

УДК 62-82:620.1.051

## ВЫБОР СПОСОБА ТОРМОЖЕНИЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАГРУЗОЧНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

**В.А. САВЕЛЬЕВ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П.О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

В работе [1] предложено для лабораторных испытаний и наладки различного рода приводов вращательного движения использовать управляемый нагрузочный электропривод – устройство, позволяющее физически моделировать на валу исследуемого двигателя необходимый момент сопротивления.

Для расширения диапазона создаваемых нагрузочных воздействий управляемый нагрузочный электропривод должен иметь возможность формировать характеристики во всех четырех квадрантах координатной плоскости «момент-скорость» (рис. 1) [2]. При этом, область II-го и IV-го квадрантов определяет возможности нагрузочного электропривода с точки зрения статических характеристик. Область I-го и III-го квадрантов необходима для моделирования динамических процессов.

Таким образом, для нормального функционирования нагрузочный электропривод должен иметь возможность работы во всех четырех квадрантах. Необходимая область ограничена параметрами исследуемого привода в статике ( $+\omega_{MAX}$ ,  $-\omega_{MAX}$ ,  $+M_{MAX}$ ,  $-M_{MAX}$ ). Это и определяет выбор исполнительного двигателя нагрузочного электропривода, а именно, должны выполняться условия

$$|\omega_{MAX}| \leq |\omega_{н.ид}|, \quad |M_{MAX}| \leq |M_{н.ид}|,$$

где  $+\omega_{н.ид}$ ,  $M_{н.ид}$  – номинальные скорость и момент исполнительного двигателя.

$$M_{MAX} + M_{дин.мах} \leq \lambda \cdot M_{н.ид}.$$

Кроме этого, для учета возможных динамических перегрузок необходимо также обеспечить выполнение условия,

где  $M_{дин.мах}$  – максимальное значение динамического момента сопротивления;

$\lambda$  – допустимая кратковременная перегрузка по току якоря исполнительного двигателя.

Использование различных способов торможения при реализации нагрузочного электропривода накладывает свои ограничения на диапазон возможных значений момента сопротивления.

При дальнейшем анализе влияния способов торможения, в качестве исполнительного рассматривается двигатель постоянного тока средней мощности 2ПН180МУХЛ4.

Его основные характеристики:

- номинальная мощность  $P_H = 15$  кВт;
- номинальное напряжение  $U_H = 220$  В;
- номинальная частота вращения  $n_H = 1500$  об/мин;

- сопротивление  $R_{Я} = 0,084$  Ом;
- сопротивление добавочных полюсов  $R_{Д.П.} = 0,056$  Ом;
- индуктивность якоря  $L_{Я} = 2,7$  мГн;
- КПД  $\eta = 0,855$ .

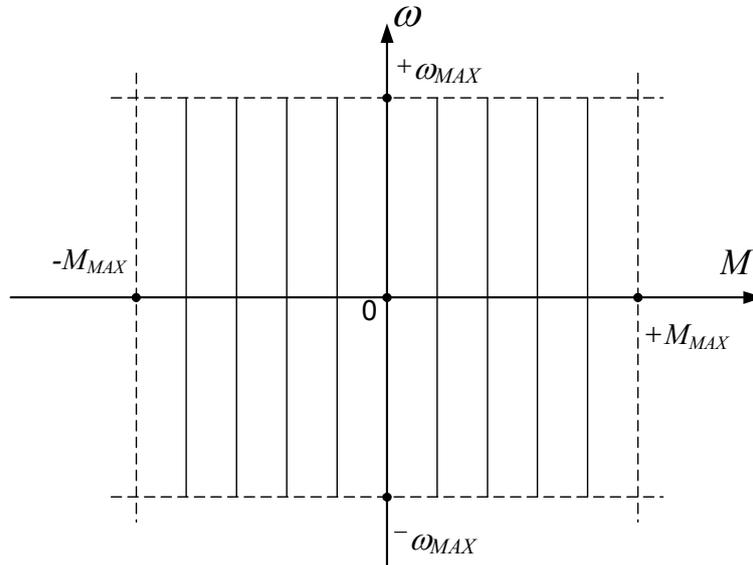


Рис. 1. Область желаемых статических механических характеристик нагрузочного электропривода

Определим номинальный момент исполнительного двигателя.

