

УДК 62-83:621.771

## ПОТРЕБЛЕНИЕ РЕАКТИВНОЙ ЭНЕРГИИ ТИРИСТОРНЫМИ ПОЗИЦИОННЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

*Зеленов А.Б., д.т.н., проф., Полилов Е.В., к.т.н., Яблонь В.П., к.т.н., Морозов Д.И., к.т.н. Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск 94204, г. Алчевск, пр. Ленина, 16 E-mail: dimorozov@mail.ru*

У даній статті наведені результати дослідження рівня споживаної реактивної енергії позиційним електроприводом, а також порівняння реактивних енергій при відпрацюванні необхідної програми переміщень за трикутними тахограмами з різним темпом розгону-гальмування. На прикладі електропривода натискних пристроїв кліти прокатного стана показано, що споживана реактивна енергія при зменшенні темпу розгону-гальмування виконавчого пристрою також зменшується.

**Ключові слова:** тиристорний перетворювач, позиційний електропривод, реактивна енергія.

The given paper presents the results of research of a level of consumed reactive energy by the positional electrical drive, and also the comparison of reactive energies at execution of the necessary program of motions on triangular tachograms with different rate of acceleration-deceleration action. On an example of the electrical drive of push devices of the rolling mill it is shown that consumed reactive energy at decrease of rate of acceleration-deceleration action of a final control device also reduces.

**Keywords:** a thyristor converter, positional electrical drive, reactive energy.

**Введение.** Авторами в [1] рассмотрен способ снижения потерь в позиционных электроприводах за счет уменьшения темпов разгона и торможения при отработке заданного перемещения. Очевидно, что предложенный способ оптимизации диаграммы работы приемлем для механизма, взаимодействующего по технологии с группой механизмов таким образом, что имеется определенный запас времени для отработки заданного перемещения без снижения производительности технологического объекта в целом. Примером такого механизма является механизм нажимного устройства прокатной клетки реверсивного стана.

**Анализ предыдущих исследований.** В [1] авторами показано, что при отработке заданного перемещения по треугольной тахограмме (рис.1) потери в электроприводе пропорциональны отношению времен отработки в третьей степени (без учета статической нагрузки). При учете последней, выяснилось, что зависимость потерь от времени отработки перемещения имеет экстремальный характер. Используя данные о времени работы, при котором потери будут минимальны, предложена методика определения оптимального темпа разгона и торможения при отработке заданного перемещения при наличии ограничения на допустимое время отработки. При уменьшении ускорения снижается и максимальная скорость  $\omega_k$  при отработке перемещения. Если исполнительный двигатель постоянного тока получает питание от классического тиристорного преобразователя то уровень потребления реактивной энергии при отработке заданного перемещения также будет различным. Исследования энергетики позиционного электропривода будут не

полными, если вопрос потребления реактивной энергии останется открытым.

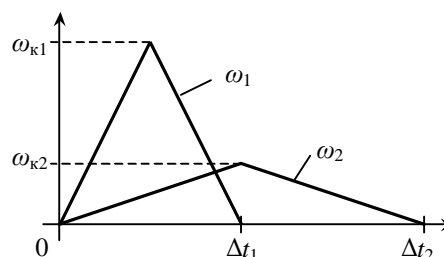


Рисунок 1 – Процессы отработки одинакового перемещения за различное время

**Цель работы.** Сравнение уровней реактивных энергий, потребляемых позиционным электроприводом при работе по диаграммам с минимальными потерями.

**Материал и результаты исследования.** Определение уровня потребляемой реактивной энергии при известной тахограмме произведем по первой гармонике тока. Приняв, что  $\cos \phi$  при работе тиристорного преобразователя равен косинусу угла управления ( $\cos \alpha$ ), определим реактивную мощность и энергию, потребляемую приводом [2].

Рассмотрим случай отработки перемещения по треугольной тахограмме. Процесс изменения напряжения преобразователя получим без учета форсирований при изменении тока, считая процесс  $i(t)$  прямоугольным (рис. 2, а). Время отработки обозначим  $\Delta t$ .

