

АНАЛИЗ ВРЕМЕНИ ТОРМОЖЕНИЯ ПРОТИВОВКЛЮЧЕНИЕМ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Плотников С.М.

*Красноярский институт железнодорожного транспорта, Красноярск,
Россия*

Ключевые слова: двигатель постоянного тока, якорь, обмотка возбуждения, противовключение, момент инерции, механическая характеристика, время торможения.

Аннотация. На основании оценки площадей, охватываемых тормозными механическими характеристиками, получены выражения времен торможения противовключением двигателя постоянного тока независимого возбуждения для числа тормозных ступеней от 1 до 4. Данная методика определения времени торможения не требует задания момента инерции привода, его электромеханической постоянной времени и момента окончания переходного процесса торможения.

ANALYSIS OF DC MOTOR COUNTERCURRENT BRAKING TIME

Plotnikov S.M.

Krasnoyarsk Institute of Railway Transport, Krasnoyarsk, Russia

Keywords: DC motor, anchor, excitation winding, counter-current, moment of inertia, mechanical characteristic, braking time.

Abstract. Based on the assessment of the areas covered by the braking mechanical characteristics, expressions for the braking times by counter-connection of a DC motor with independent excitation were obtained for the number of braking stages from 1 to 4. This method for determining the braking time does not require specifying the moment of inertia of the drive, its electromechanical time constant and the moment of completion of the transient braking process.

Торможение противовключением двигателя постоянного тока независимого возбуждения – это наиболее эффективный вид торможения, часто применяемый в качестве экстренного торможения. Его осуществляют в одну или несколько ступеней сменой полярности напряжения, подаваемого на якорь или обмотку возбуждения. Снижение времени торможения повышает производительность механизма, что актуально для электроприводов с большими массами и частыми пусками и торможениями. Торможение противовключением может использоваться также в комбинированном торможении в сочетании с динамическим торможением [1].

Преимуществом данного вида торможения по сравнению с динамическим [2] или рекуперативным торможением является малое время торможения. Основной недостаток торможения противовключением, осуществляемого по цепи якоря, – большая потребляемая из сети мощность. Переход с одной ступени торможения на следующую может осуществляться автоматически по принципу скорости, тока или времени.

Произведение тормозного момента на скорость двигателя дает мощность, затрачиваемую на торможение, поэтому время торможения

пропорционально площади, охватываемой тормозными механическими характеристиками и осью скоростей. Как правило, данное время определяют по формуле, включающей момент инерции привода, сопротивление реостата в цепи якоря, конструктивную постоянную двигателя при заданном максимальном тормозном моменте. Однако сравнение времен торможения для разного числа тормозных ступеней удобнее осуществить через оценку площадей, охватываемых тормозными характеристиками. При этом можно не задаваться конечным значением переходного процесса торможения.

На рисунке 1, а представлена тормозная характеристика одноступенчатого торможения, на которой угловая скорость двигателя выражена в относительных единицах, в момент начала торможения она равна номинальной скорости $n^* = 1$. Максимально допустимый тормозной момент, который, как правило, в 2-2,5 раза превышает номинальный момент, обозначим как m . Площадь, охватываемая тормозной характеристикой в положительной области скоростей двигателя (площадь трапеции), равна $S_1 = 0,75m$.

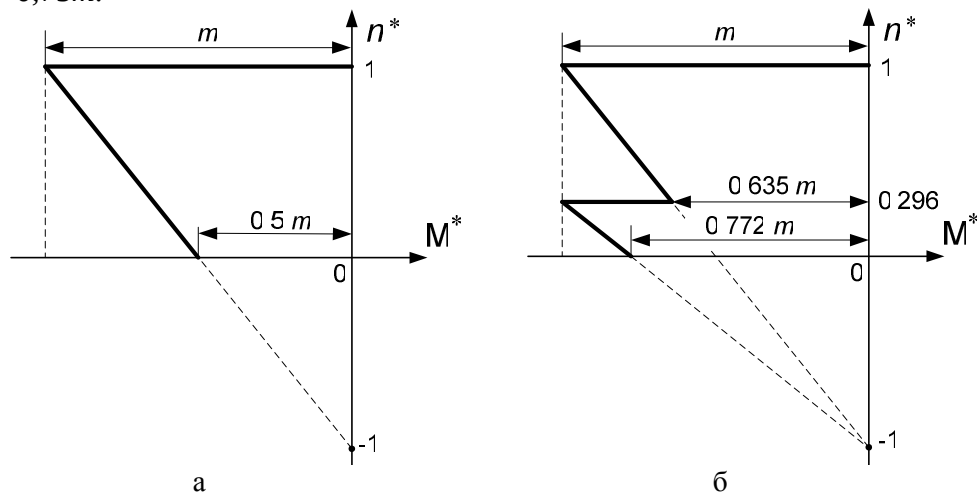


Рис. 1. Тормозные характеристики одноступенчатого (а) и двухступенчатого (б) оптимального торможения

Максимальная площадь, охватываемая характеристиками при двухступенчатом торможении (рис. 1б), получается при переключении на вторую ступень при относительной скорости $n^* = 0,269$ [3]. Данное значение получено следующим образом: в результате приравнивания нулю производной суммарной площади двух трапеций было получено кубическое уравнение, один из корней которого являлся искомым решением.

