

УДК 621.314.57

DOI: 10.30987/1999-8775-2021-3-39-45

В.Н. Носков, Н.П. Воронова

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕРМОЗАВИСИМЫХ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ В ПУСКОВЫХ УСТРОЙСТВАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

Проведен краткий анализ пусковых процессов электротехнических устройств. Предложена методика расчета пусковых реостатов на полупроводниковых терморезисторах. Рассмотрен и сформулирован ряд ограничений, от которых зависит характер процессов пуска электроустановок с по-

мощью терморезисторных реостатов. Даны рекомендации по компоновке пусковых реостатов на полупроводниковых терморезисторах.

Ключевые слова: полупроводниковое сопротивление, термочувствительное заполнение, пусковые характеристики.

V.N. Noskov, N.P. Voronova

THERMODEPENDENT POLYCRYSTAL RESISTORS IN STARTERS OF ELECTRIC MOTORS OF LIFTING AND TRANSPORT MACHINES

The purpose of the work is to create an engineering procedure for the synthesis of starting rheostats on semiconductor thermo-resistors (STR) ensuring a simple and reliable start of electric motors. The developed procedure for the synthesis of starting rheostats based on STSs allows designing simple-formed, small cheap and reliable in operation starting devices of all kinds.

There is developed a universal method of the synthesis of STR-based starting rheostats based on two installed invariants of the similarity of starting processes connecting specified starting indices with the parameters of STR-based rheostats.

The method applies to different types of electric motors taking into account:

- changing temperature conditions of environment;

- quantitative indices of semiconductor material;

- different types of thermo-resistors.

A corresponding algorithm of for the computation of STR-based starting rheostats is developed.

It is proved that a field of thermo-resistor rheostat application is dc and ac electric motors. In the paper there are shown design peculiarities of semiconductor thermo-resistor creation and a number of limitations on which a character of starting electric installations depends are formulated.

Key words: semiconductor resistor, thermo-sensitive filling, starting characteristics.

Введение

Традиционные токоограничивающие пусковые и пускорегулирующие устройства громоздки, сравнительно дороги, неэкономичны в работе и неудобны как в эксплуатации, так и в ремонте. Пуск электродвигателей как постоянного тока, так и асинхронных двигателей с фазным ротором связан с применением набора пусковых сопротивлений, что приводит к повышенным динамическим нагрузкам на них. Помимо этого, применение пусковых сопротивлений обуславливает значительные тепловые потери. Из автоматических способов пуска наибольшее распространение получили релейно-контакторная автоматика и тиристорное управление.

Тиристорные схемы оперативны, производят запуск по наперед заданной программе и регулируют работу электрических устройств в довольно широком диапазоне. Однако, их применение не всегда оправдано из-за сложности, дороговизны, наличия промежуточных звеньев и необходимости высококвалифицированного обслуживания во время эксплуатации, так как по целому ряду потребителей, например, электродвигателей подъемно-транспортных машин, не требуется повышенная оперативность. Их запуск не ограничивается какими-то другими параметрами, кроме необходимости запуска по экспоненциальному закону.

В связи с этим применение пусковых устройств на основе сильноточных полупроводниковых поликристаллических терморезисторов (ПТР) позволит избавиться от большинства недостатков существующих способов пуска [1, 2].

Следует отметить, что применение ПТР представляется особо выгодным с точки зрения экономичности, компактности и надежности, а это особенно актуально в электротехнических устройствах подъемно-транспортных машин ограниченной мощности. Кроме того, пусковые устройства (ПУ), построенные на основе терморезисторов, достаточно просты, компактны и удобны с точки зрения монтажа и ремонта.

К этому можно добавить, что ПУ, построенные на сильноточных ПТР, повышают эксплуатационную надежность подъемно-транспортных машин благодаря вибро- и тряско-устойчивости ПТР.

Таким образом терморезисторный пуск электродвигателей сочетает в себе преимущества известных способов.

Однако, при разработке пусковых схем, к примеру, для крановых двигателей, необходим правильный расчет основных параметров ПУ, так как неудачный выбор может привести к слишком быстрому разогреву тела ПТР, что эквивалентно включению двигателя накоротко [3, 14].

Теоретические положения основ синтеза терморезисторных реостатов

Сопротивление терморезистора определяется по результатам исследования распределения температур в теле ПТР [4, 12]. Расчет производится по схеме попе-

речного сечения терморезистора, в теле которого выделено элементарное кольцо (рис. 1).

