

## СНИЖЕНИЕ ПОТЕРЬ В ПОЗИЦИОННОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ С БЕСКОНТАКТНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Канд. техн. наук, доц. ГУЛЬКОВ Г. И.,  
кандидаты техн. наук ГУЛЬКОВ А. Г., ШАИБИ Р.

Белорусский национальный технический университет,  
Университет имени Мулюд Моммери (Алжир)

В позиционном электроприводе в зависимости от величины перемещения  $\varphi$  кривая изменения скорости  $\omega = f(t)$  имеет треугольную или трапецеидальную форму. При работе в режиме больших перемещений оптимальной по быстродействию является трапецеидальная диаграмма скорости с равными ускорениями на участках разгона и торможения. При отработке угловых перемещений, равных или меньших, чем граничное  $\varphi_{гр} \leq \omega_{max}^2 / \epsilon$  ( $\omega_{max}$  – максимальная скорость двигателя;  $\epsilon$  – угловое ускорение двигателя), могут быть использованы треугольная или трапецеидальная диаграмма скорости (рис. 1).

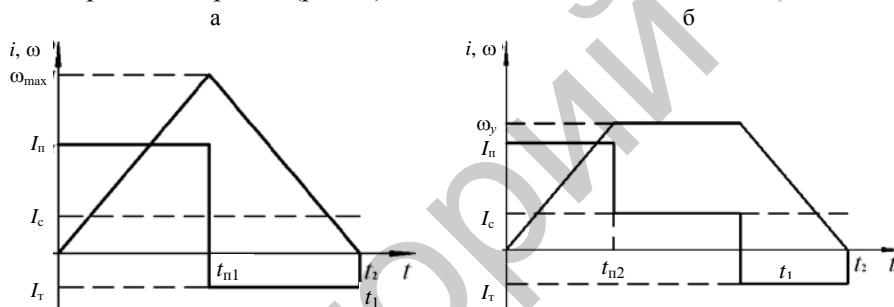


Рис. 1. Графики скорости и тока при: а – треугольном; б – трапецеидальном законах движения

Очевидно, что треугольная диаграмма скорости обеспечит более высокое быстродействие электропривода, чем трапецеидальная. Однако отработка треугольной диаграммы сопровождается большими потерями мощности в двигателе по сравнению с трапецеидальной.

Оценим целесообразность замены треугольной диаграммы скорости трапецеидальной при  $\varphi \leq \varphi_{гр}$  и использовании в приводе бесконтактного двигателя постоянного тока (БДПТ).

На нагрев БДПТ основное влияние оказывают электрические потери в обмотке статора и потери в стали статора. Потери в стали ротора – добавочные и механические – не учитываются, так как их влияние на нагрев двигателя незначительно [1].

Кривая изменения тока двигателя при треугольном законе движения представлена на рис. 1а. Электрические потери энергии  $\Delta W_{эл}$  для треугольного закона движения равны

$$\Delta W_{эл} = \int_0^{t_{n1}} 2RI_n^2 dt + \int_0^{t_1} 2RI_r^2 dt = 2R(I_n^2 t_{n1} + I_r^2 (t_1 - t_{n1})), \quad (1)$$

где  $I_{\text{п}}$  – ток двигателя при пуске;  $I_{\text{т}}$  – ток двигателя при торможении;  $t_{\text{п1}}$  – время разгона двигателя при треугольном законе движения;  $t_1$  – то же движения двигателя;  $R$  – активное сопротивление фазы двигателя.

Для реактивного характера нагрузки токи двигателя при пуске и торможении определим следующим образом:

$$I_{\text{п}} = I_{\text{с}} + I_{\text{д}}; \quad (2)$$

$$I_{\text{т}} = I_{\text{с}} - I_{\text{д}}, \quad (3)$$

где  $I_{\text{д}}$  – динамическая составляющая тока двигателя;  $I_{\text{с}}$  – статический ток двигателя.

