

УДК 62.83

**О.И. ТОЛОЧКО** (д-р. техн.наук, проф.),  
**П.И. РОЗКАРЯКА**, (канд.техн.наук) **Г.С. ЧЕКАВСКИЙ** (канд.техн.наук, доц.)  
 Государственное высшее учебное заведение  
 «Донецкий национальный технический университет»  
 pavel\_rozkar@mail.ru

## ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ПОЗИЦИОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

*Рассмотрены вопросы оптимизации потребления электроэнергии позиционным электроприводом на основе системы векторного управления асинхронным двигателем, работающим в повторно-кратковременном режиме. Определено время отработки заданного перемещения из условия минимизации тепловых потерь и разработаны рекомендации по управлению потокоцеплением ротора в паузах между перемещениями.*

**Оптимизация энергопотребления, асинхронный двигатель, позиционный электропривод, векторное управление, управление потокоцеплением ротора.**

Системы позиционного электропривода могут отрабатывать задание на перемещение по законам управления, оптимальным по быстродействию или по тепловым потерям. Первый способ применяется в тех случаях, когда от быстродействия позиционного механизма зависит производительность технологического процесса в целом. Если же желаемое время отработки заданного перемещения  $t_0$  превышает минимально возможную величину с учетом ограничений на координаты привода, то стараются минимизировать непроизводительные потери электроэнергии. В первую очередь это относится к тепловым потерям в обмотках электродвигателей. Известно, если через обмотку с активным сопротивлением  $R$  протекает ток с действующим значением  $I$ , то мощность потерь в каждый момент времени определяется как  $RI^2(t)$ , а интегральные потери (потери энергии), которые будем в дальнейшем называть просто тепловые потери – как  $\Delta A = \int RI^2(t)dt$ .

При минимизации тепловых потерь часто пренебрегают некоторыми их составляющими. Например, в приводах постоянного тока не учитывают потери в обмотке возбуждения; очень часто для приводов, у которых момент статического сопротивления обусловлен только наличием трения, пренебрегают потерями от статических составляющих токов. Большое количество публикаций посвящено разработке оптимальных по тепловым потерям систем позиционного электропривода постоянного тока [1, 2]. При переносе опыта, полученного при разработке этих систем, на современные системы векторного управления асинхронными двигателями (АД) необходимо учитывать некоторые их особенности. В частности, соотношение между потокообразующей и моментобразующей составляющими тока статора в АД таково, что потерями, обусловленными необходимостью поддержания потокоцепления ротора на заданном уровне в процессе перемещения пренебрегать нельзя, а в паузах между перемещениями во многих случаях целесообразно снимать сигнал задания с потокообразующего канала управления.

**Целью работы** является определение времени отработки заданного перемещения из условия минимизации тепловых потерь и разработка рекомендаций по управлению потокоцеплением ротора в паузах между перемещениями.

Суммарные потери в обмотках 3-хфазного АД определяются выражением

$$\Delta A_{\Sigma} = 3 \int_0^t (I_s^2 R_s + I_r^2 R_r) dt, \quad (1)$$

где  $I_s$ ,  $I_r$  – действующие значения фазных токов статора и ротора,  $R_s$ ,  $R_r$  – сопротивления фаз статора и ротора (сопротивление ротора приведено к статору).

В асинхронном двигателе с векторным полеориентированным управлением, для математического описания которого обычно используют ортогональную систему координат  $dq$ , ориентированную по вектору потокоцепления ротора  $\psi_r$ , пространственный вектор тока статора представляют в виде двух ортогональных составляющих, одна из которых ( $i_{sd}$ ) формирует потокоцепление ротора в соответствии с передаточной функцией

$$\frac{\Psi_r(p)}{i_{sd}(p)} = \frac{L_m}{T_r p + 1}, \quad (2)$$

а вторая ( $i_{sq}$ ) – электромагнитный момент в соответствии с выражением

© Толочко О.И., Розкаряка П.И., Чекавский Г.С., 2011

$$M = 3z_p k_r \Psi_r i_{sq} / 2, \quad (3)$$

где  $T_r = \frac{L_r}{R_r}$  – электромагнитная постоянная времени ротора,  $z_p$  – число пар полюсов,  $k_r = \frac{L_m}{L_r}$  – коэффициент электромагнитной связи ротора;  $L_m$  – взаимная индуктивность,  $L_r$  – полная индуктивность ротора.