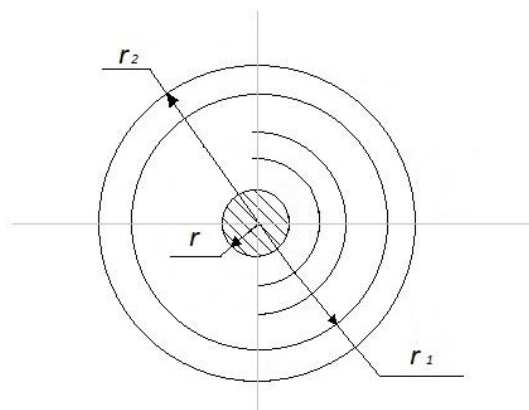


Рис. 1. Схема поперечного сечения терморезистора

Сопротивление элементарного кольца в установившемся режиме при нагрузке

$$dR = \frac{\rho dr}{2\pi l r} = \frac{\rho_{\infty} \exp \frac{B}{T} dr}{2\pi l r}. \quad (1)$$

Полное сопротивление

$$R = \frac{\rho_{\infty}}{2\pi l} \int_{r_1}^{r_2} \frac{\exp \frac{B}{T} dr}{r}. \quad (2)$$

Согласно [3, 14] температура материала терморезистора

$$T = \frac{T_{ox} - 471}{r_2} r + \frac{1}{2\pi l} \left(\frac{1}{\alpha_1 r_2} - \frac{1,6}{\lambda} \right) \rho + 471; \quad (3)$$

$$T = ar + b \text{ или } r = \frac{T - b}{a}, \quad (4)$$

$$\text{где } a = \frac{T_{ox} - 471}{r_2}; \quad b = \frac{1}{2\pi l} \left(\frac{1}{\alpha_1 r_2} - \frac{1,6}{\lambda} \right) \rho + 471; \quad dr = \frac{dT}{a}.$$

Здесь в (3) и (4): ρ – удельное сопротивление полупроводника; λ – коэффициент теплопроводности; a – коэффициент теплоотдачи; T_{ox} – температура охлаждающей среды; B – константа полупроводникового материала; r – радиус внутреннего электрода; r_1, r_2 – соответственно внутренний и внешний радиус наружного электрода; l – длина электрода (рабочей части ПТР).

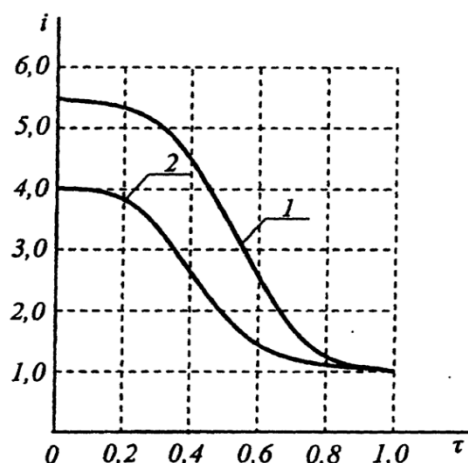
Тогда, подставляя (4) в (2), получаем

$$R = \frac{\rho_{\infty}}{2\pi l} \int_{r_1}^{r_2} \frac{\exp \frac{B}{T} dT}{T - B}. \quad (5)$$

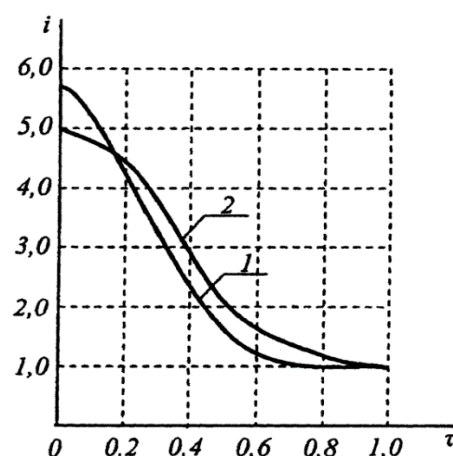
Целью синтеза является обеспечение пуска и разгона двигателя до 90% от номинальных оборотов, после чего пусковой реостат закорачивается.

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. 2 а, б).



а)



б)

Рис. 2. 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

$$M = \frac{M}{M_n} = i^2 \cdot \frac{S_n}{S} = i^2 \cdot \frac{S}{1 - (1 - S_n)v}, \quad (6)$$

где S – скольжение; v – величина пускового момента в относительных единицах, то

для двигателя с фазным ротором такой момент растет.

Это иллюстрируется на рис. 3 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. 3, б). Известная зависимость сопротивления терморезистора, носящая экспоненциальный характер, не приводится.

