

ОПТИМИЗАЦИЯ ТРЕХСТУПЕНЧАТОГО ТОРМОЖЕНИЯ ПРОТИВОВКЛЮЧЕНИЕМ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Плотников С.М., Колмаков В.О.

*Красноярский институт железнодорожного транспорта, Красноярск,
Россия*

Ключевые слова: двигатель постоянного тока, торможение противовключением, времена торможения, скорости переключения, токи переключения, механические характеристики.

Аннотация. Из условия максимума площади, охватываемой тормозными характеристиками, для двигателя постоянного тока получены значения скоростей и токов переключения в цепи якоря при трехступенчатом торможении противовключением, при которых время торможения минимально. Показано, что при данном торможении время останова снижается на 27,5% по сравнению с одноступенчатым торможением.

OPTIMIZATION OF THREE-STAGE COUNTER-CURRENT BRAKING OF DC MOTOR

Plotnikov S.M., Kolmakov V.O.

Krasnoyarsk Institute of Railway Transport, Krasnoyarsk, Russia

Keywords: DC motor, counter current braking, braking time, switching speeds, switching currents, mechanical characteristics.

Abstract. From the condition of the maximum area covered by the braking characteristics for a DC motor, the values of the speeds and switching currents in the armature circuit for three-stage counter-current braking are obtained, at which the braking time is minimal. It is shown that with this braking, the stopping time is reduced by 27.5% compared to single-stage braking.

Для электродвигателей, работающих с частыми пусками-остановами, остановка отключением их от питающей сети, т.е. способом свободного выбега не подходит. Чтобы сократить время, необходимое для полной остановки вращения двигателя применяется электрическое торможение, при котором кинетическая энергия вращающегося ротора преобразовывается в тепло, поглощаемое обмотками двигателя или тормозными реостатами.

Оптимизация динамического торможения двигателя постоянного тока рассмотрена в работе [1]. Данный вид торможения связан с малыми тормозными моментами на низких скоростях, которые увеличивают время торможения. Комбинированное торможение [2, 3] также предусматривает динамическое торможение. Более интенсивное торможение противовключением осуществляется изменением полярности напряжения на обмотке возбуждения или якоре с введением в цепь якоря тормозного резистора. Это приводит к смене полярности магнитного потока или направлению тока, индуцируемого в якоре. Однако точные значения скоростей, на которых должно осуществляться переключение на разные ступени торможения, не определены.

Минимальное время торможения достигается при максимальной площади, ограничиваемой тормозными характеристиками (площади S_1 , S_2 и S_3 , рис. 1).

$$S_1 = \frac{m_1 + m_2}{2}(1 - x), \quad S_2 = \frac{m_1 + m_3}{2}(x - y), \quad S_3 = \frac{m_1 + m_4}{2}y,$$

где x, y – относительные скорости переключения; m_1 – начальный тормозной момент; m_2 и m_3 – тормозные моменты при переключении соответственно на вторую и третью ступени торможения; m_4 – момент при достижении нулевой скорости.

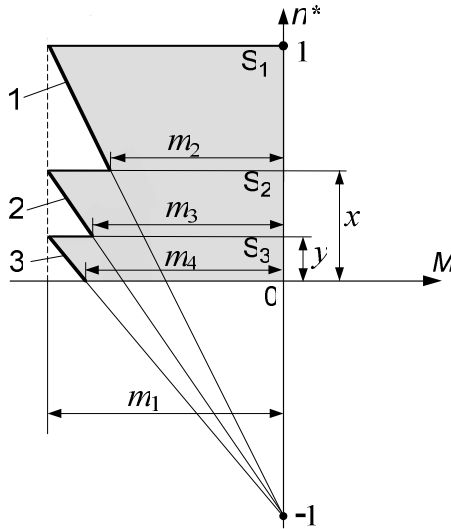


Рис. 1. Механические характеристики трехступенчатого торможения противовключением: $n^* = n/n_n$; n – текущая скорость, n_n – номинальная скорость

В большинстве случаев торможение начинается с номинальной скорости при $n^* = 1$. Выразим моменты m_2 , m_3 и m_4 через момент m_1

$$m_2 = \frac{1 + x}{2} m_1, \quad (1)$$

$$m_3 = \frac{1 + y}{1 + x} m_1, \quad (2)$$

$$m_4 = \frac{1}{1 + y} m_1. \quad (3)$$

Суммарная площадь трапеций

$$S = S_1 + S_2 + S_3 = \frac{m_1}{2} \left(1,5 + 0,5x - x^2 + \frac{x + xy - y - y^2}{1 + x} + \frac{y}{1 + y} \right). \quad (4)$$

