

## Пусковые реостаты на полупроводниковых терморезисторах для пуска электродвигателей

*А.В. Безуглый, Н.П. Воронова*

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

**Аннотация:** Проведен краткий анализ пуска двигателей постоянного тока с помощью регулируемых сопротивлений и терморезисторных реостатов. Установлен диапазон возможностей терморезисторов для получения оптимальных кривых пускового тока. Приведены графические зависимости влияния величины нагрузочного момента на процесс разгона двигателя через полупроводниковый реостат. Даны рекомендации по компоновке пусковых реостатов на полупроводниковых терморезисторах.

**Ключевые слова:** полупроводниковое сопротивление, пусковой реостат, двигатель постоянного тока, кривые пусковых токов, комбинированное пусковое сопротивление.

В связи с тем, что большое количество потребителей электрической энергии обладают малой мощностью и широким разнообразием энергетических параметров вопросы простоты, дешевизны и малых габаритов систем автоматизированного управления [1] для данного класса потребителей имеет важное значение. Применение в автоматизированных системах пуска электрических двигателей малой и средней мощности полупроводниковых терморезисторов (ПТР) [2, 3] позволяет осуществлять процессы трогания и разгона электрического двигателя плавно, без рывков, [4], при отсутствии бросков тока. Максимальное значение тока при пуске можно изменять в широких пределах изменяя массу пускового реостата.

Полупроводниковые терморезисторы (ПТР), как правило, обладают значительным отрицательным температурным коэффициентом [5, 6]. Одной из главных характеристик терморезистора является константа  $B$ , определяемая свойствами материала ПТР [7] и входящими в формулу

$$R = Ae^{B/t}.$$

Начальное сопротивление реостата, выраженное через элементы компоновки, определяется выражением

$$R_0 = R_{OT} \frac{(b_k + \beta)k}{(b_k + \beta) + kb_k},$$

где  $b_k = \exp \frac{B\theta}{T_k T_0}$ ,  $k = \frac{R_{ш}}{R_{OT}}$ .

В свою очередь  $R_{OT} = r_{OT} \frac{m}{n}$ .

Система дифференциальных уравнений, описывающая пусковой процесс электродвигателя постоянного тока со смешанным возбуждением с помощью терморезисторов, имеет вид

$$J \frac{d\omega}{dt} = C_M I - M_0 - M_1 \omega,$$

$$\frac{d\theta}{dt} = I^2 \frac{R_p}{C_p} - \alpha F \theta.$$

Выражение описывающее пусковой процесс в относительных единицах

$$\frac{d\omega}{dt} = i - \mu_0 - \mu_1 v = \dot{v},$$

где  $i$  – ток двигателя;  $\mu_0$  – постоянная составляющая момента сопротивления отнесенная к номинальным параметрам;  $\mu_1$  – линейная составляющая момента сопротивления отнесенная к номинальным параметрам;  $v$  – скорость в относительных единицах при принятой за единицу механической постоянной времени [8, 9].

Считая оптимальным запуском электродвигателя процесс, при котором регулировка его пускового тока в течение пускового периода  $\Delta\tau_{II}$  сопровождается минимальным выделением теплоты [10] задачу оптимизации режима пуска можно решить, используя методы вариационного исчисления.

Если в цепь электродвигателя включить ПТР, сопротивление которого в «холодном» состоянии равно сопротивлению пускового реостата, то в первый момент после включения двигателя пусковой ток будет ограничен до

расчетной величины. Затем ток, протекающий через ПТР, прогревает структуру терморезистора и его сопротивление снижается. Этот эффект эквивалентен автоматическому выведению пускового сопротивления. Таким образом использование полупроводниковых сопротивлений в качестве пусковых позволяет осуществить плавный, бесконтактный пуск электродвигателя. Это обстоятельство является достоинством полупроводниковых терморезисторов.

Экспериментальное исследование процесса запуска электродвигателей с помощью ПТР производилось на двигателе постоянного тока со смешанным возбуждением мощностью 2,6 кВт при напряжении 110 В.

При проведении опытов ставилась задача выяснения качества пуска двигателя и влияния на этот процесс таких факторов, как масса и начальное сопротивление полупроводникового реостата, степень загрузки двигателя, влияние инерционной и механической характеристики привода.

Влияние массы и начального сопротивления ПТР на процесс пуска изучались на двигателях типа П42М (мощность 2,6 кВт, номинальный ток 32,7 А).

Пуск двигателя через терморезистор характеризуется плавным, без рывков, троганием и разгоном двигателя, а также отсутствием бросков тока. Максимальное значение тока при пуске можно изменять в широких пределах изменяя массу пускового реостата. Максимальное значение тока при пуске можно изменить в широких пределах, меняя массу ПТР (Рис. 1, кривая 1).

При относительно больших значениях массы ПТР имеет место равенство максимального и установившегося тока.

