

УДК 621.313

Ш. Базиль , канд. техн. наук,
С.П.Савич

ЕНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ МЕХАНИЗМОВ ПОВОРОТА

Розглядаються два типи асинхронних електроприводів для механізму обертання, який працює лише в переходних режимах: реостатний та електропривод з частотним керуванням. Зроблені розрахунки втрат у двигуні та енергії, що споживається з мережі, зроблені певні висновки.

Рассматриваются два вида асинхронных электроприводов для механизма поворота, работающего только в переходных режимах: реостатный и электропривод с частотным управлением. Выполнены расчёты потерь в двигателе и потребляемой из сети энергии, сделаны необходимые выводы.

Two types of induction motor drives for rotation mechanism, which is working only in transient condition are considered: resistor drive and electric drive with frequency converter. Energy losses in the motor and energy consumption are calculated, the necessary conclusions are made.

Крановые механизмы поворота, характеризуемые большими приведенными моментами инерции, работают главным образом в переходных режимах пуска и торможения [2]. Традиционные схемы управления этими механизмами используют резисторы, включаемые в цепи ротора двигателей с фазным ротором. Однако такое управление, не обеспечивая нужного качественного управления, сопровождается существенными потерями в цепях статора и ротора и, следовательно, большим потреблением электроэнергии; последнее в условиях бережного отношения к расходу различных видов энергии весьма нежелательно, потому постепенно осуществляется переход к другим современным электроприводам.

Целью настоящей работы является сравнение потребления электроэнергии за определённое число циклов механизма поворота при работе асинхронного электропривода с реостатным регулированием, а также при использовании преобразователя частоты – электропривода ПЧ-АД. Анализ проводился для механизма поворота порталного крана «Сокол» с асинхронным двигателем типа 4МТКН200Л6, с номинальными мощностью 22 кВт, угловой скоростью $97,96 \text{ c}^{-1}$ и моментом 224,4 Н·м. Считаем, что цикл механизма поворота складывается из поворота на 120° с грузом и обратного поворота на тот

же угол без груза. Приняв, что двигатель при пуске механизма с грузом развивает постоянный момент 1,6 Мн, а момент сопротивления составляет 0,05 Мн, было рассчитано угловое ускорение $5,45 \text{ c}^2$. Далее полагаем эту величину ускорения постоянной при разгоне и торможении с грузом и без него. Поэтому времена разгона и торможения одинаковы и равны 15 с, а скорость, до которой следует разогнаться, $81,6 \text{ c}^{-1}$: тахограмма для поворота на угол 120° оказывается треугольной.

Расчетные значения для каждого из четырех режимов приведены в табл.1, а соответствующая диаграмма – на рис.1. Таким образом, общее потребление электроэнергии следует рассчитывать только для реальных переходных режимов.

Потребление электрической энергии определяется частью, идущей на совершение полезной работы, а также потерями в двигателе и преобразователе. Если первая часть является постоянной для данного режима эксплуатации, то потери зависят от типа используемого электропривода.

При реостатном регулировании применяется двигатель с фазным ротором. Известно, что потери энергии при этом в переходных режимах не зависят от времени процесса, а определяются только величиной запасаемой или выделяемой кинетической энергии. Например, при пуске потери в цепи

1. Расчетные значения моментов двигателя

Параметр	Поворот вперед (с грузом)		Поворот назад (без груза)	
	Разгон	Торможение	Разгон	Торможение
Суммарный момент инерции, кгм ²	63,8	63,8	15,84	15,84
Момент двигателя, Нм	359	-336	-97	75,1

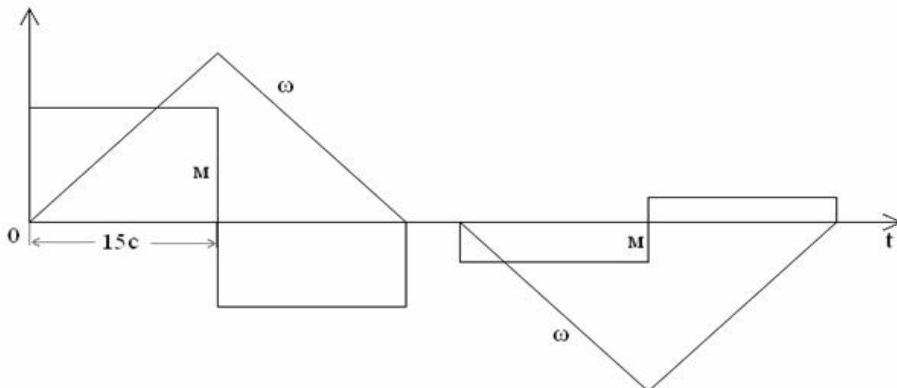


Рисунок. Тахограмма и момент двигателя в течение цикла.

