

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 φ 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 $\varphi_{гр} \leq \omega_{\max}^2 / \varepsilon$ (ω_{\max} – максимальная скорость двигателя; ε – угловое ускорение двигателя), могут быть использованы треугольная или трапецеидальная диаграмма скорости (рис. 1).

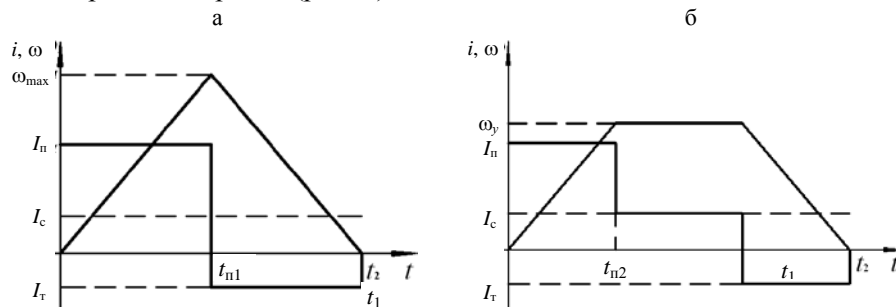


Рис. 1. Графики скорости и тока при: а – треугольном; б – трапецеидальном законах движения

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_n – ток двигателя при пуске; I_T – ток двигателя при торможении; t_{n1} – 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:

$$I_n = I_c + I_d; \quad (2)$$

$$I_T = I_c - I_d, \quad (3)$$

где I_d – динамическая составляющая тока двигателя; I_c – статический ток двигателя.

Подставим выражения (2) и (3) в (1) и с учетом того, что $t_1 = 2t_{n1}$, получим

$$\Delta W_{эл} = 2R(I_d^2 + I_c^2)t_1. \quad (4)$$

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

$$\Delta W_{э2} = \int_0^{t_{n2}} 2RI_n^2 dt + \int_0^{t_1 - t_{n2}} 2RI_c^2 dt + \int_0^{t_{n2}} 2RI_T^2 dt = 2R(2I_d^2 t_{n2} + I_c^2 t_2), \quad (5)$$

где t_{n2} – время разгона двигателя при трапецеидальном законе движения; t_2 – то же движения двигателя.

Разделив (5) на (4), получим

$$\frac{\Delta W_{э2}}{\Delta W_{эл}} = \frac{1}{I_d^2 + I_c^2} \left(I_d^2 \frac{t_{n2}}{t_1} + I_c^2 \frac{t_2}{t_1} \right). \quad (6)$$

Для равноускоренного вращательного движения характерны следующие соотношения:

$$t_{n1} = \sqrt{\varphi/\varepsilon}; \quad t_{n2} = \omega_y/\varepsilon. \quad (7)$$

Время движения привода при треугольном законе составляет

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

где $\omega_{\max} = \sqrt{\varepsilon\varphi}$ – 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:

$$\frac{t_{n2}}{t_{n1}} = \frac{\omega_y}{\omega_{\max}}; \quad \frac{t_2}{t_1} = \frac{1}{2} \left(\frac{\omega_y}{\omega_{\max}} + \frac{\omega_{\max}}{\omega_y} \right). \quad (10)$$

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 $I_c/I_d = 2$.

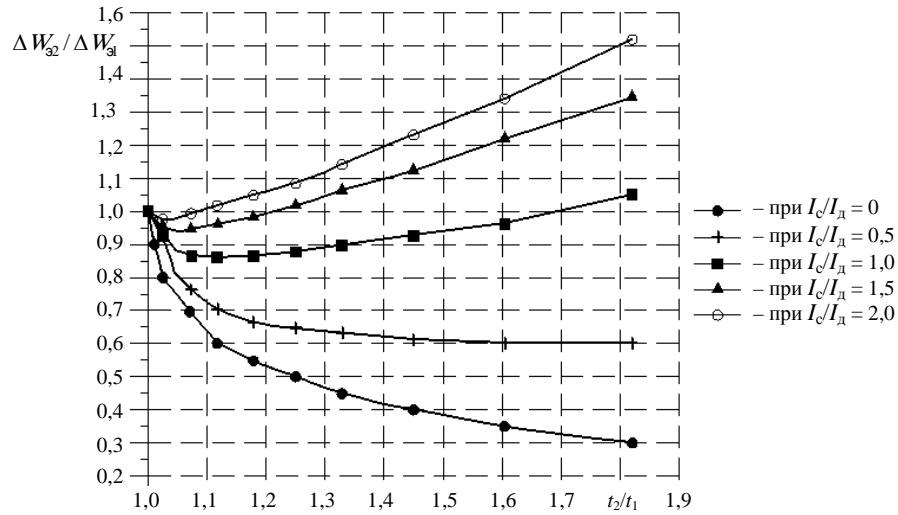


Рис. 2. Графики зависимостей $\Delta W_{32} / \Delta W_{31} = f(t_2 / t_1)$ при различных значениях I_e / I_d

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 $\omega = 1$ рад/с.

Потери энергии в стали статора при треугольном законе движения составляют

$$\Delta W_{\text{ст1}} = \int_0^{t_1} \Delta P_{\text{ст1}} dt = \Delta P_{\text{ст}}^* \int_0^{t_1} (\omega(t))^{1.5} dt = 2\Delta P_{\text{ст}}^* \int_0^{t_{n1}} (\varepsilon t)^{1.5} dt = \frac{\Delta P_{\text{ст}}^* \omega_{\text{max}}^{1.5}}{2.5} t_1. \quad (15)$$

Потери энергии в стали статора при трапецеидальном законе движения:

$$\begin{aligned} \Delta W_{\text{ст2}} &= \int_0^{t_2} \Delta P_{\text{ст2}} dt = \Delta P_{\text{ст}}^* \int_0^{t_2} (\omega(t))^{1.5} dt = 2\Delta P_{\text{ст}}^* \int_0^{t_{n2}} (\varepsilon t)^{1.5} dt + \Delta P_{\text{ст}}^* \int_{t_{n2}}^{t_2} \omega_y^{1.5} dt = \\ &= 0,8\Delta P_{\text{ст}}^* \omega_y^{1.5} t_{n2} + \Delta P_{\text{ст}}^* \omega_y^{1.5} (t_2 - 2t_{n2}) = \Delta P_{\text{ст}}^* \omega_y^{1.5} (t_2 - 1,2t_{n2}). \end{aligned} \quad (16)$$

Разделив (16) на (15), получим:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta W_{\text{ст2}}}{\Delta W_{\text{ст1}}} &= \frac{2,5\Delta P_{\text{ст}}^* \omega_y^{1.5} (t_2 - 1,2t_{n2})}{\Delta P_{\text{ст}}^* \omega_{\text{max}}^{1.5} t_1} = \\ &= 2,5 \left(\frac{\omega_y}{\omega_{\text{max}}} \right)^{1.5} \left[0,5 \left(\frac{\omega_y}{\omega_{\text{max}}} + \frac{\omega_{\text{max}}}{\omega_y} \right) - 0,6 \frac{\omega_y}{\omega_{\text{max}}} \right]. \end{aligned} \quad (17)$$

Выражение (17) позволяет, задавшись отношением угловых скоростей ω_y/ω_{\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 ω_y/ω_{\max}

	ω_y/ω_{\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 $\varphi \leq \varphi_{\text{гр}} = \omega_{\max}^2 / \varepsilon$. 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