

## Динамические характеристики реостатов и методологические принципы их синтеза

*Н.П. Воронова, М.А. Трубицин*

*Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-н-Дону*

**Аннотация:** В статье проведен краткий анализ тепловых процессов происходящих при запуске электрического двигателя. Представлены математические соотношения, моделирующие распределение тепловой энергии в терморезисторе в процесс пуска двигателя постоянного тока. Представлены графические зависимости, позволяющие произвести компоновку терморезисторов для пускового реостата и определить параметры полученного таким образом пускового реостата. Применение пускового реостата выполненного на базе терморезисторов, обеспечивает оптимальный пуск машины постоянного тока.

**Ключевые слова:** пускорегулирующие устройства, терморезистор, пусковой реостат, двигатель постоянного тока, температура, динамическая характеристика, форма пускового тока.

Для плавного пуска мощных электрических машин целесообразно использовать пускорегулирующие устройства, имеющие возможность менять свои параметры за небольшой промежуток времени (ограничиваемый временем пуска). Применяемые пускорегулирующие устройства должны также выполнять роль ограничения пусковых токов и при превышении допустимых значений способствовать быстрому отключению электродвигателя от питающей сети [1]. Предъявляемым требованиям отвечает аппаратура, выполненная с помощью полупроводниковых элементов. Самым распространенным элементом является терморезистор [2].

Параметры терморезистора определяются параметрами «защищаемого» двигателя (величиной пускового тока). При пуске двигателей терморезисторы, выполняют роль пускового реостата [3]. Величина сопротивления пускового реостата может быть определена по экспериментальному выражению:

$$\tau_p^* = \frac{1 + m' - v}{m' i^*} - 1 \quad (1)$$

где:  $i^*$  -ток двигателя;

$v$  - скорость в относительных единицах при принятой за единицу времени механической постоянной;

$m'$  - коэффициент, учитывающий момент сопротивления электродвигателя (постоянную и линейную составляющую).

Сопротивление терморезистора [4], входящего в состав пускового реостата, соответственно, определяется по выражению:

$$R = R_{\infty} e^{\frac{B}{T_0 + \theta}} \quad (2)$$

где :  $R_{\infty}$  -сопротивление терморезистора при бесконечно большой температуре;

$T_0$  – температура окружающей среды;

$B$  – константа, определяемая свойствами полупроводникового материала;

$\theta$  – температура перегрева.

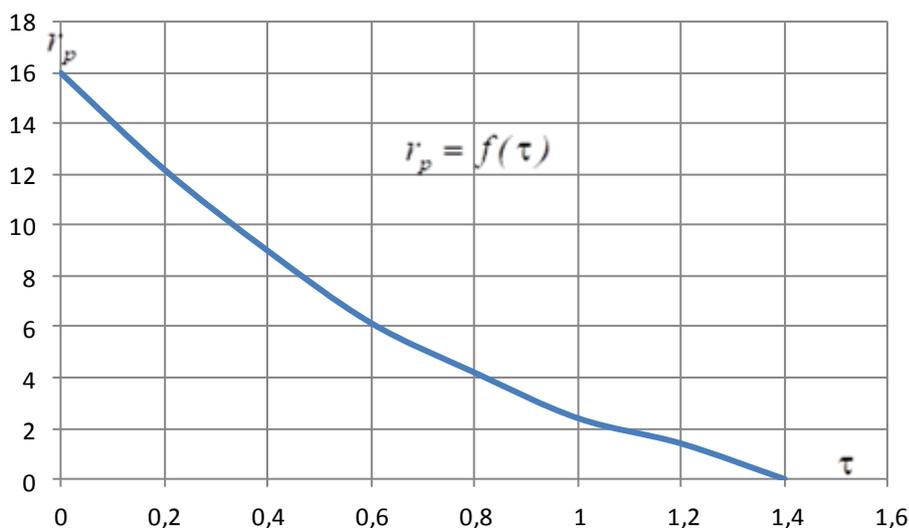


Рис.1 Ом-секундная характеристика

На рис.1 изображена Ом-секундная характеристика  $r_p = f(\tau)$ ,

построенная по формуле 1. Очевидно, что в процессе пуска в идеализированном реостате накапливается тепло от прохождения пускового тока, что, в свою очередь, приводит к росту его температуры по некоторому закону  $T(\tau)$  [5]. Построим динамическую характеристику идеализированного реостата  $r_p = f(T)$  в целях последующего её сопоставления с аналогичной характеристикой (1) для пускового терморезистора (ПТР).