ротора определяются $\Delta A_p = J \omega_c^2 / 2$, а в цепи статора они зависят от сопротивления контура ротора [4]. Чем больше это сопротивление, тем меньше потери в статоре. Поэтому приближённо можно считать, что эти потери при пуске составляют 20 % от потерь в роторе, а при торможении противовключением, осуществляя с большим сопротивлением, – 5 %. Формулы для расчета электроэнергии при пуске и торможении двух альтернативных электроприводов сведены в табл.2.

Более сложным оказывается расчёт потерь при использовании электропривода ПЧ-АД. Для этого сначала рассчитаем номинальные потери мощности в двигателе – при работе его с номинальной скоростью,

когда он развивает номинальный момент, – по формуле:

$$\Delta P_n = \Delta P_{med} + \Delta P_\theta + \Delta P_{cm} + \Delta P_{mex}, \quad (1)$$

где ΔP_{med} – переменные потери в цепях статора и ротора определяются по номинальным токам; ΔP_θ – потери от намагничивания находят по заданному току намагничивания; ΔP_{cm} – потери в стали статора и ротора двигателя; ΔP_{mex} – механические потери, равные 5 % всех номинальных потерь.

Номинальные потери могут быть определены также разностью потребляемой из сети мощности в номинальном режиме и номинальной мощностью на валу:

$$\Delta P_n = P_{nomp} + P_n, \quad (2)$$

где $P_{nomp} = 3U_n I_n \cos\phi_n$.

2. Формулы для расчета электроэнергии

Тип электропривода	Вид энергии	Пуск до рабочей скорости	Торможение в режиме противовключения
Реостатное управление	Полезная работа	$A_{pol} = J \omega_c^2 / 2$	$A_{pol} = J \omega_c^2 / 2$
	Потери в двигателе	$\Delta A_p = 1,2 J \omega_c^2 / 2$	$\Delta A_p = 3,5 J \omega_c^2 / 2$
ПЧ-АД	Потребляемая из сети эл. энергия	$A = \Delta A_p + A_{pol} = 2,2 J \omega_c^2 / 2$	$A = \Delta A_p - A_{pol} = 1,5 J \omega_c^2 / 2$
	Потери в двигателе	ΔA_{np}	ΔA_{np}
	Потребляемая из сети эл. энергия	$A = \frac{\Delta A_{np} + A_{pol}}{\eta_{np}}$	$A = (\Delta A_{np} - A_{pol}) \eta_{np}$

В табл.3 сведены значения составляющих потерь в номинальном режиме для двигателя 4МТКН200Л6.

3. Номинальные потери в двигателе, Вт

$\Delta P_{med.h}$	$\Delta P_{e.h}$	$\Delta P_{cm.h}$	$\Delta P_{mex.h}$	ΔP_h
3122,3	690,7	479,1	225,9	4518

При частотном регулировании синхронная скорость изменяется пропорционально частоте, поэтому здесь следует говорить об относительном

$$S_0 = \frac{\omega_0^1 - \omega}{\omega_0^1} = \frac{\Delta\omega}{\omega_0^1}$$

и абсолютном скольжении

$$S_a = \frac{\omega_0^1 - \omega}{\omega_0} = \frac{\Delta\omega}{\omega_0} \quad const,$$

где ω_0 и ω_0^1 – скорости идеального холостого хода при номинальной и текущей частоте. Обозначая относительную частоту $f^* = \omega_0^1 / \omega_0$, можно записать: $S_0 = S_a / f^*$.

Известна формула для момента двигателя при частотном управлении:

$$M = \frac{3R_2^1 U^2}{\omega_0^1 S_0 \left[\left(R_1 + R_2^1 / S_0 \right)^2 + (X_k f^*)^2 \right]}. \quad (3)$$

После преобразования выражения (3) получаем [1]:

$$U_i = f_i \sqrt{\frac{M \omega_0 S_a}{3R_2^1}} \sqrt{\left(\frac{R_1}{f_i} + \frac{R_2^1}{S_a} \right)^2 + X_k^2}, \quad (4)$$

где R_1, R_2^1 и X_k – активные сопротивления статора, ротора и индуктивное сопротивление короткого замыкания.

Приближенно ток статора можно определить по формуле:

$$I_{1i} = \sqrt{I_{\mu i}^2 + (I_2^1)^2},$$

причём ток намагничивания можно считать пропорциональным напряжению, т.е.

$$I_{\mu i} = I_{\mu h} \frac{U_i}{U_h}.$$

При постоянной нагрузке можно считать $I_2^1 = const$ для различных характеристик частотного регулирования. Далее используем для расчета потерь в i -ой точке следующие формулы:

переменные потери

$$\Delta P_{med.i} = I_{1i}^2 R_1 + 3(I_2^1)^2 R_2^1; \quad (5)$$

потери от тока намагничивания

$$\Delta P_{e.i} = 3I_{\mu i}^2 R_1; \quad (6)$$

потери в стали двигателя [4]

$$\Delta P_{cm.i} = \Delta P_{cm.h} \left(\frac{U_i}{U_h} \right)^2 \left(\frac{f_i}{f_h} \right)^{1,3} \left(1 + S_i^{1,3} \right); \quad (7)$$

механические потери

$$\Delta P_{mex.i} = \Delta P_{mex.h} (\omega_i / \omega_h)^2; \quad (8)$$

Так как в переходном режиме непрерывно изменяются частота, напряжение и скорость, то в соответствии с формулами (5)-(8) меняются и все составляющие потерь. В табл.4 приведены результаты расчета потерь на нескольких дискретных этапах разгона, при изменении частоты от минимального значения 3,5 Гц ($f^* = 0,07$) до рабочей точки – 42,23 Гц ($f^* = 0,845$). Абсолютное скольжение $S_a = 0,065$. В последней строке таблицы приводятся потери энергии с учетом длительности каждого этапа Δt_i . Суммарное значение потерь энергии за время пуска составляет 101,53 кДж (кВт·с).

