

## Алгоритмы синтеза терморезисторных реостатов при учете ограничений по температуре

*Н.П. Воронова, М.А. Трубицин*

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

**Аннотация:** Применение мощных терморезисторов в составе пускорегулирующей аппаратуры способствует плавному пуску мощных двигателей с одновременным контролем температуры. При расчете процессов пуска имеется ряд ограничений, от которых зависит характер пуска электродвигателей с помощью терморезисторных реостатов. Расчетные соотношения, описывающие математическую модель влияния температуры перегрева полупроводниковых терморезисторов на процесс пуска двигателей с помощью пускового реостата, представлены в виде графических зависимостей. В результате моделирования компоновки терморезисторных реостатов было определено, что необходимо особое внимание уделять температуре нагрева материала.

**Ключевые слова:** полупроводниковый терморезистор, пусковой реостат, граничные условия, нагрев, удельное тепловыделение, асинхронный двигатель, пусковой ток, температура перегрева.

Традиционные пусковые и пускорегулирующие устройства представляют собой сложную, многозвенную систему, надежность которой определяется целым рядом промежуточных устройств, которые громоздки, дороги и неэкономичны в работе. Причем, ступенчатость пуска является одним из самых больших недостатков, отрицательно сказывающихся на динамике пускового процесса [1,2].

Сильноточные полупроводниковые терморезисторы (ПТР) имеют значительные преимущества по сравнению с другими пусковыми устройствами. Они представляют собой сложную многофакторную систему, работоспособность и надежность которой зависят от целого ряда параметров, влияющих на свойства и характер протекающих процессов [3].

При обосновании методики синтеза принималось основное техническое ограничение по максимальной величине пускового тока:

$$I_m \leq I_\delta \tag{1}$$

Ограничение по времени пуска:  $t_{\text{пуск}} \leq t_{\text{нд}}$

(2)

в большинстве случаев практического значения не имеет, т.к. при принятых ранее моделях пускового тока [4], запуск проходит за время, не превышающее времени механической постоянной двигателя.

Третье ограничение относится к температуре нагрева пускового реостата на ПТР [5,6]:

$$T_{\kappa} \leq T_{\delta} \quad (3)$$

Четвертым ограничением является ограничение по удельному номинальному току материала терморезисторов. Для ПТР «сотовой» конструкции оно записывается в виде:

$$\frac{I_{\text{м}}}{n} \leq I_{\text{ПТР}} \quad (4)$$

Для пусковых реостатов произвольной конструкции аналогичное ограничение имеет вид:

$$\frac{I_{\text{м}}}{F_{\text{П}}} \leq \delta \quad (5)$$

Для терморезисторов «сотовой» конструкции предельная температура:  $T_{\text{к}} = 673^{\circ} \text{K}$ .

Дифференциальное уравнение применительно к терморезисторам «сотовой» конструкции при начальных условиях  $\nu = 0$  и  $\theta = 0$  имеет вид :

$$\dot{\theta} = i_0^2 \frac{r_{\text{po}}}{CN}, \quad (6)$$

где  $N$  – общее число элементов реостата.

С помощью соотношения:  $i = \frac{e+1-\nu}{e(1+r_{\text{po}})}$

(7),

исключив из (6) начальное сопротивление реостата

$$\dot{\theta}_0 = \frac{[1 - e(i_0 - 1)]}{e} \cdot \frac{i_0}{CN} \quad (8)$$

При обеспечении одного и того же начального режима пускового тока имеем :

$$CN = \frac{B}{T_0 e \gamma} \quad (9)$$

Подставляя (9) в (8), получим:  $\dot{\theta}_0 = \frac{\{i_0[1 - e(i_0 - 1)]\gamma T_0^2}{B}$

(10)

Анализ данного выражения приводит к выводу, что начальный наклон при одной и той же токовой модели и одной и той же температуре окружающей среды  $T_0$  одинаков для данного класса двигателей [7] .

Оценим максимальную температуру перегрева  $\theta_M$ , достигаемую в конце пускового процесса.

