

## Методологические принципы анализа и синтеза пусковых реостатов на термозависимых поликристаллических сопротивлениях

*Н.П. Воронова, В.Н. Носков*

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

**Аннотация.** В статье проведен краткий анализ пусковых процессов электротехнических устройств.

Рассмотрен и сформулирован ряд ограничений, от которых зависит характер процессов пуска электродвигателей с помощью терморезисторных реостатов. Приведены графические зависимости, характеризующие изменение пускового тока и вращающего момента при прямом запуске и с помощью реостатов на терморезисторах. Приведен пример расчета пускового тока для асинхронного двигателя с фазным ротором.

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

**Ключевые слова:** полупроводниковое термосопротивление, пусковой реостат, кривые пусковых токов, обобщенная константа, автоматизация.

Одной из важных задач проблемы полной автоматизации управления электрооборудованием подвижного состава является разработка устройств для автоматического управления электродвигателями с использованием простых, дешевых, малогабаритных, механически стойких элементов. Всем этим требованиям удовлетворяют высокоточные полупроводниковые терморезисторы (ПТР) [1-3].

Мощные полупроводниковые терморезисторы предназначены в основном для работы в быстро протекающих переходных режимах, длительность которых соизмерима с постоянной времени резистора. Под длительностью переходного режима подразумевается время, в течение которого изменение характерной величины достигнет 95% от теоретически возможного. В этих случаях энергия, рассеиваемая резистором в окружающую среду, составляет сравнительно небольшую часть от общего расхода – примерно 3-5% [4].

Как известно, градиенты температур в теле идеального резистора создаются при наличии теплоотдачи, и если мы ею пренебрегаем, то этим

самым пренебрегаем и фактом наличия градиентов температур в этом направлении. Допустимость такого упрощения подтверждается тем, что критерий Био для сильноточных резисторов составляет величину порядка 0,05, а известно, что при значениях этого критерия меньше 0,1 градиентами температур можно пренебречь [5]. Более точные расчеты производятся с учетом теплоотдачи от резистора к окружающему газу или жидкости. Однако, такие расчеты отличаются большой сложностью, так как при этом приходится решать системы линейных дифференциальных уравнений со сложными связями между переменными величинами.

При использовании вместо обычных ступенчатых реостатно-контакторных или контроллерных пусковых устройств – терморезисторных устройств величина их начального сопротивления рассчитывается так, чтобы ограничить пусковой ток до заданной величины. В начальный период пуска, когда температура ПТР мала, а величина сопротивления велика, мощность, выделяемая на ПТР значительна, и они интенсивно прогреваются. При повышении температуры ПТР их сопротивление  $R_T$  плавно уменьшается (нагрев ПТР до рабочей температуры 700°К приводит к снижению его сопротивления приблизительно в 100 раз). Это явление по своему эффекту аналогично автоматическому выведению пускового реостата, обеспечивающего плавное изменение пускового тока в заданных пределах. При этом разгон двигателя осуществляется без бросков тока, без резких изменений ускорения и динамического момента, обуславливающих механические удары, которые угрожают прочности отдельных звеньев электропривода или интенсивно подготавливают их усталостное разрушение.

Использование пускорегулирующих терморезисторных устройств позволяет автоматизировать пуск и торможение двигателей за счет только свойств терморезисторов [6].

Принципиальной особенностью терморезисторов большой мощности, а, следовательно, и большой массы, является наличие значительных градиентов температур в полупроводниковом материале [7].

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

Целью синтеза является обеспечение пуска и разгона двигателя до 90% от номинальных оборотов, после чего пусковой реостат закорачивается.

В качестве примера рассмотрим синтез пускового реостата для асинхронного короткозамкнутого двигателя с фазным ротором.

Целью введения терморезистора в цепь статора короткозамкнутого двигателя и в цепь ротора двигателя с фазным ротором является снижение максимальной величины тока до предельно-допустимой (кривые 2 на рис. 1 а, б).