Номинальный ток якоря

$$I_{Я.н} = \frac{P_H}{U_H \cdot \eta_H} = \frac{15000}{220 \cdot 0,855} = 79,75 \text{ А.}$$

Сопротивление якорной цепи при рабочей температуре (для кл. изоляции В)

$$R_{Я.t} = (R_{Я} + R_{Д.П.})(1 + \alpha(t - t_0)) = (0,084 + 0,056)(1 + 0,004(130 - 15)) = 0,2044 \text{ Ом,}$$

где  $\alpha = 0,004 \text{ град}^{-1}$  – температурный коэффициент сопротивления;

$t$  – рабочая температура для кл. изоляции В;

$t_0$  – начальная температура.

Произведение конструктивной постоянной на поток

$$c\Phi_H = \frac{U_H - I_{Я.н} \cdot R_{Я.t}}{\omega_H} = \frac{220 - 79,75 \cdot 0,2044}{0,1047 \cdot 1500} = 1,297.$$

Номинальный момент исполнительного двигателя

$$M_{н.ИД} = c\Phi_H \cdot I_H = 1,297 \cdot 79,75 = 103,44 \text{ Нм.}$$

Результаты анализа представлены в о.е., за нормирующие величины приняты номинальные скорость ( $\omega_H$ ) и момент ( $M_H$ ) исполнительного двигателя нагрузочного электропривода. На рисунках наклонными линиями показаны характеристики разомкнутого привода, а вертикальными – замкнутого (требуемые).

1-й способ. Рекуперативное торможение. По определению рекуперативным является такой способ торможения, когда ЭДС преобразователя имеет один знак с

ЭДС якоря, но меньше последней по величине. С целью упрощения достаточно показать характеристики лишь в первом и втором квадрантах. Как видно из рисунка 2, область возможных значений тормозного момента ограничена снизу механической характеристикой при ЭДС преобразователя равной нулю ( $Ed = 0$ ). При этом диапазон скоростей при максимальном моменте нагрузки сокращается.

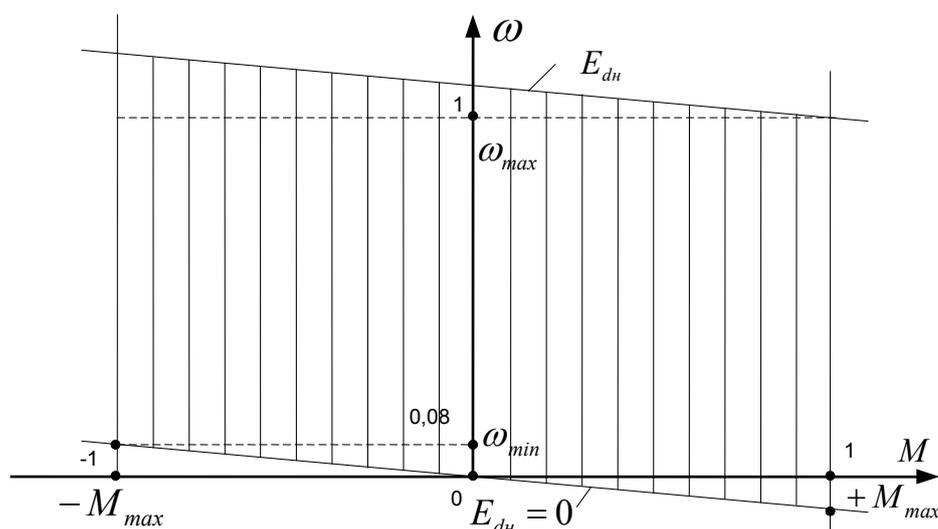


Рис. 2. Механические характеристики нагрузочного электропривода при рекуперативном торможении

Минимально возможная скорость  $\omega_{MIN}$  при максимальном необходимом моменте сопротивления  $M_{MAX}$  составит

$$\omega_{MIN} = \frac{Ed}{c\Phi_H} + M_{MAX} \cdot \frac{(R_{Я.т} + R_{\Pi})}{(c\Phi_H)^2},$$

где  $R_{\Pi}$  – эквивалентное сопротивление преобразователя. С учетом того, что  $Ed = 0$  и  $R_{\Pi} \ll R_{Я.т}$ , запишем в о.е.:

$$\omega_{MIN}^* = \frac{M_{Н.ИД}}{\omega_{Н.ИД}} \cdot M_{MAX}^* \cdot \frac{(R_{Я.т} + R_{\Pi})}{(c\Phi_H)^2} = \frac{103,44}{157,05} \cdot 1 \cdot \frac{0,2044}{1,297^2} = 0,08.$$

Среди положительных сторон данного способа необходимо отметить экономию энергии, но в то же время преобразователь должен иметь возможность рекуперации.