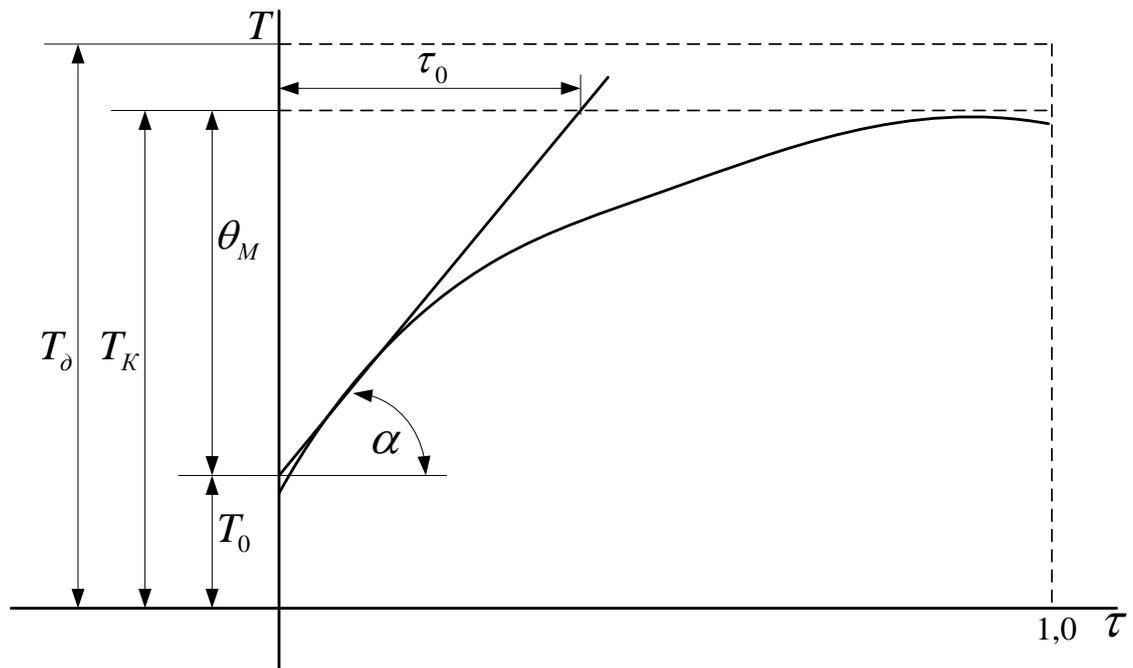


Рис.1 Процесс нагрева терморезисторов для второй модели пускового тока при  $i_0=2$  и  $i_M=4$ .

Согласно ограничению (3), должно выполняться неравенство:

$$T_0 + \theta_M = T_{\text{конечн}} \leq T_d \quad \theta_M \leq T_d - T_0 \quad (11)$$

Поскольку процесс нагрева протекает адиабатически [8], кривая нагрева монотонно возрастает, не стремясь за время пуска к какому-то

установившемуся значению, хотя возрастание температуры терморезисторов со временем резко снижается.

Проведем касательную к кривой нагрева в начальной точке, проводя аналогию с процессом нагрева некоторого активного сопротивления электрическим током, при обмене тепла с окружающей средой. Условно примем в качестве установившейся температуры их температуру  $T_K$  в конце пускового периода, т.е. при  $\tau = 1$ , тогда проведенная касательная отсечет на горизонтальной прямой с ординатой  $T_K$  некоторый отрезок  $\tau_0$ , численно равный «постоянной времени нагрева» терморезистора, при этом:

$$\theta_M = \tau_0 \operatorname{tg} \alpha = \tau_0 \dot{\theta}_0 \quad (12)$$

с учетом (10) имеем:

$$\theta_M = \tau_0 \frac{i_0 [1 - e^{-(t_0 - 1)}] \gamma T_0^2}{B} \quad (13)$$

Полученная формула универсальна в силу того, что величина  $\tau_0$  оказалась приблизительно одинакова для процессов нагрева с разными  $T_0$  [9], на рис. 2 показаны три процесса нагрева пускового реостата двигателя.