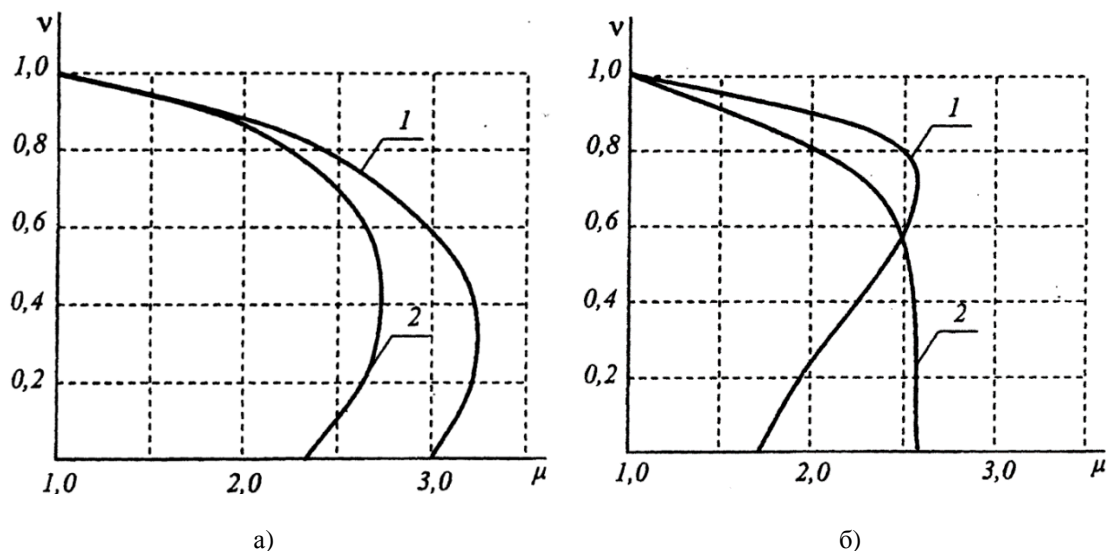


Рис. 3. Изменение вращающих моментов двигателей

Методика расчета пусковых реостатов на ПТР

В случае использования схемы с параллельным соединением терморезисторов и резисторов расчет ведут следующим образом:

1. В основу синтеза реостатов положена либо уже известная Ом-секундная характеристика $R_p(t)$ пускового реостата, либо она строится по заданной кривой набора оборотов $\omega(t)$. В первом случае характеристика $R_p(t)$ строится с помощью известных в теории электропривода методов. Во втором случае, первоначально по заданной кривой $\omega(t)$ определяются, в зависимости от типа двигателя, кривые пускового тока I [9], а затем строится соответствующая Ом-секундная характеристика $R_p(t)$.

2. Начальное сопротивление реостата выражается следующим образом через элементы компоновки реостата

$$R_p = R_\infty \frac{m}{n} I^{\frac{B}{T_0+B}} = R_\infty K I^{\frac{B}{T_0+B}}, \quad (7)$$

где R_p и R_∞ – относятся к элементу ПТР; m – число последовательных элементов реостата; n – количество цепочек, состоящих из последовательных элементов; K – компоновочный коэффициент.

3. Зная Ом-секундную характеристику $R_p(t)$ и найденные в п.2. параметры реостата, можно построить зависимость температуры терморезисторов

от времени $T = f(t)$.

4. По заданной Ом-секундной характеристике $R_p(t)$ и построенной кривой $T = f(t)$ рассчитывается требуемая температурная характеристика реостата $R_p = f(T)$.

5. По приведенной в [1] формуле рассчитывается температурная характеристика реостата и сравнивается с требуемой. В случае их существенного несовпадения соответствующим образом варьируются величины шунтового сопротивления – R_{III} и добавочных линейных сопротивлений ветвей – R_L .

Сформулированные в п.п. 1-5 положения представляют собой своего рода улучшенный алгоритм синтеза реостатов.

Весьма важным моментом рассматриваемого вопроса является констатация того факта, что для многих машин и производственных механизмов вовсе не нужна точная реализация кривой разгона $\omega(t)$, равно как и характеристик $I(t)$ и $R(t)$, а необходимо лишь обеспечение следующих ограничений на пусковые параметры

$$I_m \leq I_{mg}, \Delta t_{\text{пуск}} \leq \Delta t_{\text{мдоп}}. \quad (8)$$

Во втором случае терморезистор представляет собой два соосных цилиндрических электрода с полупроводниковым

термочувствительным наполнителем (рис. 4). В качестве полупроводниковой композиции использованы

поликристаллические мелкодисперсные системы тройных окислов (на основе CO , Mn , Ni , Cu) в различных соотношениях [8].