2-й способ. Торможение противовключением. В данном случае ЭДС преобразователя  $Ed$ , во всем диапазоне скоростей  $\omega$ , противоположно по знаку ЭДС якоря (рис. 3).

$$R_{ДОБ} = \frac{Ed - c\Phi_H \cdot \omega_{MAX}^* \cdot \omega_{Н.ИД}}{M_{MAX}^* \cdot M_{Н.ИД} / (c\Phi_H)} - R_{Я.т} = \frac{0 - 1,297 \cdot 1 \cdot 157,05}{-1 \cdot 104 / 1,297} - 0,2044 = 2,54 \text{ Ом.}$$

Для получения достаточно мягких механических характеристик разомкнутого привода необходимо ввести добавочное сопротивление  $R_{ДОБ}$ . Рассчитаем величину последнего, необходимую для работы при максимальной скорости и с максимальным нагрузочным моментом.

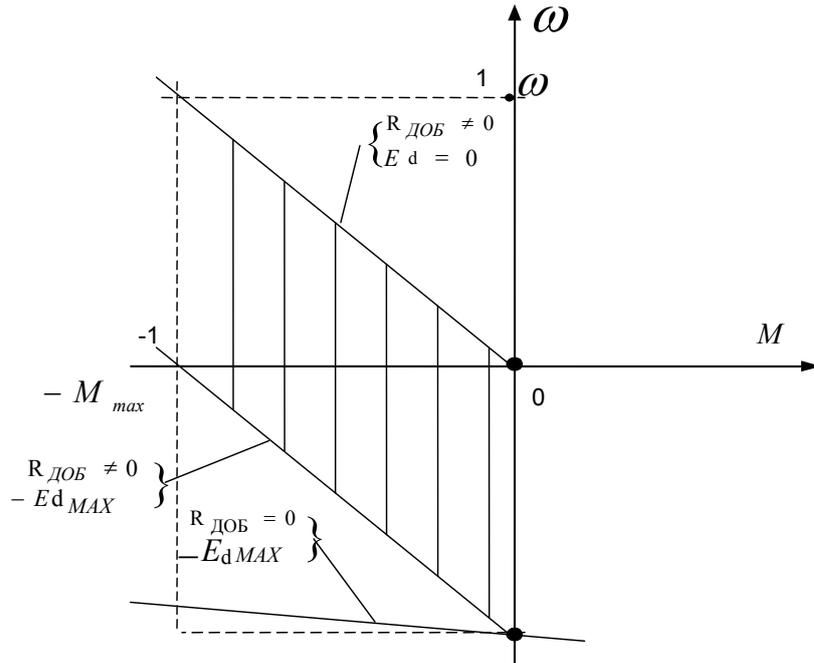


Рис. 3. Механические характеристики нагрузочного электропривода при торможении противовключением

Очевидно, что эта величина на порядок превышает естественное сопротивление якорной цепи  $R_{ЯТ} = 0,2044$  Ом. При этом на нем теряется мощность

$$P_{ДОБ} = R_{ДОБ} \cdot I_{МАХ}^2 = 2,54 \cdot 79,75^2 = 16,2 \text{ кВт},$$

примерно равная мощности самого исполнительного двигателя.

Как видно из рисунка 3, при таком способе торможения значительно ограничен диапазон скоростей при низких нагрузках. Работать же на больших скоростях можно лишь при максимальных нагрузках, при которых, как было отмечено выше, значительно возрастает мощность, рассеиваемая на добавочном сопротивлении.

Кроме того, нет возможности работать в 1-ом квадранте.

3-й способ. Динамическое торможение. Для реализации нагрузочного электропривода с использованием данного способа торможения необходимо замкнуть цепь якоря на тормозное сопротивление  $R_{торм.}$  с широтно-импульсным регулированием последнего в замкнутой системе с обратными связями по скорости и току.

При этом значение тормозного сопротивления изменяется от нуля до максимального значения. Последнее определяется как

$$R_{ТОРМ.МАХ} = \frac{-c\Phi_H \cdot \omega_{МАХ}^* \cdot \omega_{Н.ИД}}{M_{МАХ}^* \cdot M_{Н.ИД}} - R_{Я.т.}$$

Как видно из рисунка 4, данный способ сочетает в себе недостатки двух предыдущих, т.е.:

- ограничена минимальная скорость, при максимальном тормозном моменте, до 8 %;
- при уменьшении момента сопротивления значительно сокращается диапазон скоростей;
- отсутствует возможность перехода в 1-й и 3-й квадранты;

- значительные потери в тормозном сопротивлении (соизмеримы с мощностью исполнительного двигателя).