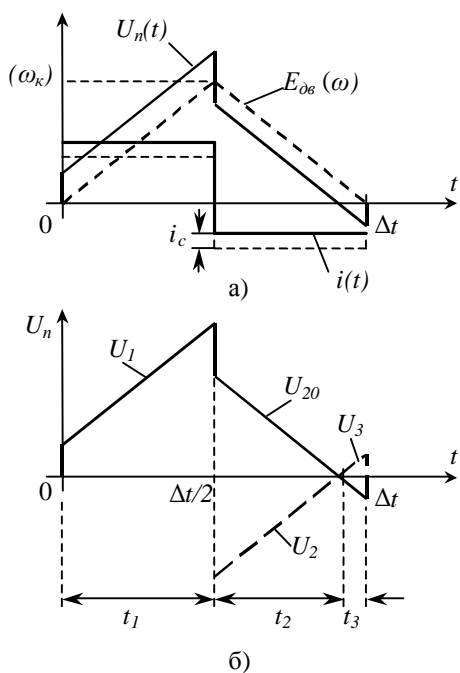


Рисунок 2 – Изменение напряжения преобразователя при работе по треугольной тахограмме

Проанализируем процесс изменения среднего значения напряжения преобразователя. Разобьем процесс  $U_n(t)$  на 3 участка: участок 1 – разгон двигателя, преобразователь работает в выпрямительном режиме ( $U_1$ ),  $0 \leq t < \Delta t / 2$ . Продолжительность участка  $t_1 = \Delta t / 2$  (рис. 2, б).

участок 2 – торможение двигателя, преобразователь работает в инверторном режиме. Фактическое изменение напряжения преобразователя –  $U_2$ . Начало участка – момент начала торможения, конец участка – при  $U_n(t) = 0$ , т.е.  $\Delta t / 2 \leq t < \Delta t / 2 + t_2$ . Продолжительность второго этапа:

$$t_2 = \frac{1}{\varepsilon} \left[ \omega_k - \frac{(I_{\text{дин}} - I_c)R}{C\Phi} \right] = \frac{1}{\varepsilon} [\omega_k - \Delta\omega_{\text{дин.т}}];$$

участок 3 – торможение двигателя, преобразователь работает в выпрямительном режиме ( $U_3$ ). Промежуток времени:  $\Delta t / 2 + t_2 \leq t \leq \Delta t$ . Продолжительность  $t_3 = \Delta t / 2 - t_2$ .

Рассмотрим участок 1. Активная мощность, потребляемая из сети:

$$P_1(t) = u(t) \cdot i(t) = (I_c + I_{\text{дин}}) u(t),$$

где  $u(t) = C\Phi \varepsilon t + (I_c + I_{\text{дин}})R$ .

Напряжение преобразователя изменяется в соответствии с углом управления следующим образом  $u = E_m \cos \alpha$ . Тогда выражение для полной мощности:

$$S_1(t) = \frac{P_1(t)}{\cos \alpha} = E_m (I_c + I_{\text{дин}}).$$

Т.е. полная мощность не зависит от скорости, а определяется максимальным напряжением преобразователя и потребляемым током. Реактивная мощность

$$Q_1(t) = \sqrt{S_1(t)^2 - P_1(t)^2} = (I_c + I_{\text{дин}}) \sqrt{E_m^2 - [C\Phi \varepsilon t + (I_c + I_{\text{дин}})R]^2}.$$