Подставим выражения (2) и (3) в (1) и с учетом того, что  $t_1 = 2t_{\text{п1}}$ , получим

$$\Delta W_{\text{эл}} = 2R(I_{\text{д}}^2 + I_{\text{с}}^2)t_1. \quad (4)$$

Кривая изменения тока двигателя при трапецеидальном законе движения представлена на рис. 1б. Электрические потери энергии для трапецеидального закона движения  $\Delta W_{\text{э2}}$  определим с учетом равенства времен пуска и торможения и уравнений (2), (3)

$$\Delta W_{\text{э2}} = \int_0^{t_{\text{п2}}} 2RI_{\text{п}}^2 dt + \int_0^{t_1 - t_{\text{п2}}} 2RI_{\text{с}}^2 dt + \int_0^{t_{\text{п2}}} 2RI_{\text{т}}^2 dt = 2R(2I_{\text{д}}^2 t_{\text{п2}} + I_{\text{с}}^2 t_2), \quad (5)$$

где  $t_{\text{п2}}$  – время разгона двигателя при трапецеидальном законе движения;  $t_2$  – то же движения двигателя.

Разделив (5) на (4), получим

$$\frac{\Delta W_{\text{э2}}}{\Delta W_{\text{эл}}} = \frac{1}{I_{\text{д}}^2 + I_{\text{с}}^2} \left( I_{\text{д}}^2 \frac{t_{\text{п2}}}{t_1} + I_{\text{с}}^2 \frac{t_2}{t_1} \right). \quad (6)$$

Для равноускоренного вращательного движения характерны следующие соотношения:

$$t_{\text{п1}} = \sqrt{\varphi/\varepsilon}; \quad t_{\text{п2}} = \omega_y/\varepsilon. \quad (7)$$

Время движения привода при треугольном законе составляет

$$t_1 = 2\omega_{\text{max}}/\varepsilon, \quad (8)$$

где  $\omega_{\text{max}} = \sqrt{\varepsilon\varphi}$  – максимальное значение скорости при треугольном законе.

Время движения привода при трапецеидальном законе определяется по формуле

$$t_2 = \frac{\omega_y}{\varepsilon} + \frac{\varphi}{\omega_y}. \quad (9)$$

Учитывая соотношения (7)–(9), получим:

$$\frac{t_{\text{п2}}}{t_{\text{п1}}} = \frac{\omega_y}{\omega_{\text{max}}}; \quad \frac{t_2}{t_1} = \frac{1}{2} \left( \frac{\omega_y}{\omega_{\text{max}}} + \frac{\omega_{\text{max}}}{\omega_y} \right). \quad (10)$$

Подставив (10) в (6), после преобразований получим

$$\frac{\Delta W_{\text{э2}}}{\Delta W_{\text{эл}}} = \frac{1}{(I_c/I_d)^2 + 1} \frac{\omega_y}{\omega_{\text{max}}} \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{I_c}{I_d} \right)^2 \left( 1 + \frac{\omega_{\text{max}}^2}{\omega_y^2} \right) \right]. \quad (11)$$

Из последнего выражения следует, что уменьшение электрических потерь энергии при замене треугольного закона движения трапецеидальным зависит от соотношений  $\omega_y/\omega_{\text{max}}$  и  $I_c/I_d$ . Рассматривая  $I_c/I_d$  как параметр, определим минимум функции  $(\Delta W_{\text{э2}}/\Delta W_{\text{эл}}) = f(\omega_y/\omega_{\text{max}})$ . Для этого продифференцируем следующее выражение и приравняем производную к нулю

$$\left( \omega_y/\omega_{\text{max}} \right)_{\text{min}} = \frac{I_c/I_d}{\sqrt{(I_c/I_d)^2 + 2}}. \quad (12)$$

Подставив (12) в (11) и (10), получим:

$$\left( \Delta W_{\text{э2}}/\Delta W_{\text{эл}} \right)_{\text{min}} = \frac{(I_c/I_d) \sqrt{(I_c/I_d)^2 + 2}}{(I_c/I_d)^2 + 1}; \quad (13)$$

$$\left( t_2/t_1 \right)_{\text{min}} = \frac{(I_c/I_d)^2 + 1}{(I_c/I_d) \sqrt{(I_c/I_d)^2 + 2}}. \quad (14)$$