Соответствующие составляющие тока ротора определяются выражениями:

$$i_{rd} = \frac{1}{L_r} (\Psi_{rd} - L_m i_{sd}), \quad (4)$$

$$i_{rq} = -k_r i_{sq}. \quad (5)$$

Выражения (2)-(5) предполагают принятие для АД традиционных допущений: о симметричности машины, синусоидальности фазных координат, отсутствии насыщения, потерь в стали, приведении параметров ротора к цепи статора.

Электромагнитный момент двигателя можно разделить на 2 составляющие: статическую  $M_c$  и динамическую  $M_j$ :

$$M = M_j + M_c, \quad (6)$$

$$M_j = J \frac{d\omega(t)}{dt}, \quad (7)$$

где  $J$  – момент инерции привода,  $\omega(t)$  – скорость ротора.

Соответственно моментобразующую составляющую тока статора можно представить в виде суммы динамической и статической компонент:

$$i_{sq} = i_{sqj} + i_{sqc} = \frac{2}{3} \frac{M_j}{z_p k_r \Psi_r} + \frac{2}{3} \frac{M_c}{z_p k_r \Psi_r}. \quad (8)$$

С учетом уравнений (2)-(8) суммарные потери АД (1) можно разделить на следующие составляющие:

- потери от токов, вызывающих изменение скорости электропривода

$$\Delta A_{j\omega} = \frac{3}{2} \left( R_s \int_0^t i_{sqj}^2(t) dt + R_r \int_0^t i_{rqj}^2(t) dt \right) = \frac{3}{2} (R_s + k_r^2 R_r) \int_0^t i_{sqj}^2(t) dt; \quad (9)$$

- потери от токов, уравновешивающих действие момента статического сопротивления и способствующих поддержанию скорости на заданном уровне

$$\Delta A_{c\omega} = \frac{3}{2} (R_s + k_r^2 R_r) \int_0^t i_{sqc}^2(t) dt = \frac{(R_s + k_r^2 R_r)}{z_p k_r} \int_0^t \frac{M_c^2(t)}{\Psi_r(t)} dt,$$

которые при постоянной нагрузке  $M_c = const$ , что характерно для многих позиционных электроприводов, и при однозонном регулировании скорости ( $\Psi_r = \Psi_{r0} = const$ ) являются линейной функцией времени:

$$\Delta A_{c\omega} = \frac{3}{2} (R_s + k_r^2 R_r) i_{sqc}^2 t = \frac{(R_s + k_r^2 R_r)}{z_p k_r \Psi_{r0}} M_c^2 t; \quad (10)$$

- потери от токов, обеспечивающих изменение потокосцепления ротора

$$\Delta A_{j\psi} = \frac{3}{2} \left( R_s \int_0^t i_{sd}^2(t) dt + R_r \int_0^t i_{rd}^2(t) dt \right); \quad (11)$$

- потери от токов, обеспечивающих поддержание постоянства потокосцепления ротора

$$\Delta A_{c\psi} = \frac{3}{2} R_s i_{sd0}^2 t = \frac{3}{2} R_s \frac{\Psi_{rd0}^2}{L_m^2} t. \quad (12)$$

Тогда суммарные тепловые потери при отработке заданного перемещения с постоянным потокосцеплением ротора определяются выражением:

$$\Delta A_{\Sigma} = \Delta A_{c\omega} + \Delta A_{c\psi} + \Delta A_{j\omega} = \frac{3}{2} \left[ \left[ (R_s + k_r^2 R_r) i_{sqc}^2 + R_s i_{sd0}^2 \right] t + (R_s + k_r^2 R_r) \int_0^t i_{sqj}^2(t) dt \right]. \quad (13)$$

Потери  $\Delta A_{c\omega}$  и  $\Delta A_{c\psi}$  назовем статическими, так как они имеют в любой момент времени постоянную мощность, а потери  $\Delta A_{j\omega}$  и  $\Delta A_{j\psi}$  – динамическими, так как их мощность изменяется в функции времени.