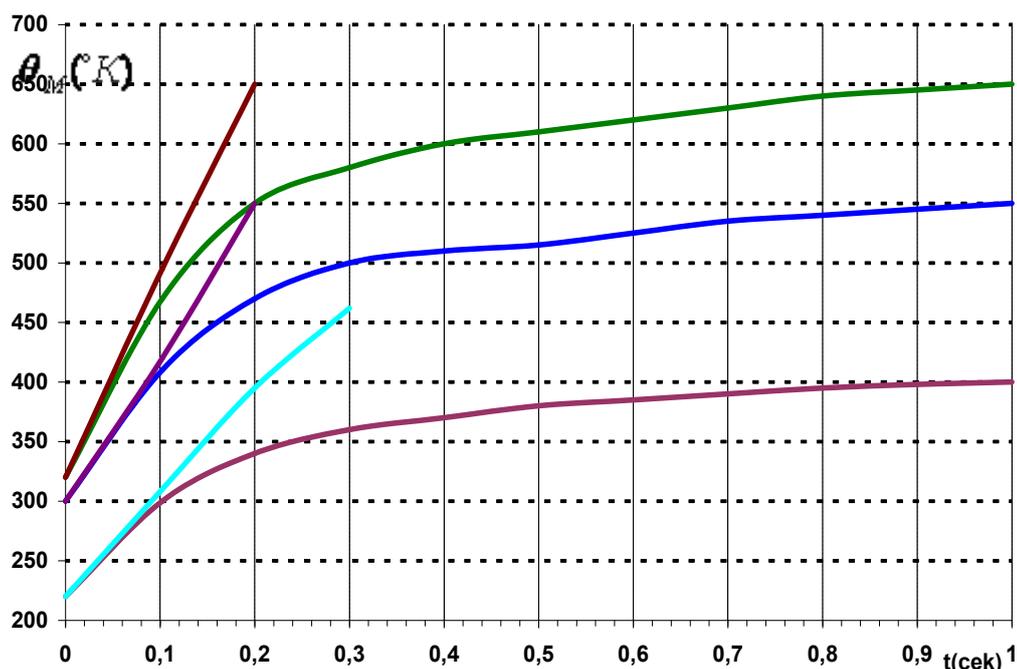


Рис.2. Постоянная времени нагрева терморезистора при второй модели пускового тока

Для второй модели пускового тока при температурах  $T_0 = 233^\circ K$ ,  $T_0 = 293^\circ K$ ,  $T_0 = 323^\circ K$  что отвечает температурам  $t = -40^\circ C$ ,  $t = +20^\circ C$ ,  $t = +50^\circ C$ , реального диапазона изменения [10,11]. Из рис.2 видно, что для рассмотренной второй модели пускового тока:  $\tau_0 = 0,2$ . Для этого случая придадим (13) численный вид, приравняв:  $i_0 = 2$ ,  $e = 0,094$ ,  $\gamma = 7,35$ ,  $B = 1230^\circ K$ ,  $\theta_M = 0,00217T_0^2$ . Для максимально возможной реальной температуры  $T_0 = 323^\circ K$  имеем:  $\theta_M = 226^\circ K < T_\delta - T_0 = 673 - 323 = 350^\circ K$ .

Таким образом, приходим к выводу, что в реальных условиях температура нагрева терморезисторов при пусках двигателей постоянного тока будет находиться в допустимом диапазоне с большим запасом.

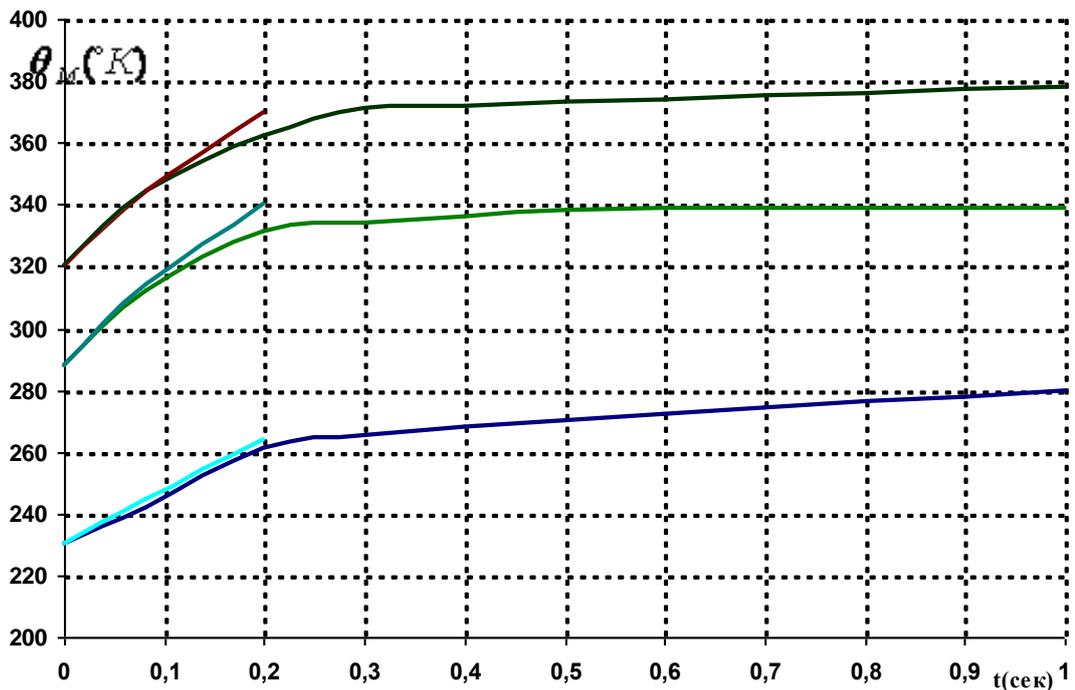


Рис.3.Кривые нагрева терморезистора «сотовой» конструкции при запуске асинхронного двигателя с фазным ротором

