

УДК-62-83

С. П. Савич

## ПОРІВНЯННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ У НЕСТАЦІОНАРНИХ РЕЖИМАХ

**Анотація.** Проведено порівняння споживання електроенергії двома типами електроприводів для кранових механізмів повороту: з реостатним регулюванням і електропривод ПЧ-АД. Проведено розрахунки для конкретного механізму з заданим режимом роботи. Дослідження довели, що для заданого режиму роботи термін окупності частотного перетворювача становить 3,5–5,5 років.

**Ключові слова :** реостатне регулювання, перетворювач частоти-асинхронний двигун, споживання електроенергії, характеристики перехідного процесу, термін окупності.

S. P. Savich

## COMPARISON OF THE ECONOMIC EFFICIENCY OF ALTERNATIVE ELECTRIC DRIVES IN UNSTEADY MODES

**Abstract.** A comparison of electricity consumption by two types of electric drives for crane rotation mechanisms: rheostat control and electric drive frequency inverter-induction motor. The calculation for a concrete mechanism with given determined operation mode was made. Research has proved that for a given operation mode of payback inverter is 3,5-5,5 years.

**Keywords:** rheostat control, inverter-induction motor, consumption of electrical energy, characteristics of the transient process, the payback period.

С. П. Савич

## СРАВНЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ В НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ

**Аннотация.** Проведено сравнение потребления электроэнергии двумя типами электроприводов для крановых механизмов поворота: с реостатным регулированием и электропривода ПЧ-АД. Проведены расчеты для конкретного механизма с заданным режимом работы. Исследования доказали, что для заданного режима работы срок окупаемости частотного преобразователя составляет 3,5-5,5 лет.

**Ключевые слова:** реостатное регулирование, преобразователь частоты-асинхронный двигатель, потребление электроэнергии, характеристики переходного процесса, срок окупаемости.

В останні роки особливо гостро ставиться питання про заощадження різних видів енергії, зокрема електричної. Саме тому існує тенденція для механізмів, які працюють в особливо важкому повторно-короткочасному режимі (механізми переважувальних кранів), заміни асинхронного електропривода з реостатним регулюванням на електропривод перетворювач частоти-асинхронний двигун (ПЧ-АД). Сучасні перетворювачі, які пропонуються різними фірмами, як правило, з ланкою постійного струму, досить дорого коштують, тому їх доцільно використовувати лише тоді, якщо термін окупності цього обладнання не перевершує 3–5 років. Типовим представником механізмів, які працюють значну частину циклу у нестационарних режимах, є механізми повороту кранів, екскаваторів тощо, тому що

зведений момент інерції цих механізмів у багато разів більший за момент інерції самого двигуна. Отже, якщо йде мова, зокрема, про втрати в двигуні за певний цикл механізму повороту, то в цьому разі для попередніх розрахунків можливо обійтись лише втратами за час перехідних процесів.

Метою цієї роботи є рекомендації щодо використання частотних перетворювачів для конкретних кранових механізмів повороту.

Для електроприводів з реостатним керуванням, коли швидкість неробочого ходу залишається незмінною, при розрахунках втрат, якщо робота відбувається на штучних характеристиках, користуємось формулою [1]

$$\Delta A_{\Pi} = J \frac{\omega_0^2}{2} \left( \frac{M_{СЕР}}{M_{ДИН}} \right) \left( 1 + \frac{R_1}{R_{2\Sigma}} \right) (s_i^2 - s_{i-1}^2), \quad (1)$$

де  $s_i^2$  і  $s_{i-1}^2$  – ковзання на початку і в кінці кожного етапу пуску;  $R_1$  і  $R_{2\Sigma}$  – опір статора і приведений ротора;  $M_{СЕР}$  і  $M_{ДИН}$  – середнє і

© Савич С.П., 2012

динамічне значення моменту, а  $J \frac{\omega_0^2}{2}$  – енергія, яка споживається для виконання певної роботи при переході електропривода з одного стану при пуску до другого з кінетичною енергією  $J \frac{\omega_0^2}{2}$  (вважаємо, що кінцева швидкість – швидкість неробочого ходу).

