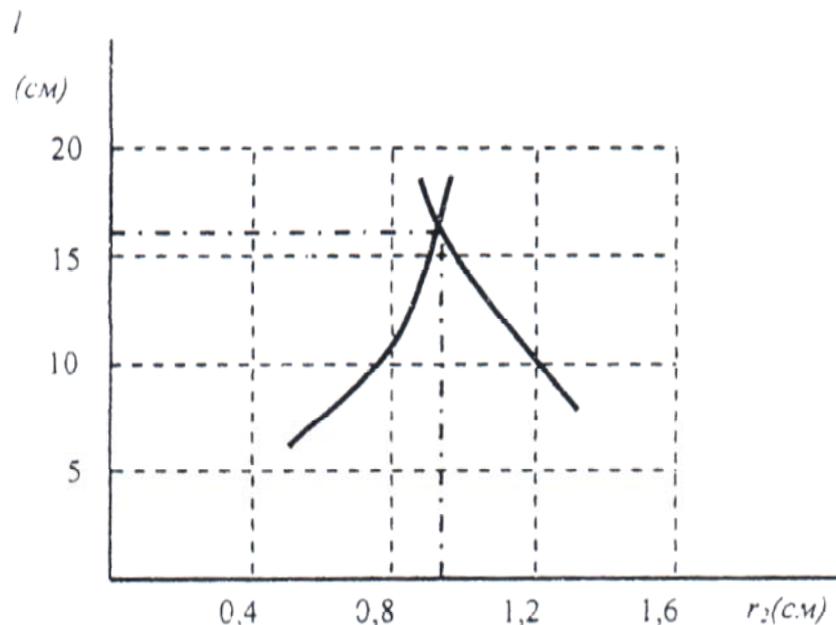


Рис.2 –Графическое решение системы (5-6)

В уравнении (6) принятое допущение относится к тому распространённому случаю, когда значением  $r_1$  можно пренебречь.

Основным ограничением для ПТС является предельно допустимая (по нагреву) плотность тока  $\delta_{\text{доп}}$  около внутреннего электрода. Исходя из того, величина  $r_1$  должна быть проверена по условию обеспечения допустимой плотности тока

$$\delta \leq \delta_{\text{доп}} = \frac{I_{\text{доп}}}{2\pi l r_1} \quad (8)$$

Если это условие не выполняется для некоторого заданного значения  $r_1$ , то этот параметр определяется из выражения:

$$r_1 = \frac{I_{\text{доп}}}{2\pi IS_{\text{доп}}} \quad (9)$$

Изложенное выше позволяет предложить техническое решение, которое должно отвечать некоторым условиям оптимальности.

Применительно к пусковым устройствам для электродвигателей таких условий может быть поставлено несколько:

Минимальный расход энергии на осуществление пуска и разгона электродвигателя.

Наименьшие динамические воздействия при заданной длительности разгона.

Оптимальное время разгона.

Оптимальная кратность пускового тока.

Наименьшее отклонение кривой разгона от заданной формы.

Различным условиям оптимизации соответствуют и различные способы регулирования пуска и разгона электродвигателя.

Схема синтеза пусковых реостатов на ПТС сводится к следующему:

1. Задаем значения  $I_0, I_M = I_3$ ;
2. Величину начального сопротивления реостата  $r_0$  определяем по величине  $I_0$ , в зависимости от типа электродвигателя;
3. В соответствии с принятыми величинами в п.1 (рис.4) определяем величину  $\gamma$ ;
4. Совместное решение уравнений (5) и (6) даёт возможность получить искомые параметры пускового реостата [5].

На рисунке 3 показано изменение амплитудного значения пускового тока при различных  $\gamma$ . Для получения нужного семейства кривых пусковых токов с монотонно возрастающей амплитудой (рис. 3) достаточно равномерно увеличивать обобщенную константу  $\gamma$ . Это обеспечивает

практически адекватное протекание пускового процесса при некотором зафиксированном  $\gamma$  и при самых различных сочетаниях величин  $B$  и  $T_0$ [10].

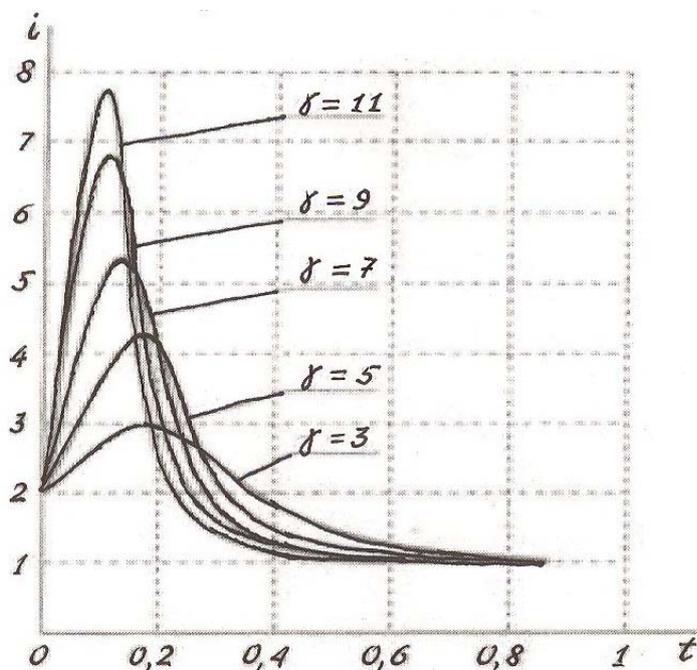


Рис. 3 – Зависимость пускового тока от величины  $\gamma$

На рис. 4 представлены зависимости (4), полученные на основании экспериментальных кривых вида рис. 3. Эти зависимости представляют собой обобщенные токовые характеристики реостатов на ПТС.

