УДК 629.11.656

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 ω = *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 $\varphi_{гр} \le \omega^2_{max}/\varepsilon$ (ω_{max} – максимальная скорость двигателя; ε – угловое ускорение двигателя), могут быть использованы треугольная или трапецеидальная диаграмма скорости (рис. 1).

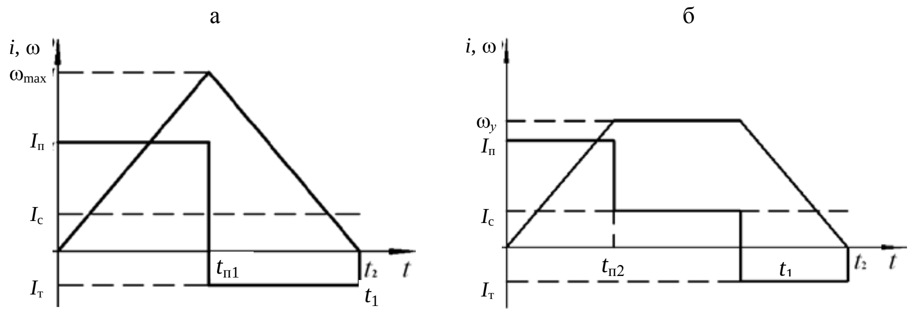

Рис. 1. Графики скорости и тока при: а – треугольном; б – трапецеидальном законах движения

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 $\varphi \le \varphi_{гр}$ 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 $\Delta W_{э1}$ для треугольного закона движения равны

$$\Delta W_{э1} = \int_0^{t_{п1}} 2RI_п^2\,dt + \int_0^{t_1} 2RI_т^2\,dt = 2R(I_п^2 t_{п1} + I_т^2(t_1 - t_{п1})), \qquad (1)$$

где $I_п$ – ток двигателя при пуске; $I_т$ – ток двигателя при торможении; $t_{п1}$ – 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:

$$I_п = I_с + I_д; \tag{2}$$

$$I_т = I_с - I_д, \tag{3}$$

где $I_д$ – динамическая составляющая тока двигателя; $I_с$ – статический ток двигателя.

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

$$\Delta W_{э1} = 2R(I_д^2 + I_с^2)t_1. \tag{4}$$

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)

$$\Delta W_{э2} = \int_0^{t_{п2}} 2RI_п^2 dt + \int_0^{t_1 - t_{п2}} 2RI_с^2 dt + \int_0^{t_{п2}} 2RI_т^2 dt = 2R(2I_д^2 t_{п2} + I_с^2 t_2), \tag{5}$$

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

Разделив (5) на (4), получим

$$\frac{\Delta W_{э2}}{\Delta W_{э1}} = \frac{1}{I_д^2 + I_с^2}\left(I_д^2 \frac{t_{п2}}{t_{п1}} + I_с^2 \frac{t_2}{t_1}\right). \tag{6}$$

Для равноускоренного вращательного движения характерны следующие соотношения:

$$t_{п1} = \sqrt{\varphi/\varepsilon}\,; \quad t_{п2} = \omega_у/\varepsilon\,. \tag{7}$$

Время движения привода при треугольном законе составляет

$$t_1 = 2\omega_{max}/\varepsilon\,, \tag{8}$$

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

Время движения привода при трапецеидальном законе определяется по формуле

$$t_2 = \frac{\omega_y}{\varepsilon} + \frac{\varphi}{\omega_y}\,. \tag{9}$$

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

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

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

$$\frac{\Delta W_{э2}}{\Delta W_{э1}}=\frac{1}{\left(I_с/I_д\right)^2+1}\frac{\omega_у}{\omega_{max}}\left[1+\frac{1}{2}\left(\frac{I_с}{I_д}\right)^2\left(1+\frac{\omega_{max}^2}{\omega_у^2}\right)\right]. \quad (11)$$

Из последнего выражения следует, что уменьшение электрических потерь энергии при замене треугольного закона движения трапецеидальным зависит от соотношений $\omega_у/\omega_{max}$ и $I_с/I_д$. Рассматривая $I_с/I_д$ как параметр, определим минимум функции $(\Delta W_{э2}/\Delta W_{э1})=f(\omega_у/\omega_{max})$. Для этого продифференцируем следующее выражение и приравняем производную к нулю

$$\left(\omega_у/\omega_{max}\right)_{min}=\frac{I_с/I_д}{\sqrt{\left(I_с/I_д\right)^2+2}}. \quad (12)$$