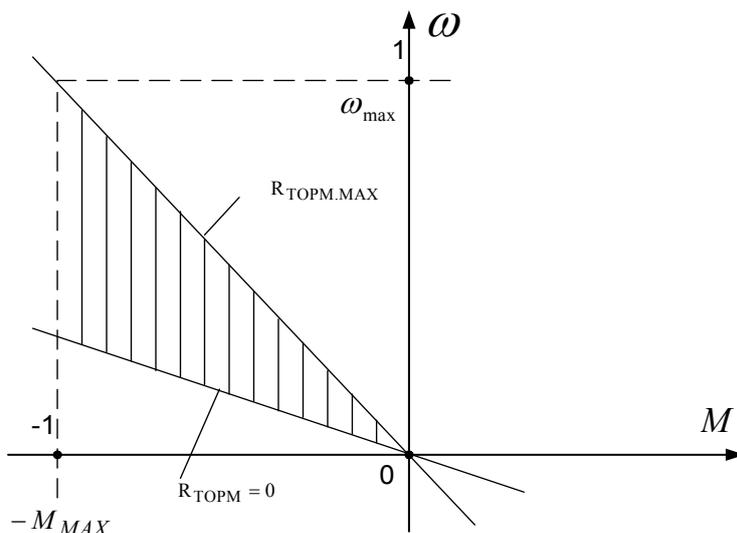


Рис. 4. Механические характеристики нагрузочного электропривода при динамическом торможении

**4-й способ.** Смешанное торможение. Если использовать реверсивный преобразователь, то путем совмещения рекуперативного торможения и торможения противовключением можно полностью перекрыть необходимую область характеристик. При этом отпадает необходимость во введении добавочного сопротивления, что позволяет испытывать приводы большой мощности (рис. 5).

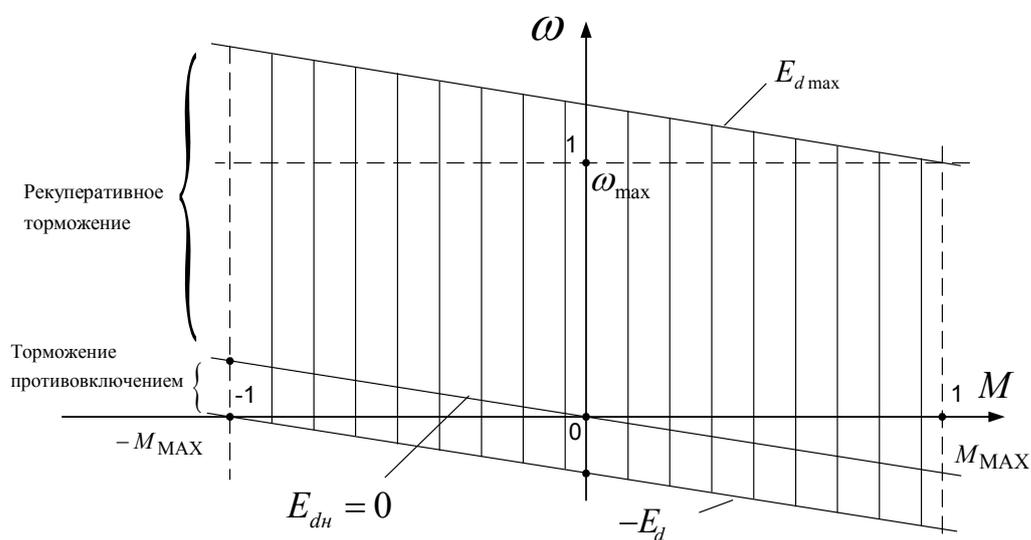


Рис. 5. Механические характеристики нагрузочного электропривода при смешанном торможении

Таким образом, при формировании статических характеристик нагрузочного электропривода наиболее эффективным является использование смешанного способа торможения в системе управляемый преобразователь – двигатель постоянного тока.

**Литература**

1. Савельев В.А. Универсальный испытательный стенд //Материалы междунар. НТК «Современные проблемы машиноведения». – Гомель: ГПИ им. П.О. Сухого, 1998. – С. 111-113.
2. Кочубиевский И.Д., Стражмейстер В.А. Динамическое моделирование нагрузок при испытаниях автоматических систем. – М.- Л.: Энергия, 1965. – 144 с.

*Получено 11.10.2002 г.*