Производные данной площади по x и y

$$\frac{dS}{dx} = \frac{m_1}{2} \left(0,5 - 2x + \frac{1 + 2y + y^2}{(1 + x)^2} \right),$$

$$\frac{dS}{dy} = \frac{m_1}{2} \left(\frac{-1+x-2y}{1+x} + \frac{1}{(1+y)^2} \right).$$

Для определения относительных значений x и y , при которых суммарная площадь максимальна, приравняем производные нулю. Получим уравнения

$$\begin{aligned} 1,5 - x - 3,5x^2 - 2x^3 + 2y + y^2 &= 0, \\ x(2 + 2y + y^2) - y(4 + 5y + 2y^2) &= 0. \end{aligned}$$

Решение уравнений дает: $x = 0,63$, $y = 0,30$.

Например, для получения минимального времени торможения двигателя с номинальной скоростью 1000 об/мин переключение на вторую ступень торможения должно осуществляться при снижении скорости до 630 об/мин, а на третью ступень – до 300 об/мин.

Для автоматизированных систем, работающих по принципу тока, значения токов при переключении на вторую и третью ступени торможения можно найти из выражений (1) и (2) соответственно

$$\begin{aligned} I_2 &= \frac{1+x}{2} I_1 = \frac{1+0,63}{2} = 0,815 I_1, \\ I_3 &= \frac{1+y}{1+x} I_1 = \frac{1+0,3}{1+0,63} = 0,798 I_1, \end{aligned}$$

где I_1 – максимально допустимый тормозной ток, в 2...2,5 раза превышающий номинальный ток двигателя.

Время торможения двигателя определяется площадью, охватываемой тормозными характеристиками. При торможении в одну ступень площадь треугольника, ограниченного характеристикой 1, вертикалями $n^* = 1$, $n^* = 0$ и осью скорости, равна $0,75 \cdot m_1$. Площадь, охватываемая характеристиками 1, 2 и 3 при торможении в три ступени, определим из выражения (4), подставив соответствующие значения x и y

$$S = \frac{m_1}{2} \left(1,5 + 0,5 \cdot 0,63 - 0,63^2 + \frac{0,63 + 0,63 \cdot 0,30 - 0,30 - 0,30^2}{1 + 0,63} + \frac{0,30}{1 + 0,30} \right) = 0,956 m_1.$$

Таким образом, динамическое торможение в три ступени осуществляется на 27,5% быстрее, чем торможение в одну ступень, что может существенно повысить производительность электроприводов с частыми пусками-остановами и большими инерционными массами.

Полученные значения скоростей и токов могут быть использованы для настройки релейно-контактной аппаратуры, работающей по принципу скорости и тока.

Список литературы

1. Плотников. С.М., Колмаков О.В. Оптимизация динамического торможения двигателя постоянного тока независимого возбуждения // Известия вузов. Электромеханика. – 2018. – № 5. – С. 13-17. – doi.org/10.17213/0136-3360-2018-5-13-17.

2. Плотников С.М. Оптимизация комбинированного торможения двигателя постоянного тока независимого возбуждения // Известия вузов. Электромеханика. – 2020. – Т. 63, №4. – С.38-42. – doi.org/10.17213/0136- 3360-2020-4-38-42.
3. Патент №2716149 РФ. Способ торможения двигателя постоянного тока / С.М. Плотников. – Заявка №2019114807 от 14.05.2019; опубли. 06.03.2020, Бюл. № 7.

References

1. Plotnikov. S.M., Kolmakov O.V. Optimization of dynamic braking of DC motor of independent excitation // News of universities. Russian Electromechanics. 2018, no. 5, pp. 13-17. doi.org/10.17213/0136-3360-2018-5-13-17.
2. Plotnikov S.M. Optimization of combined braking of DC motor of independent excitation // News of universities. Russian Electromechanics. 2020, no. 4, pp. 38-42. doi.org/10.17213/0136- 3360-2020-4-38-42.
3. Patent No. 2716149 RU. Method of braking a DC motor / S.M. Plotnikov. – Appl. No. 2019114807 from 14.05.2019; publ. 06.03.2020, Bul. No. 7.

Плотников Сергей Михайлович – доктор технических наук, доцент, профессор	Plotnikov Sergey Mikhailovich – doctor of technical sciences, associate professor, professor
Колмаков Виталий Олегович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой	Kolmakov Vitaly Olegovich – candidate of technical sciences, associate professor, head of department
smplotnikov@rambler.ru	

Received 20.02.2025