Частіше таких характеристик три, тоді енергія, що споживається електроприводом за весь час пуску,

$$A_{II} = \Delta A_{II1} + \Delta A_{II2} + \Delta A_{II3} + J \frac{\omega_0^2}{2}. \quad (2)$$

Споживання енергії при гальмуванні противмиканням

$$\Delta A_{III} = 3J \frac{\omega_0^2}{2} \left( \frac{M_{CEP}}{M_{ДИН}} \right) \left( 1 + \frac{R_1}{R_{2\Sigma}} \right) - J \frac{\omega_0^2}{2}. \quad (3)$$

В останньому випадку  $J \frac{\omega_0^2}{2}$  – енергія, що виробляється при гальмуванні механізмом, а динамічний момент  $\dot{I}_{\ddot{A}E\dot{I}}$  – різний у формулах (2) і (3). Ці розрахунки робимо для всього циклу: спочатку механізм, повертаючись, переносить вантаж, а потім повертається без нього.

Далі для обох випадків розраховуємо :

1) час пуску  $t_{1II}$  і  $t_{2II}$  ; шлях, пройдений за час пуску –  $\varphi_{1II}$  і  $\varphi_{2II}$ ; 2) час гальмування –  $t_{1T}$  і  $t_{2T}$  ; шлях, пройдений за час гальмування –  $\varphi_{1T}$  і  $\varphi_{2T}$ ; 3) шлях в усталеному режимі, вважаючи заданим необхідний кут повороту, наприклад, 100 град:  $\varphi_{VCT1} = 100^\circ - (\varphi_{1II} + \varphi_{1T})$  і  $\varphi_{VCT2} = 100^\circ - (\varphi_{2II} + \varphi_{2T})$ ,

4) час роботи в усталеному режимі –  $t_{VCT1} = \frac{\varphi_{VCT1}}{\omega_H}$  і  $t_{VCT2} = \frac{\varphi_{VCT2}}{\omega_H}$ .

Зараз проводимо порівняння для електроприводів механізму обертання крану з двигуном 4МТН225М8 з фазним ротором, номінальною потужністю 30 кВт. Вважаємо, що робота механізму здійснюється за типовим циклом. Його складові: 1) пуск і 2) гальмування без вантажу; 3) пуск і 4) гальмування з вантажем.

Приймаємо статичний момент механізму  $M_C = 0,15M_H = 59,7 \text{ Н} \cdot \text{м}$ , а середній момент двигуна в перехідних режимах,  $M_{CEP} = 1,2M_H = 477,6 \text{ Нм}$ .

Таким чином, динамічні моменти при пуску для формули (2)

$M_{ДИН} = M_{CEP} - M_C = 417,9 \text{ Нм}$ , а при гальмуванні для формули (3)

$M_{ДИН} = -M_{CEP} - M_C = -537,3 \text{ Нм}$ . Результати розрахунків енергії при використанні найбільш розповсюдженого реостатного електропривода наведені в табл. 1. При використанні електропривода ПЧ-АД неробоча швидкість може плавно змінюватись за певним законом. Втрати в цьому випадку зручно розраховувати за формулою [2]

$$\Delta A_{II} = J' \frac{\omega_0^2}{2} \left( 1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) \frac{2\Gamma_M}{t_0}, \quad (4)$$

де фіктивним моментом інерції  $\Gamma = J \left( \frac{\dot{I}_{\ddot{N}A\dot{D}}}{\dot{I}_{\ddot{A}E\dot{I}}} \right)$  враховується наявність статичного моменту електропривода.