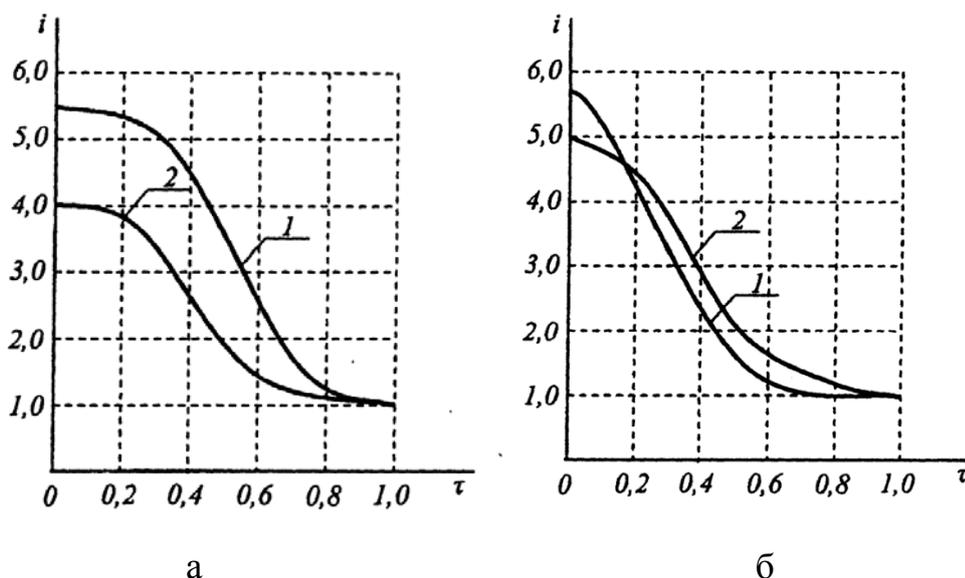


Рис. 1. Кривые пускового тока

Необходимо отметить, что этот эффект сопровождается их противоположной реакцией в отношении развиваемого пускового момента.

Если для короткозамкнутого двигателя вместе с уменьшением начального пускового тока уменьшается и пусковой момент согласно формуле (1):

$$M = \frac{M}{M_H} = i^2 \cdot \frac{S_H}{S} = i^2 \cdot \frac{S}{1 - (1 - S_H)v}, \quad (1)$$

где  $S$  – скольжение;

$v$  – величина пускового момента в относительных единицах,

то для двигателя с фазным ротором такой момент растет.

Это иллюстрируется на рис. 2 а, б, где показано изменение вращающего момента двигателей при прямом запуске (кривые 1) и введении терморезисторов (кривые 2) для короткозамкнутого двигателя (рис. 2, а) и для двигателя с фазным ротором (рис. 2, б). В обоих случаях масса реостата определялась исходя из первой токовой модели [8], а величина  $\gamma$  [9] – рассчитывалась по формулам:

$$\gamma = \frac{B}{S_H C_p T_0^2}; \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{(1 + r_{p0}) \left[ (1 + r_{p0}) - \frac{M_0}{i_0^2 \cdot S_H} \right]}{r_{p0}^2}; \quad (3)$$

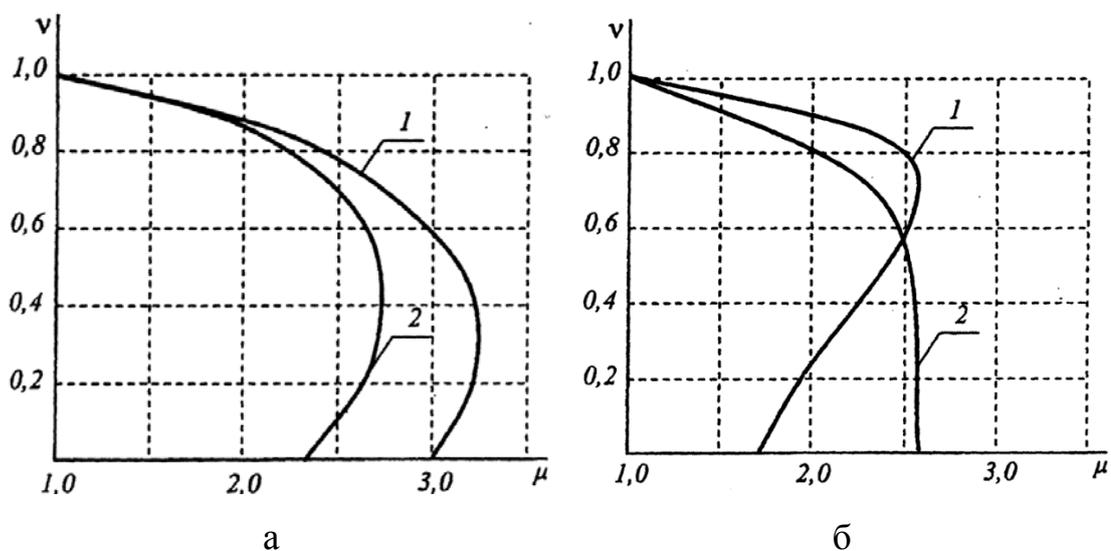


Рис. 2. Изменение вращающих моментов двигателей

Проведем синтез пускового реостата для асинхронного двигателя с фазным ротором.

Величина  $S_k$  определяется известной формулой [10]

$$S_k = \frac{R_2'}{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}, \quad (4)$$

где  $R_1$  – активное сопротивление статора асинхронного двигателя;

$X_1$  – реактивное сопротивление статора асинхронного двигателя;

$R_2'$  – вторичное приведенное сопротивление асинхронного двигателя;

$X_2'$  – вторичное приведенное сопротивление асинхронного двигателя.