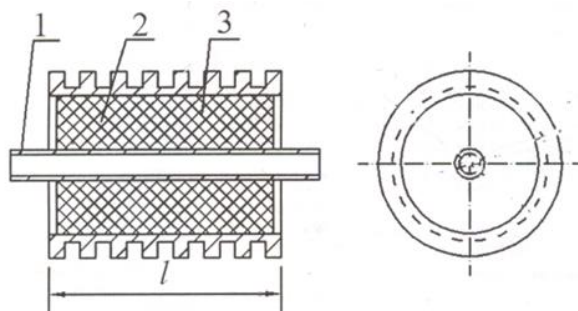


Рис. 4. Конструкция высокоточного терморезистора коаксиального типа: 1 – внутренний электрод; 2 – полупроводниковая термочувствительная композиция; 3 – внешний электрод

Принципиальные основы расчета параметров терморезисторной схемы пускового устройства для соответствующего двигателя, в частности приводов подъемно-транспортных машин, включают следующие этапы:

1. Задаются моделью пускового тока, прогнозирующей ход пускового процесса [9];
2. Исходя из достижения максимального критического момента, выбирают начальное сопротивление реостата r_{p0} ;
3. Определяют величину критического скольжения S ;
4. Совместное решение системы уравнений

$$l = \frac{\rho_0}{2\pi r_{p0} r_{я}} (\ln r_2 - \ln r_1); \quad (9)$$

$$r_2 = \sqrt{\frac{V}{\pi l}} \quad (10)$$

позволяет определить параметры пускового устройства.

В формулах (9) и (10) приняты следующие обозначения: V – объём терморезисторного реостата; $r_{я}$ – сопротивление якоря; l – длина рабочей части тела ПТР.

В пусковой схеме терморезисторные сопротивления включаются в цепь ротора [10, 13].

Заключение

Запуск крановых двигателей с помощью устройств, построенных на терморезисторах, позволяет получить плавный монотонный характер кривых тока и напря-

жения, причём скорость нарастания тока увеличивается настолько плавно, что не вызывает заметных динамических воздействий на механизм привода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шефтель, И.Т. Терморезисторы / И.Т. Шефтель. – М.: Наука, 1973. – 416 с.
2. Терехов, В.М. Осипов О.И. Системы управления электроприводов / В.М. Терехов, О.И. Осипов. – М.: Издательский центр «Академия», 2006.
3. Попивненко, В.В. Синтез терморезисторных реостатов по заданным переходным режимам / В.В. Попивненко // Изв. ВУЗов СССР. Энергетика. – 1970. – № 11.
4. Герашенко, О.А. Температурные измерения: справочник / О.А. Герашенко. – Киев: Наукова думка, 1984. – 494 с.
5. Воробьев, Н.Н. Теория рядов / Н.Н. Воробьев. – СПб.: Лань; 6 изд., 2002. – 408 с.
6. Пупко, В.В. Автоматизация управления электродвигателями с помощью мощных терморезисторов / В.В. Пупко. – М.: ГОСИНТИ, 1970. – № 9-70-1216.127.
7. Пупко, В.В. Бесконтактные пускорегулирующие устройства на мощных терморезисторах /