### 1. Кількість споживаної енергії при реостатному керуванні

Втрати, Вт·с	Без вантажу		З вантажем	
	Пуск	Гальмування	Пуск	Гальмування
$\Delta A_{II}$	I	64 775	–	118 119
	II	8 509		15 576
	III	2 167		3 952
$\Delta A_{II\Sigma}$ ,	75 451		160 813	137 587
$\Delta A_{II\Sigma} \pm J \frac{\omega_0^2}{2}$ ,	131 496		104 768	239 787
За цикл	667 098			

Цікаво, що  $t_0$  – час зміни  $\omega_0$ , а частота, тобто швидкість неробочого ходу, змінюється автоматично весь час переходу. Тобто цей час допустимо розраховувати за формулами

$$\text{під час пуску...} t_0 = J \frac{\omega}{M_{II} - M_C},$$

$$\text{під час гальмування...} t_0 = J \frac{-\omega}{-M_{II} - M_C}.$$

Споживання енергії під час пуску

$$\Delta A_{II} = J \frac{\omega_0^2}{2} + J'_{II} \frac{\omega_0^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \frac{2T_M}{t_0},$$

а при гальмуванні

$$\Delta A_{II} = -J \frac{\omega_0^2}{2} + J'_{II} \frac{\omega_0^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \frac{2T_M}{t_0}.$$

При цьому вважаємо, що привод ПЧ-АД може забезпечити постійний момент під час пуску і гальмування, як показано на рисунку, де момент відкладено у відносних одиницях. На ньому зображена екскаваторна характеристика, робоча частина якої є природною, а сформована умовна вертикальна частина саме забезпечує середній момент  $M_{сеп1} = 1,2M_H = 477,6 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

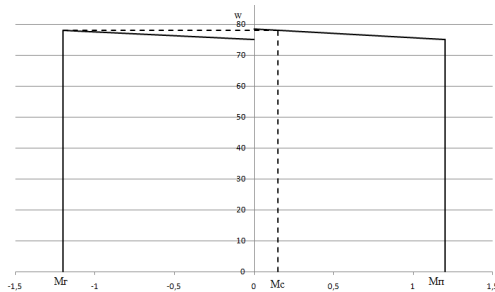


Рис.1. Характеристики переходного процесу в системі ПЧ-АД

Результати розрахунків споживання електроенергії електроприводом ПЧ-АД для всього циклу наведені в табл. 2, якщо використовується частотний перетворювач без функції рекуперації і в табл. 3, якщо така функція існує. ККД ПЧ приймаємо 0,96.

Вважаючи тривалість включення механізму обертання перевантажувальних порталних кранів  $T_B=60 \%$ , розрахунки для заданого режиму з будь-яким електроприводом показали, що тривалість циклу близько 50 с. Якщо прийняти, що протягом року такі механізми порталних перевантажувальних кранів працюють 1200 год [3], то за рік механізм робить 85 000 циклів.

Таким чином, використання частотних перетворювачів для кранових механізмів повороту можуть заощадити значну кількість електроенергії.

Різниця затрат енергії за рік для різних способах управління АД механізмів повороту по відношенню до реостатного регулювання згідно з даними табл.1-3: ПЧ-АД без рекуперації – 10740 кВт·год ; ПЧ-АД з рекуперацією – 13 260 кВт·год. Це і є заощаджена електроенергія при використанні електропривода ПЧ-АД по відношенню до реостатного регулювання. Вона може бути реальною підставою для розрахунку терміну окупності цих перетворювачів частоти, які випускаються двома різними фірмами.

## 2. Споживана енергія ПЧ-АД без рекуперації

Параметр, Вт·с	Без вантажу		З вантажем	
	Пуск	Гальмування	Пуск	Гальмування
$\Delta A$	16 084	16 706	29 299	30 541
$J \frac{\omega_0^2}{2}$	56 046		102 201	
$\Delta A_{\Sigma} (\eta = 0,96),$	$(\Delta A_{II\Sigma} + J \frac{\omega_0^2}{2}) / \eta$	$(\Delta A_{II\Sigma} - J \frac{\omega_0^2}{2}) \eta$	$(\Delta A_{II\Sigma} + J \frac{\omega_0^2}{2}) / \eta$	$(\Delta A_{II\Sigma} - J \frac{\omega_0^2}{2}) \eta$
	75 135	0	136 980	0
$\Delta A_{\Sigma}$ за цикл,	212 115			