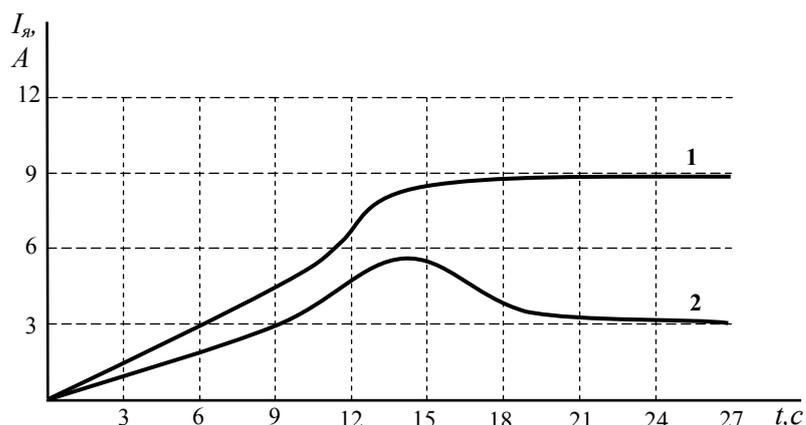


Рис. 1  
 Кривые пусковых токов при большой – 1  
 и незначительной – 2 массе ПТР

Для изучения влияния массы  $M$  начального сопротивления ПТР производились запуски двигателя П42М через различное число последовательно включенных элементов терморезисторов. В таблице 1 приведены сравнительные данные испытаний для нагрузки двигателя 50% от номинальной.

Таблица 1

Сравнительные данные испытаний

№ испытания	Число последовательно включенных элементов	Отношение максимального тока при пуске к установившемуся	Полное время пуска, с
1	1	Пуск неудачен, разрушение ПТР	
2	2	2,1	4
3	3	1,3	8
4	4	1,1	11
5	5	1,0	16

Исследования показали, что при большом числе последовательно включенных элементов (4-5) «горячее» сопротивление пускового реостата возрастает настолько, что при закорачивании его имеет место бросок тока того же порядка по величине, что и максимальный ток при пуске. Поэтому, при выборе пускового реостата необходимо иметь в виду, что его «горячее»

сопротивление не должно быть больше сопротивления якоря электродвигателя.

Экспериментальные исследования показали, что масса полупроводникового пускового реостата оказывает очень большое влияние на режим пуска двигателя, в то время как величина начального сопротивления влияет очень незначительно. Это объясняется тем, что при выборе реостата по «горячему» сопротивлению, величина «холодного» сопротивления достаточно велика при любом способе соединения полупроводниковых элементов в пусковом реостате. Был проведен ряд опытов по запуску двигателя через два полупроводниковых реостата, причем в первом случае реостаты были соединены последовательно, а во втором – параллельно. Таким образом, масса пускового реостата в обоих случаях была одинаковой, а сопротивления отличались в 4 раза. Результаты этих опытов отличались друг от друга незначительно. Более того, параллельное включение двух реостатов при пуске дает значительное снижение максимального значения пускового тока по сравнению с пуском через один такой реостат, т.е. увеличение массы вдвое влияет гораздо сильнее, чем уменьшение сопротивления в 2 раза. Был проведен цикл опытов по изучению влияния величины нагрузочного момента на процесс разгона двигателя через полупроводниковый реостат.

Таблица 2

Данные испытаний влияния величины нагрузочного момента на процесс разгона двигателя через полупроводниковый реостат

№ испытания	Установившийся ток нагрузки, А	Максимальный ток при пуске, А	Кратность максимального тока к установившемуся
1	3	18	6
2	10	21	2,1
3	18	15	1,4

На рис. 2 приведены кривые пускового тока двигателя П42М для трех различных нагрузок.

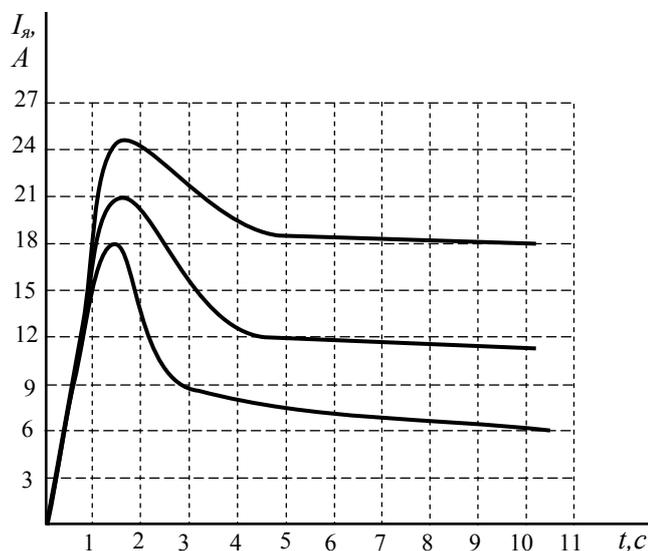


Рис. 2

Кривые пусковых токов двигателя П42М при различных нагрузках

Из рисунка 2 и таблицы 2 видно, что максимальный ток при пуске растет медленнее, чем установившийся ток нагрузки.