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

$$\left(\Delta W_{э2}/\Delta W_{э1}\right)_{min}=\frac{\left(I_с/I_д\right)\sqrt{\left(I_с/I_д\right)^2+2}}{\left(I_с/I_д\right)^2+1}; \quad (13)$$

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

Из (13) и (14) следует

$$\left(\Delta W_{э2}/\Delta W_{э1}\right)_{min}=\frac{1}{(t_2/t_1)_{min}}.$$

Выражения (13) и (14) позволяют определить минимум функции $\left(\Delta W_{э2}/\Delta W_{э1}\right)_{min}= f\left(t_2/t_1\right)$, а выражение (12) – соответствующее этому минимуму соотношение $\left(\omega_у/\omega_{max}\right)_{min}$ для различных соотношений токов $I_с/I_д$. По выражению (11) с учетом (10) построены графики зависимости $\Delta W_{э2}/\Delta W_{э1}= f\left(t_2/t_1\right)$ при $I_с/I_д = (0;\ 0{,}5;\ 1;\ 1{,}5;\ 2)$ (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 $I_с/I_д$. Например, при отношении скоростей $\omega_у/\omega_{max}$ = 0,7 потери в приводе снижаются на 30 % при $I_с/I_д$ = 0 и на 12 % – при $I_с/I_д$ = 1, а увеличение времени составляет всего 6 %. Если же $I_с > I_д$, то замена треугольной диаграммы трапецеидальной приводит к незначительному снижению электрических потерь. Так, для того же соотношения скоростей $\omega_у/\omega_{max}$ = 0,7 снижение потерь составляет 5 % при $I_с/I_д$ = 1,5 и всего 1 % – при $I_с/I_д$ = 2.

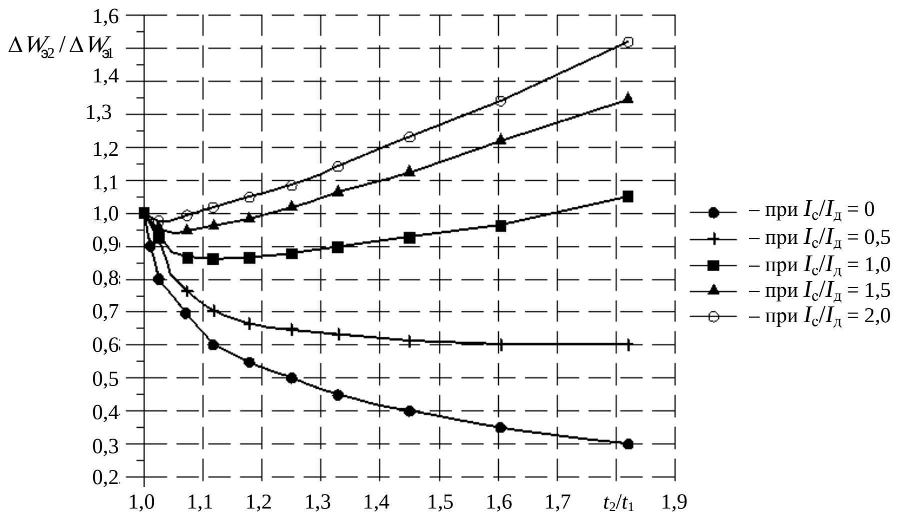

Рис. 2. Графики зависимостей $\Delta W_{э2} / \Delta W_{э1} = f(t_2 / t_1)$
при различных значениях $I_с/I_д$

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

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

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

Потери энергии в стали статора при треугольном законе движения составляют

$$\Delta W_{ст1} = \int_0^{t_1} \Delta P_{ст1}\,dt = \Delta P^*_{ст}\int_0^{t_1} (\omega(t))^{1,5}\,dt = 2\Delta P^*_{ст}\int_0^{t_{п1}} (\varepsilon t)^{1,5}\,dt = \frac{\Delta P^*_{ст}\omega_{\max}^{1,5}}{2,5}t_1. \quad (15)$$

Потери энергии в стали статора при трапецеидальном законе движения:

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

Разделив (16) на (15), получим:

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

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 $\Delta W_{ст2}/\Delta W_{ст1}$ 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
$\Delta W_{ст2}/\Delta W_{ст1}$	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 $\varphi \le \varphi_{гр} = \omega_{max}^2 / \varepsilon$. Такая замена обеспечивает значительное снижение греющих потерь энергии в двигателе при незначительном увеличении времени перемещения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сандлер, А. С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями / А. С. Сандлер, Р. С. Сарбатов. – М.: Энергия, 1974. – 328 с.
2. Морозовский, 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