Известно, что составляющая потерь  $\Delta A_{j\omega}$  с увеличением времени отработки перемещения  $t_0$  снижается, а составляющие  $\Delta A_{c\omega}$  и  $\Delta A_{c\psi}$  – увеличиваются. Следовательно, существует такое время  $t_0 = t_{0opt}$ , при котором

суммарные потери будут минимально возможными. Это показано в [1, 2] на примере системы электропривода постоянного тока.

Следует подчеркнуть, что в асинхронном двигателе отношение статических потерь к динамическим выше, чем в двигателях постоянного тока, т.к. постоянной составляющей потерь в АД нельзя пренебречь даже в режиме идеального холостого хода ( $M_c = 0$ ):

$$i_{sq0} = 0, \quad i_{rq0} = 0, \quad i_{sd0} = i_{s0} = \frac{\Psi_{r0}}{L_m}, \quad i_{rd0} = 0. \quad (14)$$

Проиллюстрируем вышесказанное, используя метод математического моделирования, на примере асинхронного двигателя со следующими параметрами:  $P_n = 5$  кВт;  $Z_p = 3$ ;  $J = 0,065$  Нм;  $U_\phi = 220$  В;  $I_{cн} = 13,5$  А;  $I_{c0} = 8,4$  А;  $R_s = 1,32$  Ом;  $R_r = 2,34$  Ом;  $L_m = 0,085$  Гн.

Графики зависимости электрических потерь в АД для одного и того же перемещения по параболической (1) и треугольной (2) тахограммам от времени его отработки представлены на рис. 1.

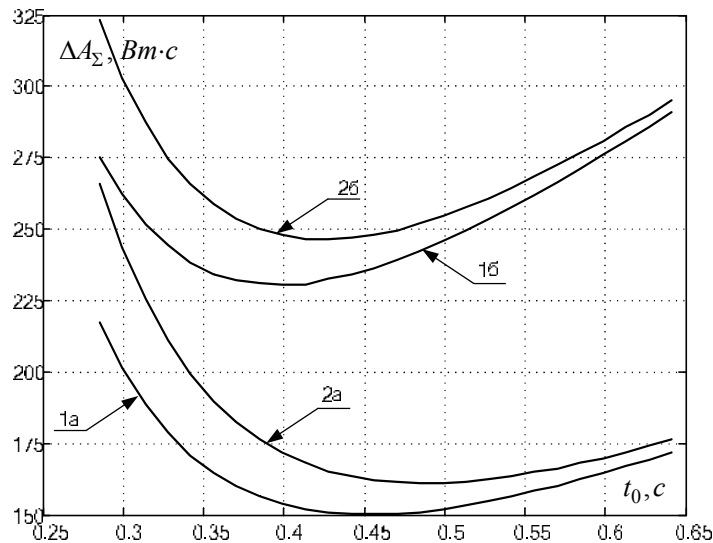


Рисунок 1 – Зависимость электрических потерь в асинхронном двигателе от времени отработки заданного перемещения: 1 – по параболической тахограмме, 2 – по треугольной тахограмме, а)  $M_c = 0$ , б)  $M_c = 0,5M_n$

Анализ рис. 1 подтверждает, что действительно непроизводительные потери электроэнергии существенно зависят от времени  $t_0$ , и что существует оптимальная величина этого параметра  $t_0 = t_{0opt}$ , обеспечивающая минимум энергопотребления, причем с увеличением нагрузки значение  $t_{0opt}$  уменьшается. Более эффективным является использование параболических тахограмм, что согласуется с известными теоретическими положениями.

Если между отдельными перемещениями существуют паузы, то возникает еще одна задача, связанная с уменьшением тепловых потерь: следует ли во время паузы снимать задание на потокосцепление ротора [3], и, если да, то по какому закону?