Сопротивление реостата

$$r_p = \frac{1}{S_k} - 1. \quad (5)$$

Находим начальный пусковой ток

$$i_0 = \sqrt{\frac{\left(a_1 + \frac{1}{S_H}\right)^2 + a_2^2}{(a_1 + r_p + 1)^2 + a_2^2}}, \quad (6)$$

где  $a_1$  и  $a_2$  – относительные величины (общепринятое обозначение)

$$a_1 = R_1 / R_2'; \quad a_2 = \frac{X_1 + X_2'}{R_2'}$$

и далее – величину обобщенной константы  $\gamma$

$$\gamma = \frac{(1 + r_p) \left[ (1 + r_p) - \frac{M_0}{i_0^2 \cdot S_H} \right]}{r_p^2}, \quad (7)$$

Решение системы уравнений (8) и (9) позволяет сделать вывод о том, что при запуске асинхронных двигателей с фазным ротором с использованием терморезисторов наблюдается двойной положительный эффект – уменьшение пускового тока сопровождается ростом начального пускового момента.

$$\dot{v} = -\mu_0 - \mu_1 v - \frac{\left[ \left( a_1 + \frac{1}{S_n} \right)^2 + a_2^2 \right] \left( 1 + \eta \exp \frac{B}{T_0 + \theta} \right) S_n}{\left[ \left( a_1 + \frac{\eta \exp \frac{B}{T_0 + \theta} + 1}{1 - (1 - S_n)v} \right) + a_2^2 \right] [1 - (1 - S_n)v]}; \quad (8)$$

$$\dot{\theta} = \frac{\left( a_1 + \frac{1}{S_n} \right)^2 + a_2^2}{\left( a_1 - \frac{\eta \exp \frac{B}{T_0 + \theta} + 1}{1 - (1 - S_n)v} \right)^2 + a_2^2} \cdot \frac{r_p S_n T_0^2 \gamma \exp \frac{B}{T_0 + B}}{e^{B/T_0} \cdot B}; \quad (9)$$

где  $\eta = \frac{r_p}{e^{B/T_0}}$ ,

$\theta$  – температура перегрева терморезистора.

Расчет пусковых процессов для ряда асинхронных двигателей путем интегрирования системы дифференциальных уравнений (8) и (9) показал, что запуск успешно реализуется при первой модели пускового тока.

### Литература

1. Шефтель И.Т. Терморезисторы. М.: Наука, 1973. 416 с.
2. Пупко В.В. Автоматизация управления электродвигателями с помощью мощных терморезисторов. М. ГОСИНТИ, №9-68-1216.127, 1968.
3. Henry M.P., Clarke D.W. The self-validating sensor: rationale, definitions and examples. Oxford: Department of Engineering Science, 1993. Pp. 585-610.
4. Xu, X. On-Line sensor calibration monitoring and fault detection for chemicals processes. Maintenance and Reliability Center. 2000. Pp. 12-14.
5. Геращенко О.А. Температурные измерения: справочник. Киев: Наукова думка, 1984. 494 с.
6. Попивненко В.В. Синтез терморезисторных реостатов по заданным переходным режимам. Изв. ВУЗов СССР. Энергетика, 1970, №11.

7. Воронова Н.П., Трубицин М.А. Электрофизические и тепловые характеристики ПТР коаксиального типа. Инженерный вестник Дона, 2018. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4823](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4823).

8. Воронова Н.П., Носков В.Н. Формирование оптимальных моделей пусковых токов при использовании пусковых устройств, построенных на терморезисторах. Инженерный вестник Дона. 2017. № 4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2017/4402](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2017/4402).

9. Пупко В.В. Бесконтактные пускорегулирующие устройства на мощных терморезисторах. М. ГОСИНТИ, №9-68-1216/127, 1968.

10. Соловьев Г.Е., Воронова Н.П. Тепловые и электрофизические характеристики терморезисторов коаксиального типа для запуска электродвигателей вентиляторов. Известия РГСУ. 2011. № 115. С. 135-140.

### References

1. Sheftel I.T. Termorezistory [Thermoresistors]. Moscow: Nauka, 1973. 416 p.
2. Pupko V.V. Automation of electric motors control system by means of powerful thermistors. M. VINITI, № 9-68-1216.127, 1968.
3. Henry M.P., Clarke D.W. The self-validating sensor: rationale, definitions and examples. Oxford: Department of Engineering Science, 1993. Pp. 585-610.
4. Xu X. On-Line sensor calibration monitoring and fault detection for chemicals processes. Maintenance and Reliability Center. 2000. Pp. 12-14.
5. Gerashchenko O.A. Temperaturnye izmereniya [Temperature measuring]: spravochnik. Kiev: Naukova dumka, 1984. 494 p.
6. Popivnenko V.V. Izvestia VUZov USSR. Energetika, 1970, №11.
7. Voronova N.P., Trubitsin M.A. Inzenernyj vestnik Dona. 2018. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4823](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4823).



8. Voronova N.P., Noskov V.N. Inzenernyj vestnik Dona. 2017. №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2017/4402](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2017/4402).
9. Pupko V.V. Noncontact start-controlling device on powerful thermistor. M. VINITI, 9-68-1216.127, 1968.
10. Solov'ev G.E., Voronova N.P. Izvestiya RGSU. 2011. № 115. Pp. 135-140.