- В.В. Пупко. – М.: ГОСИНТИ, 1970. – № 9-70-1216/127.
8. **Дамрина, В.М.** Исследование влияния металла – активатора на свойства терморезисторов на основе тройных систем окислов / В.М. Дамрина, Г.Е. Соловьев: тр. РИИЖТа электрические элементы автоматических и информационных систем ж/д транспорта. – 1975. – Вып. 117.
 9. **Воронова, Н.П.** Формирование оптимальных моделей пусковых токов при использовании пусковых устройств, построенных на терморезисторах / Н.П. Воронова, В.Н. Носков // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 4. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2017/4402.
 10. **Чиликин, М.Г.** Общий курс электропривода: учебник для вузов / М.Г. Чиликин, А.С. Сандлер. – М.: Энергоиздат, 1981.
 11. **Соловьев, Г.Е.** Сильноточные полупроводниковые терморезисторы коаксиального типа и пусковые устройства электродвигателей на их основе. / Н.П. Воронова, Е.К. Глазунова, Т.А. Скорик // Известия Ростовского государственного строительного университета. – 2014. – Т. 1. – № 18 (18). – С. 57–63.
 12. **Воронова, Н.П.** Электрофизические и тепловые характеристики полупроводниковых термосопротивлений коаксиального типа. / Трубицин М.А // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 2 (49).
 13. **Воронова, Н.П.** Поликристаллические термозависимые полупроводниковые сопротивления коаксиального типа и пусковые устройства на их основе. / М.А. Трубицин, Е.Ю. Микаэльян // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 3 (37).
 14. **Воронова, Н.П.** Теоретические обоснования работы и конструктивные особенности сильноточных терморезисторов коаксиального типа. / М.А. Трубицин, А.В. Безуглый // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 2 (41).
1. **Sheftel, I.T.** *Thermo-resistors* / I.T. Sheftel. – М.: Science, 1973. – pp. 416.
 2. **Terekhov, V.M., Osipov, O.I.** *Systems of Electric Drive Control* / V.M. Terekhov, O.I. Osipov. – М.: “Academy” Publishing Center, 2006.
 3. **Popivnenko, V.V.** Synthesis of thermo-resistor rheostats on specified transition modes / V.V. Popivnenko // *Proceedings of the USSR Colleges. Power Engineering*. – 1970. – No.11.
 4. **Gerashchenko, O.A.** *Temperature Changes: reference book* / O.A. Gerashchenko. – Kiev: Scientific Thought, 1984. – pp. 494.
 5. **Vorobiyov, N.N.** *Series Theory* / N.N. Vorobiyov. – S-Pb.: Lan; 6-th Edition, 2002. – pp. 408.
 6. **Pupko, V.V.** *Automation of Electric Motor Control Using Powerful Thermo-resistors* / V.V. Pupko. – М.: ГОСИНТИ, 1970. – No.9-70-1216.127.
 7. **Pupko, V.V.** *Contactless Starting-Controlling Devices with Powerful Thermo-Transistors* / V.V. Pupko. – М.: ГОСИНТИ, 1970. – No.9-70-1216/127.
 8. **Damrina, V.M.** Research of impact of metal-activator upon properties of thermo-resistors based on triple oxide systems / V.M. Damrina, G.E. Soloviyov: *Proceedings of RIERT Electric Elements of Automated and Information Systems of Railway Transport*. – 1975. – Issue 117.
 9. **Voronova, N.P.** Formation of optimum models of starting currents using starting devices formed with thermo-resistors / N.P. Voronova, V.N. Noskov // *Don Engineering Bulletin*. – 2017. – No.4. - URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2017/4402.
 10. **Chilikin, M.G.** *General Course of Electric Drive: textbook for colleges* / M.G. Chilikin, A.S. Sandler. – М.: Energoizdat, 1981.
 11. **Soloviyov, G.E.** *Precise semiconductor thermo-resistors of coaxial type and electric motor starting devices on their basis*. / N.P. Voronova, E.K. Glazunova, T.A. Skorik // *Proceedings of Rostov State Construction University*. – 2014. – Vol.1. – No.18(18). – pp. 57-63.
 12. **Voronova, N.P.** Electro-physical and thermal characteristics of semiconductor thermo-resistors of coaxial type. / Trubitsyn M.A. // *Don Engineering Bulletin*. – 2018. – No.2(49).
 13. **Voronova, N.P.** Polycrystalline thermo-dependent semiconductor resistors of co-axial type and starting devices on their basis. / M.A. Trubitsyn, E.Yu. Michaeliyan // *Don Engineering Bulletin*. – 2015. – No.3(37).
 14. **Voronova, N.P.** Theoretical substantiations of operation and design peculiarities of precision thermo-resistors of coaxial type. / M.A. Trubitsyn, A.V. Bezugly // *Don Engineering Bulletin*. – 2016. – No.2(41).

Ссылка цитирования:

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. – С. 39 - 45. DOI: 10.30987/1999-8775-2021-3-39-45.

Статья поступила в редакцию 01.11.20.

Рецензент: к.т.н., доцент Брянского государственного
технического университета

Пугачев А.А.

Статья принята к публикации 24.02.21.

Сведения об авторах:

Носков Владимир Николаевич, к.т.н., доцент, Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), тел. +7(863)272-62-80, e-mail: nvn_nis@sci.rgups.ru.

Noskov Vladimir Nikolaevich, Can. Sc. Tech., Assistant Prof., Rostov State University of Railways (RSUR), phone: +7 (863)-272-62-80, e-mail: nvn_nis@sci.rgups.ru.

Воронова Наталья Павловна, к.т.н., доцент, Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), тел.: +7(928)628-46-24, e-mail: Voronova044@inbox.ru.

Voronova Natalia Pavlovna, Can. Sc. Tech., Assistant Prof., Rostov State University of Railways (RSUR), phone: +7 (928)628-46-24, e-mail: Voronova044@inbox.ru.