Реактивную энергию, потребляемую приводом, найдем, проинтегрировав  $Q_1(t)$ :

$$A_{1p} = \int_0^{\Delta t / 2} Q_1(t) dt.$$

Рассуждая также, для участков 2 и 3 получим выражения для  $A_{2p}$  и  $A_{3p}$ . Решения определенных интегралов, собственно энергии, будут следующими:

$$A_{1p} = \frac{E_m^2 B_1}{2C\Phi \varepsilon} \left\{ \arcsin D_{11} - \arcsin D_{12} + \frac{1}{2} \sin(2 \arcsin D_{11}) - \frac{1}{2} \sin(2 \arcsin D_{12}) \right\},$$

$$A_{2p} = \frac{E_m^2 B_2}{2C\Phi \varepsilon} \left\{ \arcsin D_{21} - \arcsin D_{22} + \frac{1}{2} \sin(2 \arcsin D_{21}) - \frac{1}{2} \sin(2 \arcsin D_{22}) \right\},$$

$$A_{3p} = \frac{E_m^2 B_3}{2C\Phi \varepsilon} \left\{ \arcsin D_{31} + \frac{1}{2} \sin(2 \arcsin D_{31}) \right\},$$

где

$$B_1 = (I_c + I_{\text{дин}}); B_2 = B_3 = (I_{\text{дин}} - I_c);$$

$$D_{11} = \frac{C\Phi \varepsilon t_1 + (I_c + I_{\text{дин}})R}{E_m}; D_{12} = \frac{(I_c + I_{\text{дин}})R}{E_m};$$

$$D_{21} = \frac{C\Phi \omega_k - (I_{\text{дин}} - I_c)R}{E_m};$$

$$D_{22} = \frac{-C\Phi \varepsilon t_2 + C\Phi \omega_k - (I_{\text{дин}} - I_c)R}{E_m}; D_{31} = \frac{C\Phi \varepsilon t_3}{E_m}.$$

При трапецидальной тахограмме энергии при пуске и торможении будут определяться в соответствии с приведенными выше выражениями. При неизменной скорости активная мощность, потребляемая из сети:

$$P = (\omega_{\text{уст}} C\Phi + I_c R) \cdot I_c.$$

Полная мощность:  $S = E_m I_c$ .

Реактивная мощность:

$$Q_{\text{уст}} = I_c \sqrt{E_m^2 - (\omega_{\text{уст}} C\Phi + I_c R)^2}.$$

Реактивная энергия:  $A_{\text{уст.p}} = Q_{\text{уст}} \cdot t_y$ .

В приведенных выражениях  $\omega_{\text{уст}}$  – установившаяся скорость,  $t_y$  – время работы с установившейся скоростью.

Рассмотрим значения потребляемой реактивной энергии для уже рассмотренного в [1] механизма установки верхних валков рабочей клетки блюминга-

слябинга 1250 ОАО «АМК» для двух вариантов отработки заданных перемещений: с фиксированным темпом разгона-торможения; с уменьшенным тем-

пом разгона-торможения, индивидуальным для каждого перемещения (табл. 1).

**Таблица 1 – Временные и энергетические показатели отработки заданных перемещений**

$S_i$ , мм	$t_{доп i}$ , с	$\lambda_{пт i} = const$	$\lambda_{пт i} = var$	$t_{вкл i}^{\lambda=const}$ , с	$t_{вкл i}^{\lambda=var}$ , с	$A_{р i}^{\lambda=const}$ , ВАр·с	$A_{р i}^{\lambda=var}$ , ВАр·с
50	1	2.011	0.731	0.603	1	$1.859 \cdot 10^6$	$1.215 \cdot 10^6$
50	1		0.731	0.603	1	$1.859 \cdot 10^6$	$1.215 \cdot 10^6$
50	1		0.731	0.603	1	$1.859 \cdot 10^6$	$1.215 \cdot 10^6$
50	1		0.731	0.603	1	$1.859 \cdot 10^6$	$1.215 \cdot 10^6$
50	1		0.731	0.603	1	$1.859 \cdot 10^6$	$1.215 \cdot 10^6$
50	1		0.731	0.603	1	$1.859 \cdot 10^6$	$1.215 \cdot 10^6$
50	1		0.731	0.603	1	$1.859 \cdot 10^6$	$1.215 \cdot 10^6$
50	1		0.731	0.603	1	$1.859 \cdot 10^6$	$1.215 \cdot 10^6$
50	1		0.731	0.603	1	$1.859 \cdot 10^6$	$1.215 \cdot 10^6$
870	5		2.011	5	5	$2.69 \cdot 10^6$	$2.69 \cdot 10^6$
100	1.5		0.65	0.875	1.5	$2.051 \cdot 10^6$	$1.608 \cdot 10^6$
100	1.5		0.65	0.875	1.5	$2.051 \cdot 10^6$	$1.608 \cdot 10^6$
710	5		0.57	4.143	5	$2.558 \cdot 10^6$	$2.602 \cdot 10^6$
60	1		0.877	0.66	1	$1.985 \cdot 10^6$	$1.435 \cdot 10^6$
40	1		0.585	0.539	1	$1.702 \cdot 10^6$	$9.849 \cdot 10^5$
590	5	0.371	3.5	5	$2.458 \cdot 10^6$	$2.504 \cdot 10^6$	