Из (13) и (14) следует

$$\left( \Delta W_{\text{э2}}/\Delta W_{\text{эл}} \right)_{\text{min}} = \frac{1}{(t_2/t_1)_{\text{min}}}.$$

Выражения (13) и (14) позволяют определить минимум функции  $(\Delta W_{\text{э2}}/\Delta W_{\text{эл}})_{\text{min}} = f(t_2/t_1)$ , а выражение (12) – соответствующее этому минимуму соотношение  $(\omega_y/\omega_{\text{max}})_{\text{min}}$  для различных соотношений токов  $I_c/I_d$ . По выражению (11) с учетом (10) построены графики зависимости  $\Delta W_{\text{э2}}/\Delta W_{\text{эл}} = f(t_2/t_1)$  при  $I_c/I_d = (0; 0,5; 1; 1,5; 2)$  (рис. 2), на которых видно, что при замене треугольного графика движения трапецеидальным снижение электрических потерь энергии при одном и том же увеличении времени тем существеннее, чем меньше отношение  $I_c/I_d$ . Например, при отношении скоростей  $\omega_y/\omega_{\text{max}} = 0,7$  потери в приводе снижаются на 30 % при  $I_c/I_d = 0$  и на 12 % – при  $I_c/I_d = 1$ , а увеличение времени составляет всего 6 %. Если же  $I_c > I_d$ , то замена треугольной диаграммы трапецеидальной приводит к незначительному снижению электрических потерь. Так, для того же соотношения скоростей  $\omega_y/\omega_{\text{max}} = 0,7$  снижение потерь составляет 5 % при  $I_c/I_d = 1,5$  и всего 1 % – при  $I_c/I_d = 2$ .

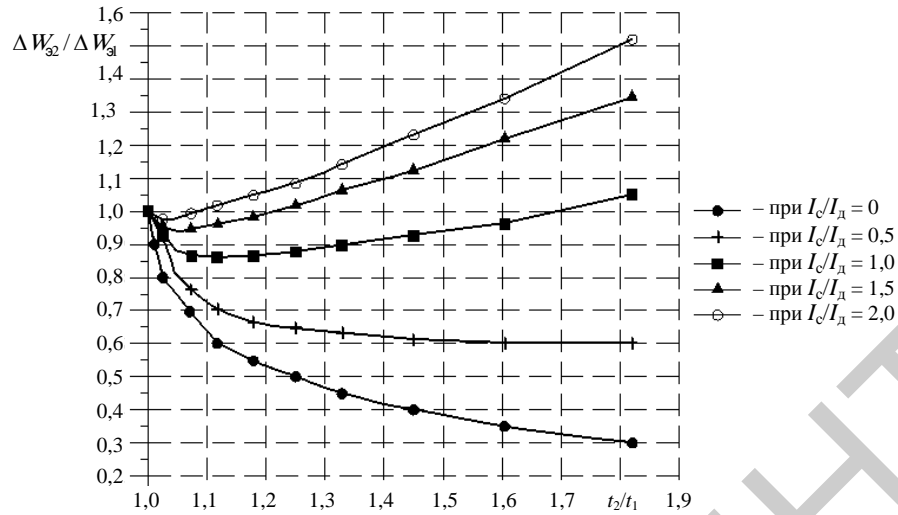


Рис. 2. Графики зависимостей  $\Delta W_{32} / \Delta W_{31} = f(t_2 / t_1)$  при различных значениях  $I_3 / I_4$

Рассмотрим потери энергии в стали статора для обоих законов движения двигателя, учитывая, что потери мощности в стали [2] равны

$$\Delta P_{\text{ст}} = \Delta P_{\text{ст}}^* \omega^{1,5},$$

где  $\Delta P_{\text{ст}}^*$  – потери мощности в стали при  $\omega = 1 \text{ рад/с}$ .