Эта характеристика может быть построена следующим образом. Предварительно рассчитывается тепло (в относительных единицах), выделяемое в идеализированном реостате на каждом временном интервале  $\Delta\tau$  в процессе пуска:

$$\Delta q_i = (i_j^c)^2 r_{pj} \Delta\tau \quad (3)$$

где  $i_j^c$  и  $r_{pj}$  - средние значения тока и сопротивления реостата на  $j$ -м интервале времени  $\Delta\tau$ . Для последующего расчета температуры реостата необходим переход к абсолютным единицам тепла:

$$\Delta Q_j = \Delta q_j \cdot Q_H = \Delta q_j \cdot I_H^2 R_{я} T_{MH} \quad (4)$$

Теперь, используя величины (3) и (4) можно рассчитать температуру реостата на каждом временном интервале  $\Delta\tau_z$  по формуле:

$$T_z = T_0 + \sum_{j=1}^z \frac{\Delta Q_j}{m \cdot n \cdot C} \quad (5)$$

Здесь учтено, что, во-первых, идеализированный реостат компонуется, также как и реостат ПТР, из  $N = m \cdot n$  стандартных элементов, включенных по схеме последовательно-параллельного соединения ( $m$  – число последовательных элементов в цепочке,  $n$  – число параллельных цепочек с теплоемкостью  $C$  каждого; во-вторых, что данный тепловой процесс адиабатический, в силу своей кратковременности [6]. На рис.2.а,б построены кривые для двигателя со следующими данными:  $I_H = 21,4\text{А}$ ;



$U=320\text{В}; T_{\text{MH}} = 3C(J = 0,2\text{кгм}^2); R_{\text{Я}} = 0,51\text{Ом}$ . Теплоемкость  $C_{\text{ИТР}}$  принята

равной  $C = 16 \frac{\text{Дж}}{\text{град}}$ ,  $T_0 = 293\text{K}$ . Искомая динамическая характеристика строится по идеализированной Ом-секундной зависимости  $r_p(\tau)$  и