Показатели, приведенные в табл. 1, имеют следующий смысл:  $S_i$  – заданное перемещение;  $t_{доп i}$  – допустимое время (максимальное) для отработки заданного перемещения;  $\lambda_{пт i}$  – кратность динамического момента при пуске и торможении;  $t_{вкл i}$  – время включенного состояния при отработке i-го перемещения; видим, что при отработке с индивидуальным темпом на каждом перемещении отработка производится полностью за допустимое время;  $A_{р i}$  – суммарная реактивная энергия при отработке i-го перемещения.

Суммарная реактивная энергия за цикл прокатки составляет для двух вариантов:

$$A_{р\text{ цикл}}^{\lambda=const} = 32,22 \cdot 10^6 \text{ ВАр}\cdot\text{с},$$

$$A_{р\text{ цикл}}^{\lambda=var} = 24,37 \cdot 10^6 \text{ ВАр}\cdot\text{с}.$$

Видим, что при работе с переменным (перенастраиваемым) темпом разгона-торможения потребление реактивной энергии меньше и составляет

$$\frac{A_{р\text{ цикл}}^{\lambda=var}}{A_{р\text{ цикл}}^{\lambda=const}} \cdot 100\% = 75,6\%$$

по отношению к энергии при неизменных темпах. При пересчете на год:

$$A_{р\text{ год}}^{\lambda=const} = A_{р\text{ цикл}}^{\lambda=const} \frac{7200}{t_{ц}} 10^{-3} = 2,85 \cdot 10^6 \text{ кВАр}\cdot\text{ч},$$

$$A_{р\text{ год}}^{\lambda=var} = 2,15 \cdot 10^6 \text{ кВАр}\cdot\text{ч}.$$

Уменьшение потребления реактивной энергии за год составляет:

$$A_{р\text{ год}}^{\lambda=const} - A_{р\text{ год}}^{\lambda=var} = 0,69 \cdot 10^6 \text{ кВАр}\cdot\text{ч}.$$

**Выводы.** Получены аналитические выражения для определения реактивной энергии, потребляемой позиционным электроприводом постоянного тока при питании его от тиристорного преобразователя. Показано, что для механизма установки верхних валков рабочей клетки блюминга-слябинга 1250 ОАО «АМК» применение задатчика с перенастраиваемым темпом разгона-торможения позволяет наряду с уменьшением потерь снизить и потребление реактивной энергии на 24,4%.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ**

1. Полилов Е.В., Зеленев А.Б., Яблонь В.П., Морозов Д.И. Энергосбережение и оптимизация потерь в позиционных электроприводах // Электромашинобудовання та електрообладнання. Тематичний випуск “Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика”. – К.: Техніка, 2006. – С. 315-319.  
 2. Андреев В.П., Сабинин Ю.А. Основы электропривода. – Л.-М.: Госэнергоиздат, 1963. – 722 с.

Стаття надійшла 22.04.2007 р.