Канал управления потокосцеплением ротора состоит из контура потокосцепления с подчиненным ему контуром  $d$ -составляющей тока статора.

Рассмотрим вначале идеализированный случай, предполагая, что ток  $i_{sd}$  при размагничивании и намагничивании машины изменяется скачком и держится на этом уровне до окончания изменения потокосцепления. Это приблизительно соответствует случаю, когда выход регулятора потокосцепления ротора (РПР), вырабатывающего задание на ток  $i_{sd}$ , ограничен на уровне  $i_{sdmax} = i_{sd0} = \Psi_{r0}/L_m$ , а  $i_{sdmin} = 0$ .

Переходной процесс изменения потокосцепления в относительных единицах  $\psi_r^* = \psi_r/\Psi_{r0}$  при смене  $i_{sd}$  (см. рис. 2) описывается уравнением

$$\psi_r^*(t) = e^{-\frac{t}{T_r}}. \quad (15)$$

Если допустить, что в момент задания на восстановление потокосцепления  $t = t_{ia}$  переходной процесс размагничивания машины в общем случае еще не завершился, то при восстановлении  $i_{sd}$  уравнение переходного процесса потокосцепления будет иметь вид:

$$\psi_r^*(t) = 1 + \left( e^{\frac{t_{\text{нв}}}{T_r}} - 1 \right) \cdot e^{-\frac{t-t_{\text{нв}}}{T_r}} \quad (16)$$

Для того чтобы не исказить переходные процессы при пуске АД, потокосцепление ротора к концу паузы должно быть близким к  $\Psi_{r0}$  (можно допустить отклонение от указанной величины на (10-20)%), т.е.

$\psi_r^*(t_{\text{п}}) = 1 - \Delta\psi_r^*$ . На основании этой информации можно определить время начала восстановления поля  $t_{\text{нв}}$  (отсчитываем от начала сброса сигнала задания на  $\Psi_r$ ) при известном времени паузы  $t_{\text{п}}$ . Для этого подставим в уравнение (16)  $t=t_{\text{п}}$  и приравняем полученное выражение к желаемому значению:

$$1 - \Delta\psi_r^* = 1 + \left( e^{\frac{t_{\text{нв}}}{T_r}} - 1 \right) \cdot e^{-\frac{t_{\text{п}} - t_{\text{нв}}}{T_r}},$$

откуда получим:

$$\frac{t_{\text{нв}}}{T_r} = \ln\left(1 + \Delta\psi_r^* \cdot e^{\frac{t_{\text{п}}}{T_r}}\right). \quad (17)$$

Зависимости момента времени начала возбуждения  $t_{\text{нв}}/T_r$  от времени паузы  $t_{\text{п}}/T_r$  для разных значений  $\Delta\psi_r^*$  приведены на рис. 3.