Аналогичная картина наблюдается и для двигателей переменного тока. Формулу, аналогичную (13), например, для асинхронного двигателя с фазным ротором получим, подставив в (6) значение величины  $r_{po}$

$$\dot{\theta} = i_0^2 \frac{(\sqrt{Q_1^2 + Q_2^2} - 1) \gamma T_0^2 S_H}{B}, \text{ тогда } \theta_M = \tau_0 \cdot \dot{\theta} = \tau_0 \cdot i_0^2 \frac{(\sqrt{Q_1^2 + Q_2^2} - 1) \gamma T_0^2 S_H}{B}.$$

На рис.3 представлены кривые нагрева терморезисторов «сотовой» конструкции при запуске асинхронного двигателя с фазным ротором при трех значениях температуры окружающей среды:  $T_{01} = 233^\circ K$ ,  $T_{02} = 293^\circ K$ ,  $T_{03} = 323^\circ K$ .

Из рис.3 видно, что величина  $\tau_0$ , для всех кривых приблизительно одинакова и равна 0,3. Поэтому расчетная формула максимальной температуры перегрева терморезисторов для асинхронных двигателей с фазным ротором имеет вид:  $\theta_M = 0,44 \cdot T_0^2$ .

Полученные формулы для расчета температуры перегрева  $\theta_M = f(T_0)$ , предназначаются для тех случаев, когда возникает необходимость в проверке выполнения ограничения (3) на допустимую температуру нагрева терморезисторов.

### Литература

1. Васильев Б.Ю. Электропривод. Энергетика электропривода. М., Солон – пресс, 2015. - 268с.
2. Онищенко Г.Б. Теория электропривода. М. Инфра-М, 2018. - 384с.
3. Пупко В.В., Попивненко В.В. К расчету пускорегулирующих терморезисторных устройств. Известия вузов «Электромеханика», 1979. №9, с.26-32.
4. 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

5. Krause P.C., Wasynczuk O., Sudhoff S.D. Analysis of Electric Machinery and Drive Systems. - Wi-Ley-IEEE Press, USA, 2002. 198p.

6. Геращенко О.А. Температурные измерения: справочник. Киев: Наукова думка, 1984. 494 с.

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

8. Ходунков В.П., Термометрия и инфракрасная радиометрия многофазных и многообъектных систем. - СПб. Политехника. 2013. - 259с.

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

10. 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.

11. Воронова Н.П., Трубицин М.А., Микаэльян Е.Ю. Поликристаллические термозависимые полупроводниковые сопротивления коаксиального типа и пусковые устройства на их основе // Инженерный вестник Дона, 2015, №3. URL:  
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3101

### References

1. Vasil'ev B.YU. Elektroprivod. Energetika elektroprivoda [Electric Drive. Electric drive energy]. M., Solonpress, 2015. 268p.

2. Onishchenko G.B. Teoriya elektroprivoda [Electric drive theory]. M. Infra-M, 2018. 384p.

3. Pupko V.V., Popivnenko V.V. Izvestiya vuzov "Elektromexanika". 1979. №9. pp. 26-32.

---



4. Voronova N.P., Noskov V.N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2017, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4402](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4402).
5. Krause P.C., Wasynczuk O., Sudhoff S.D. Analysis of Electric Machinery and Drive Systems. Wi-Ley-IEEE Press, USA, 2002. 198p.
6. Gerashhenko O.A. Temperaturnye izmereniya [Temperature measuring: reference book]. Spravochnik. Kiev. Naukova dumka, 1984. 494 p.
7. Henry, M.P., Clarke D.W. The self-validating sensor: rationale, definitions and examples. Oxford: Department of Engineering Science, 1993. Pp. 585-610.
8. Hodunkov V.P., Termometriya i infrakrasnaya radiometriya mnogofaznyh i mnogoob"ektryh system. [Thermometry and infrared radiometry of multiphase and multi-object systems]. SPb.: Politekhnik. 2013. 259 p.
9. Xu, X. Maintenance and Reliability Center. 2000. pp.12-14.
10. 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.
11. Voronova N.P., Trubicin M.A., Mikael'yan E.YU. Inzhenernyj vestnik Dona, 2015, №3. URL [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3101](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3101)