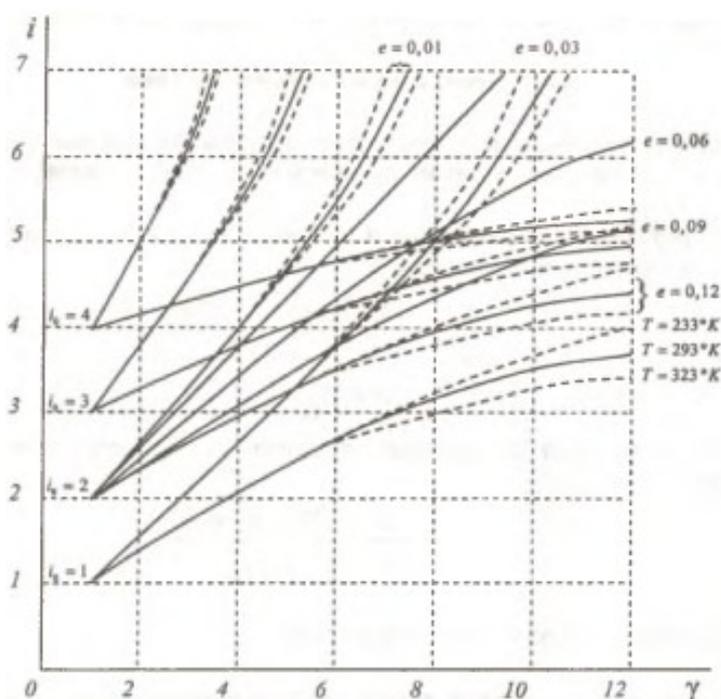


Рис. 4 – Обобщенные токовые характеристики реостатов на ПТС

В заключение следует отметить, что, несмотря на большое количество разнообразных требований, предъявляемых к режиму пуска электродвигателей, терморезисторы обеспечивают экономичный и надежный запуск, удовлетворяющий большинству условий при соответствующем подборе терморезисторного реостата.

### Литература

1. Гавриленко А.В., Кирсанов А.Л., Елисеева Т.П. Основные направления энергосбережения в региональной экономике // Инженерный вестник Дона, 2011, №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2011/340](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2011/340).
2. Воронова Н.П., Трубицин М.А., Микаэльян Е.Ю. Поликристаллические термовзависимые полупроводниковые сопротивления коаксиального типа и пусковые устройства на их основе // Инженерный вестник Дона, 2015, №3 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3101](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3101).
3. 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.

4. Мальцев В.Ф. Электрооборудование пассажирских вагонов. М: Маршрут, 2007. – 84 с.

5. Воронова Н.П., Носков В.Н. Формирование оптимальных моделей пусковых токов Инженерный вестник Дона, 2017, №4 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4402/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4402/).

6. Henry, M.P., Clarke D.W. The self-validating sensor: rationale, definitions and examples – Oxford: Department of Engineering Science, 1993, pp. 585-610.

7. 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.

8. Xu, X. On-Line sensor calibration monitoring and fault detection forcemical processes //Maintenance and Reliability Center. – 2000, pp. 12-14.

9. Геращенко О.А. Температурные измерения: справочник// Киев: Наукова думка, 1984. -494 с

10. Соловьев Г.Е., Воронова Н.П. Пусковые устройства заданных параметров на полупроводниковых терморезисторах коаксиального типа // Вестник Восточноевропейского университета им. В. Даля. 2013. №3, ч. 1, с. 148-150.

### References

1. Gavrilenko A.V., Kirsanov A.L., Eliseeva T.P. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2011, №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2011/340/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2011/340/).

2. Voronova N.P., Trubitsin M.A., Mikaelyan E.Y. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2015, №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3101/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3101/).

---



3. 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 VPORGUPs. Rostov n/D, 2014. 103 p.: il. Bibliog.: pp. 99-100.

4. Mal'tsev V.F. Elektrooborudovanie passazhirskikh vagonov [Electrical equipment of passenger cars]. Moscow, Marshrut, 2007. 84 p.

5. Voronova N.P., Noskov V.N. Inzenernyi vestnik Dona (Rus), 2017, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4402](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4402).

6. Henry, M.P., Clarke D.W. The self-validating sensor: rationale, definitions and examples. Oxford: Department of Engineering Science, 1993, pp. 585- 610.

7. 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.

8. Xu, X. On-Line sensor calibration monitoring and fault detection forcemical processes. Maintenance and Reliability Center, 2000, pp. 12-14.

9. Gerashchenko O.A. Temperaturnye izmereniya [Temperature measuring]: spravochnik, Kiev: Naukovadumka, 1984, 494 p.

10. Solov'ev G.E., Voronova N.P. Vestnik Vostochnoukrainskogo universiteta im. V. Dalya., 2013, №3, ch. 1, pp. 148-150.