Потери энергии в стали статора при треугольном законе движения составляют

$$\Delta W_{\text{ст1}} = \int_0^{t_1} \Delta P_{\text{ст1}} dt = \Delta P_{\text{ст}}^* \int_0^{t_1} (\omega(t))^{1,5} dt = 2\Delta P_{\text{ст}}^* \int_0^{t_1} (\varepsilon t)^{1,5} dt = \frac{\Delta P_{\text{ст}}^* \omega_{\text{max}}^{1,5}}{2,5} t_1. \quad (15)$$

Потери энергии в стали статора при трапецеидальном законе движения:

$$\begin{aligned} \Delta W_{\text{ст2}} &= \int_0^{t_2} \Delta P_{\text{ст2}} dt = \Delta P_{\text{ст}}^* \int_0^{t_2} (\omega(t))^{1,5} dt = 2\Delta P_{\text{ст}}^* \int_0^{t_{п2}} (\varepsilon t)^{1,5} dt + \Delta P_{\text{ст}}^* \int_{t_{п2}}^{t_2} \omega_y^{1,5} dt = \\ &= 0,8\Delta P_{\text{ст}}^* \omega_y^{1,5} t_{п2} + \Delta P_{\text{ст}}^* \omega_y^{1,5} (t_2 - 2t_{п2}) = \Delta P_{\text{ст}}^* \omega_y^{1,5} (t_2 - 1,2t_{п2}). \end{aligned} \quad (16)$$

Разделив (16) на (15), получим:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta W_{\text{ст2}}}{\Delta W_{\text{ст1}}} &= \frac{2,5\Delta P_{\text{ст}}^* \omega_y^{1,5} (t_2 - 1,2t_{п2})}{\Delta P_{\text{ст}}^* \omega_{\text{max}}^{1,5} t_1} = \\ &= 2,5 \left( \frac{\omega_y}{\omega_{\text{max}}} \right)^{1,5} \left[ 0,5 \left( \frac{\omega_y}{\omega_{\text{max}}} + \frac{\omega_{\text{max}}}{\omega_y} \right) - 0,6 \frac{\omega_y}{\omega_{\text{max}}} \right]. \end{aligned} \quad (17)$$

Выражение (17) позволяет, задавшись отношением угловых скоростей  $\omega_y/\omega_{\max}$ , определить соотношение потерь в стали статора БДПТ при трапецеидальном и треугольном законах движения. Результаты такого расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Соотношения  $t_2/t_1$  и  $\Delta W_{\text{ст}2}/\Delta W_{\text{ст}1}$  для различных значений  $\omega_y/\omega_{\max}$**

	$\omega_y/\omega_{\max}$											
	0,3	0,4	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	1
$t_2/t_1$	0,82	1,45	1,25	1,18	1,13	1,09	1,06	1,04	1,03	1,01	1,006	1
$\Delta W_{\text{ст}2}/\Delta W_{\text{ст}1}$	0,67	0,77	0,84	0,87	0,9	0,92	0,94	0,96	0,975	0,986	0,99	1

Из таблицы следует, что при замене треугольной диаграммы трапецеидальной потери энергии в стали статора двигателя также снижаются, но незначительно. Например, при  $\omega_y/\omega_{\max} = 0,7$  потери энергии в стали уменьшаются на 6 %, при увеличении времени – на 6 %.

#### ВЫВОД

Показана целесообразность замены треугольной диаграммы движения трапецеидальной при отработке перемещений  $\phi \leq \phi_{\text{гр}} = \omega_{\max}^2 / \epsilon$ . Такая замена обеспечивает значительное снижение греющих потерь энергии в двигателе при незначительном увеличении времени перемещения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. С а н д л е р, А. С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями / А. С. Сандлер, Р. С. Сарбатов. – М.: Энергия, 1974. – 328 с.
2. М о р о з о в с к и й, М. Я. Разделение суммарных потерь холостого хода на составляющие в вентильных двигателях с возбуждением от постоянных магнитов / М. Я. Морозовский, Ю. А. Хотомлянский // Электротехника. – 1990. – № 8. – С. 27–28.

Представлена кафедрой  
электропривода и автоматизации  
промышленных установок  
и технологических комплексов

Поступила 5.05.2006