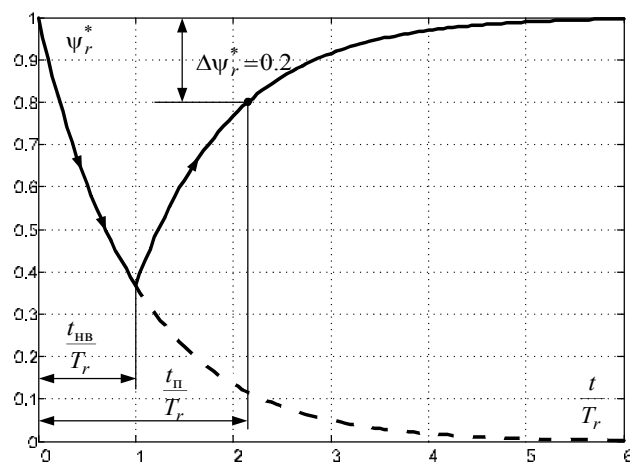


Рисунок 2 – Переходной процесс изменения потокосцепления во время паузы

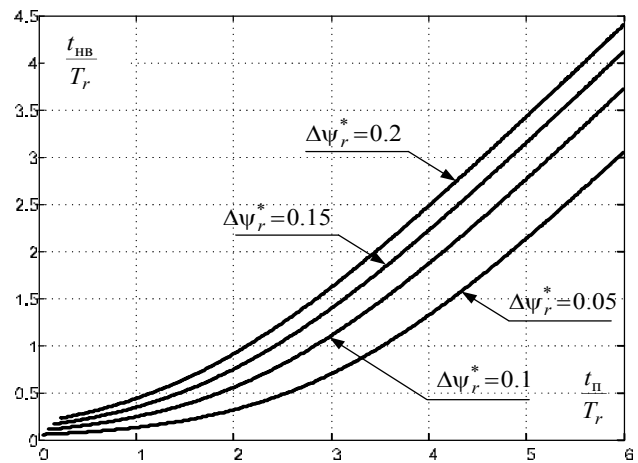


Рисунок 3 – Зависимости времени начала возбуждения от длительности паузы

Рассмотренный вариант соответствует минимально возможным уровням ограничения выходного сигнала РПР. Сравним его с другим крайним случаем, когда выходной сигнал РПР при изменении задания на потокосцепление не достигает уровня своего ограничения. Тогда закон изменения потокосцепления ротора однозначно определяется настройкой контуров рассматриваемого канала управления, размагничивание и намагничивание двигателя происходит при достаточно большом броске тока, и определить время начала восстановления поля не составляет труда.

На рис. 4 показаны зависимости электрических потерь асинхронного двигателя для сравниваемых вариантов управления возбуждением в паузе между перемещениями (кривые 2а и 2в соответственно), из сопоставления которых видно, что при любых паузах предпочтительным оказывается первый из рассматриваемых вариантов (кривая 2а на рис. 4).

Однако, если в системе векторного управления предусмотрено двухзонное управление скорости, то такое медленное изменение потокосцепления ротора, как это показано на рис. 2, окажется недопустимым. Тогда необходимо сравнить между собой по величине тепловых потерь вариант максимально быстрого размагничивания и намагничивания АД в паузе и вариант, при котором потокосцепление ротора в течение всей паузы остается постоянным. В последнем случае потери в функции времени изменяются по линейному закону (см. график 1 на рис. 4). Время паузы, при котором рационально размагничивать АД с максимальной форсировкой по току  $i_{sd}$  (без выхода РПР на уровень ограничения), определяется точкой пересечения графиков 2в и 1 на рис. 4. Для рассматриваемого случая оно превышает величину  $19T_r$ . В то же время минимальная пауза, при которой целесообразно осуществлять размагничивание двигателя с последующим его намагничиванием при минимально возможных уровнях ограничения РПР составляет  $2T_r$ . Между кривыми и будут располагаться графики, соответствующие ограничению РПР на уровне  $I_{d\max} > \psi_{r0}/L_m$  и  $I_{d\min} < 0$ . Для примера на рис. 4 представлен вариант ограничения выхода РПР уровне  $I_{d\max} = 2\psi_{r0}/L_m$ ,  $I_{d\min} = -\psi_{r0}/L_m$  (график 2б). В этом случае минимальное время паузы, в течение которой целесообразно размагничивать АД, составляет  $7T_r$ .