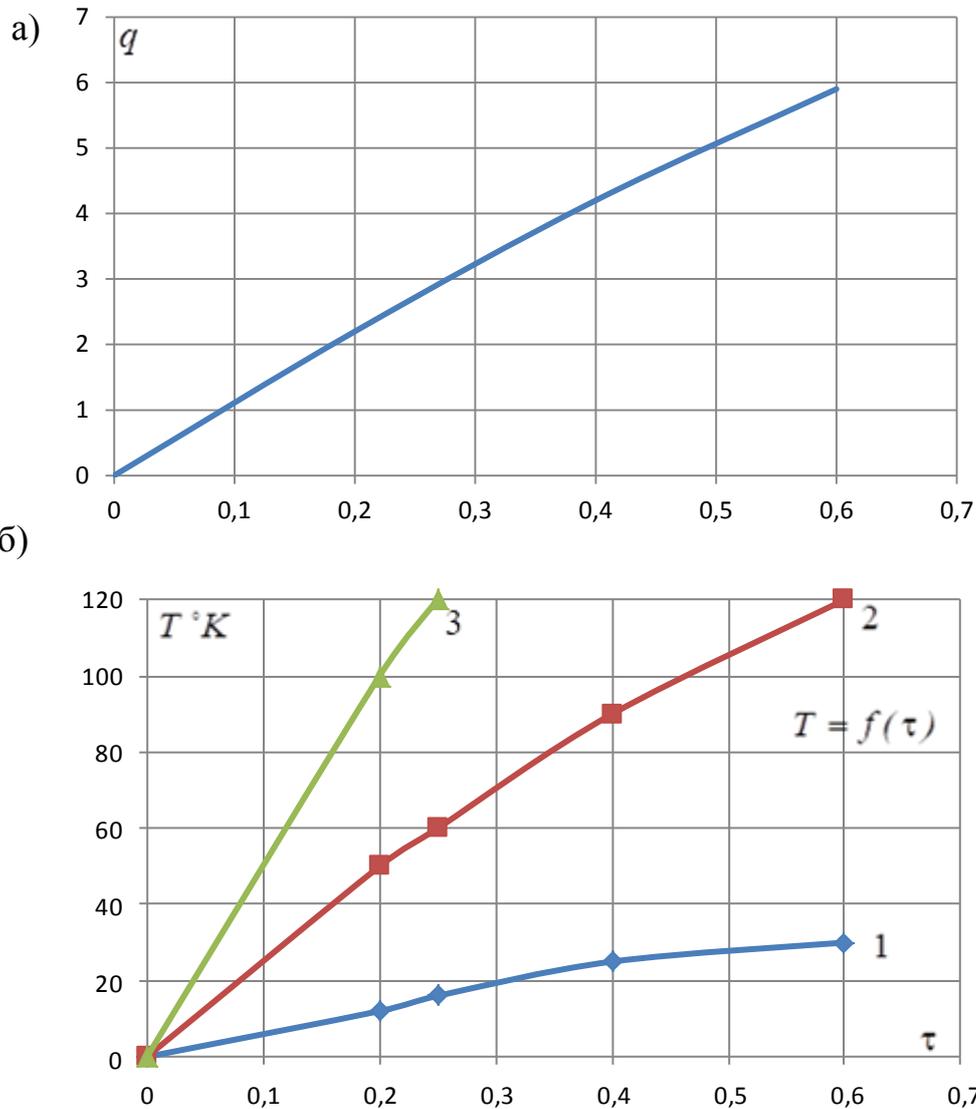


Рис.2. Графики тепловых процессов

соответствующей температурно-временной характеристике (5). На рис.3 показаны три динамические характеристики идеализированных реостатов  $r_p(T)$ , отвечающие  $N_3=1, N_2=1, N_1=15$ . На этом же рисунке для сравнения нанесена динамическая характеристика (1) элемента ПТР, имеющая следующие численные показатели:  $R_\infty = 0,053\text{Ом}$ ,  $B=123^\circ\text{K}$

Первым этапом синтеза пускового реостат на ПТР является обеспечение оптимального значения начального тока  $i_0$  (или какого-либо заданного значения) [7]. Для этого необходимо динамическую характеристику 1 на рис.3, передвигая вверх параллельно самой себе,

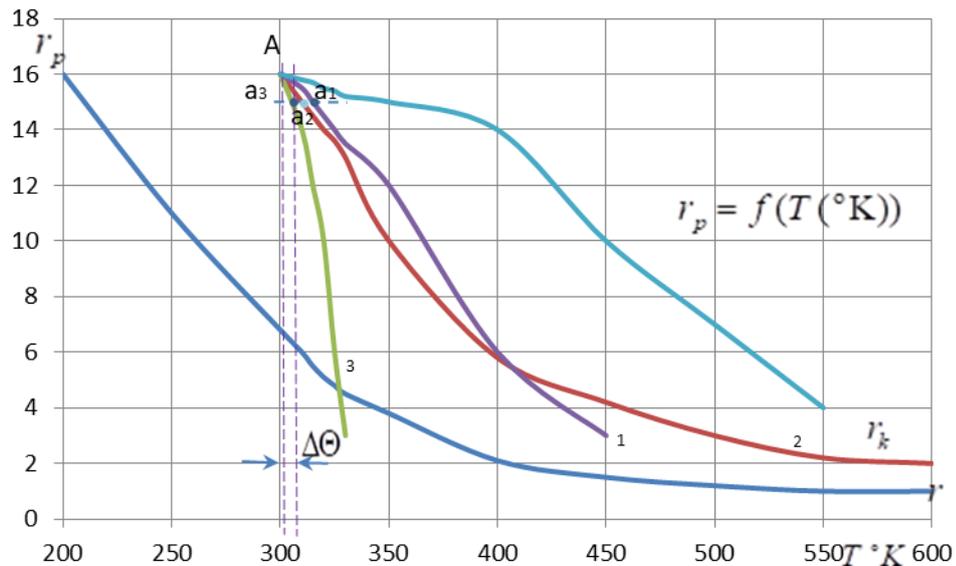


Рис.3. Динамические характеристики пусковых реостатов на ПТР

совместить с исходной точкой  $A$  идеализированных динамических характеристик, отвечающих температуре  $T_0$  и начальному сопротивлению  $r_0$ . Такое её движение эквивалентно умножению сопротивления одного элемента ПТР на некоторый коэффициент  $K > 1$ . При принятой схеме соединения элементов в реостате этот «компоновочный» коэффициент -

$$K = \frac{m}{n}.$$

Вторым, и последним этапом синтеза пусковых реостатов является определение общего числа  $N$  его элементов (массы реостата); наряду с уже известным значением «компоновочного» коэффициента  $K$ , это определит искомые величины  $m$  и  $n$ . Выясним, как влияет масса идеализированного реостата и реостата на ПТР на поведение динамических характеристик.

Проведем анализ, придавая последовательно массе этих реостатов три значения  $m_1 > m_2 > m_3$ . Нетрудно видеть, что динамическая характеристика идеализированного реостата при этом вращается по часовой стрелке вокруг точки  $A$ , что обеспечивает ей за время  $\Delta t$  одинаковое снижение его сопротивления (см. расположение точек  $a_1, a_2, a_3$  на рис.3).