Аналогично выполнен полный расчет потерь электроэнергии во время пуска и торможения в системе ПЧ-АД для всех 4 этапов цикла.

Для расчета потерь и потребляемой электрической энергии в системе ПЧ-АД использовались формулы, приведенные в той же табл.2. При этом предполагается, что КПД преобразователя частоты $\eta_{np} = 0,85$, а сам преобразователь снабжен блоком рекуперации: при торможении большой массы поворотной платформы выделяемая кинетическая энергия за вычетом потерь в двигателе и преобразователе может возвращаться в сеть. Так как время работы в данном цикле составляет 60 с, то считая для механизма ПВ=60 %, длительность цикла – 100 с.

Таким образом, в течение часа должно быть отработано 36 циклов. Для расчета энергии за 1 час (в кВт·ч) следует полезную работу, а также потери (в Дж) умножить на коэффициент 10^{-5} .

Ниже, в табл.5 сведены сравнительные расчетные данные потребляемой электро-

4. Потери при пуске двигателя для $M = 1,6 M_h$

$f^* = f_i/f_h$	0,07	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	0,845
$\omega_{0i}, \text{с}^{-1}$	7,33	10,5	20,93	41,86	62,8	83,8	88,38
$\omega_{ci}, \text{с}^{-1}$	0,52	3,7	14,13	35,06	56	76,93	81,6
$U_i, \text{В}$	16,8	23,94	47,8	95,6	143,4	191,2	201,9
$\Delta P_i, \text{Вт}$	3315,3	6235,9	6271,2	6423,9	6772,3	7359,4	7818,15
$\Delta t_i, \text{с}$	0,095	0,58	1,91	3,84	3,84	3,84	0,857
$\Delta A_i, \text{Втс}$	295,95	3616,8	11978	24667,8	26006	28260,1	6700,15

5. Сравнение потребляемой из сети электроэнергии, кВтч

Тип электро- привода	$J=63,8 \text{ кгм}^2$		$J=15,84 \text{ кгм}^2$		ΣA
	Пуск	Торможение	Пуск	Торможение	
Реостатное управление	4,67	4,57	1,16	1,13	11,53
ПЧ-АД	3,69	-1,42	0,84	-0,32	2,79

энергии в течение часа (36 циклов) при использовании старой, реостатной системы управления и современного электропривода ПЧ-АД. Из нее следует, что благодаря блоку рекуперации ПЧ при торможениях энергия действительно возвращается в сеть, а общее её потребление снижается более, чем в 4 раза.

Таким образом, сравнительный расчет расхода электроэнергии для характерного графика работы типового механизма поворота порталного крана свидетельствует о том, что замена реостатного управления двигателя с фазным ротором электроприводом ПЧ-АД (с короткозамкнутым асинхронным двигателем) позволяет экономить потребляемую энергию, снизив ее в несколько раз. Дальнейшее исследование может быть направлено на выбор конкретных преобразователей и расчет срока их реальной окупаемости.

Список использованной литературы

1. Бушер В.В. Обеспечение специальных характеристик асинхронного электропривода с частотным регулированием /В.В.Бушер, В.Г.Герасимяк //Електромашинобуд. та електрообладн.– 2010.– Вип. 75.– С.29-31.

2. Герасимяк Р.П. Анализ и синтез кра-нових электромеханических систем /Р.П. Ге-расимяк, В.А.Лещев.– Одесса, СМИЛ, 2008.– 192 с.

3. Жежеленко И.В. Интергармоники се-тевого тока преобразователя частоты со зве-ном постоянного тока /И.В.Жежеленко, Ю.Л.Саенко //Промэлектро. – 2009. – №3. – С.25-31.

4.Ключев В.И. Теория электропривода /В.И.Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.

5.Яуре А.Г. Крановый електропривод: спрвочник /А.Г.Яуре, Е.М.Певзнер. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 344 с.

Получено 08.10.2010



Шафик Базиль,
к.т.н., профессор
Ал-Баасс ун-та.
Хомс–Сирия.
Email:
shafikbasil@gmail.com
Dr.Shafik Basil
Ph. D – Profissor
AL BAATH University –
Homs – Syria.



Савич
Светлана Павловна,
ст. преп. каф. Энергетич.
менеджмента Одесск. нац.
политехн. ун-та