### 3. Споживана енергія ПЧ-АД з рекуперацією

Параметр, Вт·с	Без вантажу		З вантажем	
	Пуск	Гальмування	Пуск	Гальмування
$\Delta A$	16 084	16 706	29 299	30 541
$J \cdot \frac{\omega_0^2}{2}$	56 046		102 201	
$\Delta A_{\Sigma} (\eta = 0,96)$	$(\Delta A_{п\Sigma} + J \frac{\omega_0^2}{2}) / \eta$	$(\Delta A_{г\Sigma} - J \frac{\omega_0^2}{2}) \eta$	$(\Delta A_{п\Sigma} + J \frac{\omega_0^2}{2}) / \eta$	$(\Delta A_{г\Sigma} - J \frac{\omega_0^2}{2}) \eta$
	75 135	-37 766	136 980	-68 794
$\Delta A_{\Sigma}$ за цикл,	105 555			

Останнє і наведено в табл. 4, де термін окупності розраховувався за формулою  $T = K/B$ , в якій  $B$  – вартість заощадженої за рік електроенергії (вважаючи вартість електроенергії в Україні 1,13 грн/кВт·год.),  $K$  – вартість додаткового обладнання, яке взято з [4–5].

Результати розрахунку свідчать, що для кранових механізмів обертання перевантажувальних кранів, працюючих за вище наведеним типовим графіком, термін окупності

перетворювачів частоти невеликий; крім того, стало ясным, що перетворювачі без рекуперації доцільно використовувати фірми SCHNEIDER ELECTRIC, але з функцією рекуперації рекомендуються перетворювачі фірми SIEMENS. Це пояснюється тим, що рекуператори фірми SIEMENS вмонтовані в перетворювачі і тому дешевше рекуператорів разом з перетворювачами фірми SCHNEIDER ELECTRIC.

### 4. Терміни окупності перетворювачів частоти і модулів рекуперації для двигуна потужністю 30 кВт

Параметр		ПЧ-АД без рекуперації	ПЧ – АД з рекуперацією
Різниця споживання електроенергії, кВт·год / вартість заощадженої електроенергії, грн.		10740/12200	13 260/15063
Вартість обладнання, грн.	SIEMENS	58800	66700
	SCHNEIDER ELECTRIC	43000	86150
Термін окупності, роки	SIEMENS	4,8	4,4
	SCHNEIDER ELECTRIC	3,5	5,7

Список використаної літератури

1. Ключев В. И. Теория электропривода: Учебн. для вузов / В. И. Ключев – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.

2. Фираго Б.И. Теория электро-привода: Учеб. пособие / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – М.: ЗАО Техноперспектива, 2004. – 527 с.

3. Яуре А. Г. Крановый электропривод: Справочник / А. Г. Яуре, Е. М. Певзнер – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 344 с.

4. Altivar 71. Преобразователи частоты. 2009.(www.schneider-electric.com.ua).

5. Sinamics G110, Sinamics G120. Стандартные преобразователи. Sinamics G110D, Sinamics G120D. Децентрализованные преобразователи. Каталог D 11.1 2009. (www.siemens.ru/iadt).

Отримано 15.07.2012

References

1. Klyuchev V. I. Theory of electric: Training for schools / V. I. Klyuchev. – Moscow: Energoatomizdat, 1985. – 560 p. [in Russian].

2. Firago B. I. The theory of electro-drive: Manual / B. I. Firago, L. B. Pavlyachik. – Moscow: ЗАО Tehnoperspektiva, 2004. – 527 p. [in Russian].

3. Yaure A. G. Crane elektroprivod: Directory / A. G. Yaure, E. M. Pevzner. – Energoatomizdat. – Moscow: – 1988. – 344 p. [in Russian].

4. Altivar 71. Frequency converters. 2009. (Www.schneider-electric.com.ua) [in Russian].

5. Sinamics G110, Sinamics G120. Standard inverters. Sinamics G110D, Sinamics G120D. Decentralized converters. Catalog D 11.1 2009. (www.siemens.ru / iadt) [in Russian].



Савич  
Світлана Павлівна,  
ст.викладач  
каф. електропостачання і  
енергоменеджменту Оде-  
ського нац. політехн.  
ун-ту