Это вращение вскрывает физическую суть понятия «идеализированный» реостат – его материал должен обладать «идеализированным» свойством менять свои динамические качества с изменением массы [8]. Материал терморезисторов такими свойствами не обладает и при любой массе динамическая характеристика остается неизменной [9]. При этих же трех массах реостат на ПТР будет иметь те же перегревы, что и идеализированный реостат, но в силу указанной инвариантности его свойств, уменьшение его массы приведет лишь к более быстрому скольжению точки  $A$  вниз по характеристике. При этом одинаковым перегревам отвечают меньшие сопротивления реостатов на ПТР [10]. Это обуславливает более быстрый спад его Ом-секундной характеристики на начальном этапе (по сравнению с идеализированной), и большие величины пусковых токов по сравнению с оптимальными.

Очевидно, что существует такая масса реостатов, при которой имеет место лишь касание их динамических характеристик в точке  $A$ . В качестве такой массы, для рассматриваемого примера на рис.3, оказалась масса  $m$ . Нетрудно убедиться, что последней отвечает одинаковое, с оптимальным начальное направление пускового тока при использовании реостата на ПТР, однако в дальнейшем этот ток будет убывать быстрее, чем оптимальный, и как показали расчеты, не обеспечит запуск двигателя. Отсюда следует, что реостат на ПТР должен обладать массой меньшей, чем  $m_1$  – это приводит к форме пускового тока показанной кривой 3 на рис.3. Расчеты пусковых

---

процессов показали, что запуск двигателя обеспечивается при такой критической массе  $m_{кр1}(N_{кр1})$  реостата на ПТР, когда площадь, описываемая соответствующим пусковым током, равна аналогичной площади для оптимального пускового тока. С другой стороны, масса реостата на ПТР не должна быть слишком малой – это может привести к превышению амплитуды пускового тока над его предельно допустимым значением [10]. Назовем второй критической массой массу  $m_{кр2}(N_{кр2})$ , при которой амплитудное значение пускового тока оказывается равным предельно допустимому. Таким образом, при синтезе реостата необходимо соблюдение неравенства  $N_{кр1} < N < N_{кр2}$ .

Граничные значения  $N_{кр1}$  и  $N_{кр2}$ , зависят от принятой величины начального тока  $i_0$ , то есть, от «компоновочного» коэффициента  $K$  и могут быть получены экспериментальным путем.

### Литература

1. Пупко В.В., Попивненко В.В. К расчету пускорегулирующих терморезисторных устройств. Известия вузов «Электромеханика», 1979. №9, с.26-32.
2. Богданов Б. Г., Сависько П.А., Зотов В.В. Ферритовые параметроны и терморезисторы в бесконтактных переключающих схемах. - М.: Сов. радио, 1970. - 290 с.
3. Шашков А.Г. Терморезисторы и их применение. - М.: Энергия, 1967. - 319 с.
4. Шашков А.Г., Касперович А.С. Динамические свойства цепей с термисторами. М.-Л., Госэнергоиздат, 1962. 208с.
5. Xu, X. On-Line sensor calibration monitoring and fault detection forcemical processes //Maintenance and Reliability Center. – 2000. pp. 12-14.

6. Davidson J.L., Kang W.P., Gurbaz Y. et al. // *Diamond Rel. Mater.* 1999. V. 8. P. 1741.
7. Чиликин М.Г., Сандлер А.С., *Общий курс электропривода* -М.: Энергоиздат. 1981.321с.
8. Юревич Е.И. *Теория автоматического управления.* 4-е изд. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2016. 560с.
9. 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).
10. 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).

### References

1. Pupko V.V., Popivnenko V.V. *Izvestiya vuzov "Elektromexanika".* 1979. №9. pp. 26-32.
  2. Bogdanov B.G., Savis'ko P.A., Zotov V.V. *Ferritovye parametry i termorezistory v beskontaktnyh pereklyuchayushchih skhemah* [Ferrite parametrons and thermistors in proximity switching circuits]. М. : Sov. radio, 1970. 290 p.
  3. Shashkov A.G. *Termorezistory i ih primenenie* [Thermistors and their applications]. М.: Energiya, 1967. 319 p.
  4. Shashkov A.G., Kasperovich A.S. *Dinamicheskie svojstva cepej s termistorami* [Dynamic properties of circuits with thermistors]. М.Л., Gosenergoizdat, 1962. 208p.
  5. Xu, X. *On-Line sensor calibration monitoring and fault detection forcemical processes* /Maintenance and Reliability Center. 2000. pp. 12-14.
-



6. Davidson J.L., Kang W.P., Gurbaz Y. et al. Diamond Rel. Mater. 1999. V. 8. P. 1741.
7. Chilikin M.G., Sandler A.S., Obshchij kurs elektroprivoda [The General course of the drive]. M.: Energoizdat, 1981. 321p.
8. Yurevich E.I. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya [Automatik kontrolteoria]. 4 izd. Sankt-Peterburg: BHV-Peterburg, 2016. 560 p.
9. 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).
10. 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).