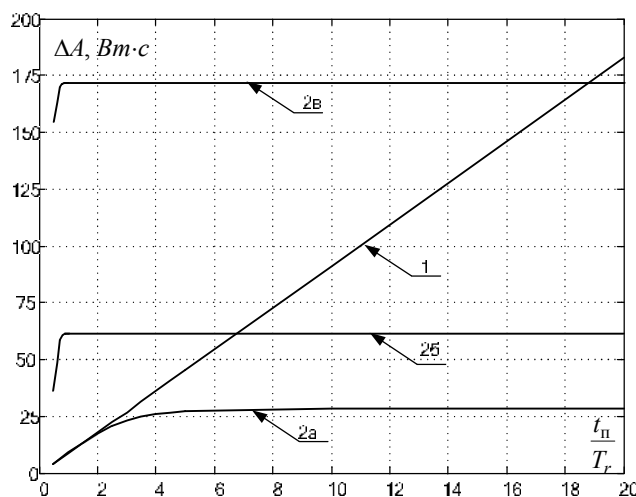


Рисунок 4 – Зависимость потерь от времени паузы: 1 – без съема возбуждения; 2 – со съемом возбуждения: а) выход РП ограничен на уровне  $I_{d \max} = \psi_{r0}/L_m$ ,  $I_{d \min} = 0$ ; б) выход РП ограничен на уровне  $I_{d \max} = 2\psi_{r0}/L_m$ ,  $I_{d \min} = -\psi_{r0}/L_m$ ; в) РП не достигает уровня ограничения

#### Выводы:

1. В системах позиционного электропривода переменного тока с векторным управлением непроизводительные потери электроэнергии можно снизить выбором соответствующего времени  $t_0 = t_{0opt}$ . Чем больше доля статических потерь, тем меньше оптимальное время отработки заданного перемещения  $t_{0opt}$ .

2. Если пауза между перемещениями превышает величину  $2T_r$ , то целесообразно снимать задание на потокосцепление ротора с ограничением регулятора потокосцепления ротора на уровне  $i_{sd \max} = \Psi_{r0}/L_m$ , а  $i_{sd \min} = 0$ .

3. На момент начала отработки перемещения достаточно, чтобы потокосцепление восстановилось до уровня  $0,8\psi_{r0}$ . Время начала восстановления поля  $t_{нв}$  при известном времени паузы  $t_{п}$  можно вычислить по формуле (17).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Полилов Е.В. Энергосбережение и оптимизация потерь в позиционных электроприводах / Е.В. Полилов, А.Б. Зеленев, В.П. Яблонь, Д.И. Морозов // Електромашинобудування та електрообладнання. Тематичний випуск "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика". – К.: Техніка. – 2006. – С. 315-319.

2. Толочко О.И. Расчет энергопотребления позиционного электропривода, реализующего оптимальное по тепловым потерям управление / О.И. Толочко, П.И. Розкаряка // Сборник научных трудов ДонНТУ. – Донецк: ДонНТУ, 2007. – №7(128) – С.31-34.

3. Браславский И.Я. Энергетическая оптимизация пусковых режимов частотных асинхронных электроприводов / И.Я. Браславский, А.В. Костылев, Д.П. Степанюк // Електромашинобудування та електрообладнання. Тематичний випуск "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика". – К.: Техніка, 2006. – С. 303-304.

Надійшла до редколегії 15.04.2011

Рецензент: О.П.Ковальов

О.І.ТОЛОЧКО, П.І.РОЗКАРЯКА,  
Г.С.ЧЕКАВСЬКИЙ

Державний вищий навчальний заклад  
«Донецький національний технічний університет»

О.ТОЛОЧКО, Р.РОЗКАРЯКА,  
G.CHEKAVSKYY

State Institution of Higher Education  
«Donetsk National Technical University»

**Оптимізація енергоспоживання позиційного електропривода з векторним керуванням асинхронним двигуном.** Розглянуто питання оптимізації споживання електроенергії позиційним електроприводом на основі векторного керування асинхронним двигуном, що працює у повторно-короткочасному режимі. Визначено час відпрацювання заданого переміщення із умови мінімізації теплових втрат та розроблені рекомендації по керуванню потокозчепленням ротора у паузах між переміщеннями.

**Оптимізація енергоспоживання, асинхронний двигун, позиційний електропривод, векторне керування, керування потокозчепленням ротора.**

**Optimization of Power Consumption of Positional Asynchronous Electric Drive with Vector Control.** Optimization of power consumption of positional asynchronous electric drive, which works in short-time mode, has been considered. Time of specified motion working-off has been determined in compliance with heat losses minimization criterion, and recommendations for rotor flux control has been developed for pauses between motions.

**Optimization of power consumption, asynchronous motor, positional electric drive, vector control, rotor flux control.**