Улучшение пусковых характеристик может быть достигнуто если параллельно полупроводниковому сопротивлению подключить в виде шунта линейное активное сопротивление. Эта мера, с одной стороны, при правильной подборке шунта позволит получить более плавные кривые разгона при одновременном уменьшении времени пуска, с другой стороны – значительно сократить число необходимых полупроводниковых элементов. При пуске двигателя, когда ротор ещё неподвижен, почти всё напряжение, подаваемое к клеммам машины, оказывается приложенным к пусковому сопротивлению. Если последнее выполняется из одних полупроводниковых терморезисторов, то для ограничения протекающего через него тока до допустимых пределов приходится набирать большое количество последовательно включенных элементов. Количество параллельных групп определяется допустимым током в горячем состоянии.

Количество последовательно включенных элементов можно значительно уменьшить, если использовать ЭДС самоиндукции обмоток машины, возникающую в первый момент пуска двигателя. Включая параллельно ПТР сравнительно небольшое обычное пусковое сопротивление, можно вызвать сразу же после включения бросок тока (в пределах допустимого) и, следовательно, возбудить большую ЭДС самоиндукции, которая и уравновесит большую часть приложенного напряжения. Необходимо отметить, что обычное пусковое сопротивление оказывается включенным очень кратковременно (доли секунды), так как разогревающиеся ПТР быстро его закорачивают. Благодаря этому, количество тепла, выделяющееся на шунте, мало и сам шунт может быть сделан маломощным.

Таким образом следует отметить, что общие габариты комбинированного пускового сопротивления (из ПТР и шунта) примерно в 10 раз меньше, чем габариты заводских пусковых реостатов, рассеиваемая на них энергия в 2 раза меньше, чем при пуске через обычные реостаты.

### 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/.
  2. Henry, M.P., Clarke D.W. The self-validating sensor: rationale, definitions and examples – Oxford: Department of Engineering Science, 1993. pp. 585-610.
  3. Xu, X. On-Line sensor calibration monitoring and fault detection forcemical processes //Maintenance and Reliability Center. – 2000. pp. 12-14.
  4. Мальцев В.Ф. Электрооборудование пассажирских вагонов. М: Маршрут, 2007. – 84 с.
-

5. Геращенко О.А. Температурные измерения: справочник // Киев: Наукова думка, 1984. – 494 с.
6. Игнатъев В.К., Никитин А.В., Перченко С.В., Станкевич Д.А. Динамическая компенсация дополнительной погрешности прецизионного АЦП // Инженерный вестник Дона, 2012, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/.
7. Винокуров В.И., Каплин С.И., Петелин И.Г. Электрорадиоизмерения: Учебное пособие для вузов. – М: Высшая школа, 1986. –351.
8. Соловьев Г.Е., Воронова Н.П.. Тепловые и электрофизические характеристики терморезисторов коаксиального типа для запуска электродвигателей вентиляторов // Известия РГСУ. 2011. № 115. с. 135-140.
9. Соловьев Г.Е., Воронова Н.П., Пусковые устройства заданных параметров на полупроводниковых терморезисторах коаксиального типа // Вестник Восточноукраинского университета им. В. Даля. 2013. №3, ч.1. с. 148-150.
10. Воронова Н.П., Носков В.Н. Формирование оптимальных моделей пусковых токов // Инженерный вестник Дона, 2017, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4402/.

### References

1. A.V. Gavrilenko, A.L. Kirsanov, T.P. Eliseeva Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2011, №1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2011/.
  2. Henry, M.P., Clarke D.W. The self-validating sensor: rationale, definitions and examples. Oxford: Department of Engineering Science, 1993. pp. 585-610.
  3. Xu, X. On-Line sensor calibration monitoring and fault detection forcemical processes. Maintenance and Reliability Center. 2000. pp. 12-14.
-



4. Mal'tsev V.F. Elektrooborudovanie passazhirskikh vagonov [Electrical equipment of passenger cars]. Moscow, Marshrut, 2007. 84 p.
5. O.A. Gerashchenko Temperaturnye izmereniya [Temperature measuring]: spravochnik, Kiev : Naukova dumka, 1984, 494 p.
6. V.K. Ignat'ev, A.V. Nikitin, S.V. Perchenko, D.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus),2012, №2 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/).
7. V. I. Vinokurov, S. I. Kaplin, I. G. Petelin Elektroradioizmereniya: [Electro- and radio metering] : Uchebnoe posobie dlya vuzov. Moscow: Vysshaya shkola, 1986, 351 p.
8. G.E. Solov'ev, N.P.Voronova. Izvestiya RGSU, 2011, № 115, pp. 135-140.
9. G.E. Solov'ev, N.P. Voronova. Vestnik Vostochnoukrainskogo universiteta im. V. Dalya., 2013, № 3, ch1. 148-150 p.
10. Voronova N.P., Noskov V.N. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2017, №4 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4402/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4402/).