Суммарная площадь двух трапеций (произведение полусуммы оснований на высоту)

$$S_2 = \frac{m + 0,635m}{2} \cdot 0,704 + \frac{m + 0,772m}{2} \cdot 0,296 = 0,838m.$$

Для трехступенчатого торможения (рис. 2, а) минимальное время останова получается при переходе на вторую ступень при относительной

скорости 0,633, а на третью ступень – при относительной скорости 0,300 [4]. Данные значения получены в результате дифференцирования суммарной площади трех трапеций по первой и второй скоростям переключения. Совместное решение двух получившихся уравнений дало искомые значения.

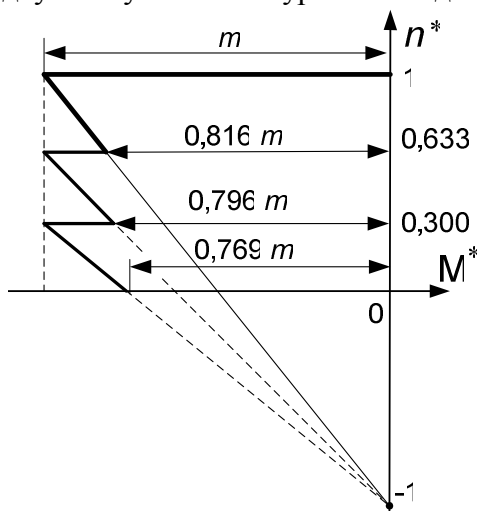


Рис. 2. Тормозные характеристики трехступенчатого оптимального торможения

Суммарная площадь трех трапеций в положительной области скоростей двигателя

$$S_3 = \frac{m + 0,816m}{2} \cdot 0,367 + \frac{m + 0,796m}{2} \cdot 0,333 + \frac{m + 0,769}{2} \cdot 0,300 = 0,897m.$$

Таким образом, основываясь на оценке площадей, охватываемых тормозными механическими характеристиками, получены значения времен торможения противовключением для количества ступеней от 1 до 3 для оптимального торможения на каждой ступени. По сравнению с одноступенчатым торможением двухступенчатое торможение позволяет сократить время останова на 11,7%, а трехступенчатое – на 19,6%. Например, если торможение в одну ступень длилось 5 с, то торможение в две ступени закончится за 4,42 с, в три ступени – за 4,18 с. Дальнейшее увеличение числа тормозных ступеней нецелесообразно, т.к. сокращение времени торможения будет незначительным при возрастании сложности контактной аппаратуры.

Список литературы

1. 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.
2. Плотников С.М., Колмаков В.О. 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.

3. Патент №2817196 РФ. Способ торможения двигателя постоянного тока / С.М. Плотников. – Заявка №2023115378 от 09.06.2023; опублик. 11.04.2024, Бюл. №11.
4. Патент №2836429 РФ. Способ торможения двигателя постоянного тока / С.М. Плотников. – Заявка №2024114451 от 27.05.2024; опублик. 14.03.2025, Бюл. №8.

References

1. Plotnikov S.M. Optimization of Combined Braking of DC Motor of Independent Excitation // News of universities. Electromechanics. 2020, vol. 63, no. 4, pp. 38-42. doi.org/10.17213/0136-3360-2020-4-38-42.
2. Plotnikov S.M. Optimization of dynamic braking of a separately excited DC motor // News of universities. Electromechanics. 2018, vol. 61, no. 5, pp. 13-17. doi.org/10.17213/0136-3360-2018-5-13-17.
3. Patent No. 2817196 RU. Method of braking a DC motor / S.M. Plotnikov. – Appl. No 2023115378 from 09.06.2023; publ. 11.04.2024, Bul. No. 11.
4. Patent No. 2836429 RU. Method of braking a DC motor / S.M. Plotnikov. – Appl. No 2024114451 from 27.05.2024; publ. 14.03.2025, Bul. No. 8.

Плотников Сергей Михайлович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Системы обеспечения движения»	Plotnikov Sergey Mikhailovich – doctor of technical sciences, associate professor, professor of the Department of "Traffic support systems"
smplotnikov@rambler.ru	

Received 27.10.2025