

## УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ НАМАГНИЧИВАНИЯ И РАЗМАГНИЧИВАНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В СИСТЕМАХ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ

*О. И. Толочко, д.т.н., проф., зав. каф., П. И. Розкаряка к.т.н., Г. С. Чекавский, к.т.н., доц.*

*Донецкий национальный технический университет*

*ул.Артема, 58, 83001, г. Донецк, Украина*

*А. К. Кузель, зав. отд.*

*Донецкий политехнический техникум*

*ул.Челюскинцев, 159, 83001, г. Донецк, Украина*

*E-mail: pavel\_rozkar@mail.ru*

Выполнен анализ тепловых потерь в паузах при повторно-кратковременном режиме работы асинхронного двигателя с векторным управлением. Выведены формулы и получены графики, позволяющие принять правильное, с точки зрения снижения тепловых потерь в обмотках, решение о целесообразности управления потокосцеплением ротора в паузах или поддержания его на постоянном уровне.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, векторное управление, управление потокосцеплением ротора, снижение тепловых потерь.

**Введение.** В последнее время все более актуальной становится проблема снижения непроизводительных потерь электроэнергии. К таким потерям в системах электропривода относятся тепловые потери в обмотках электрических машин. При работе систем векторного управления асинхронным двигателем (АД) обычно рассматривают только тепловые потери, имеющие место в процессе движения привода. Однако если привод работает в напряженном повторно-кратковременном режиме, то и в паузах между периодами работы также будет непроизводительно расходоваться электроэнергия в процессе поддержания постоянства потокосцепления, либо в процессе размагничивания и намагничивания АД. Это обстоятельство необходимо учитывать при разработке мероприятий, направленных на уменьшение тепловых потерь.

**Цель исследований.** Анализ тепловых потерь в паузах повторно-кратковременного цикла работы АД с векторным управлением и разработка рекомендаций по снижению их величины.

**Материал и результаты исследований.** В АД с векторным полеориентированным управлением (ФОС), для математического описания которого обычно используют ортогональную систему координат  $d, q$ , ориентированную по вектору потокосцепления ротора  $\vec{\Psi}_r$ , пространственный вектор тока статора  $\vec{i}_s$  представляют в виде двух ортогональных составляющих, одна из которых

( $i_{sd}$ ) формирует потокосцепление ротора в соответствии с передаточной функцией

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

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

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

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

Соответствующие составляющие тока ротора определяются выражениями:

$$i_{rd} = \frac{1}{L_r} (\Psi_r - L_m i_{sd}), \quad (3)$$

$$i_{rq} = -k_r i_{sq}. \quad (4)$$

Выражения (1)-(4) получены с учетом традиционных допущений о симметричности АД, синусоидальности фазных координат, отсутствии насыщения, потерь в стали, приведении параметров ротора к цепи статора и т.п.

В паузах между рабочими циклами, когда  $i_{sq} = i_{rq} = 0$ ,  $M = 0$  и  $\omega = 0$ , работает только контур регулирования потокосцепления ротора с подчиненным ему контуром регулирования потокообразующей составляющей тока статора, показанный на рис. 1.

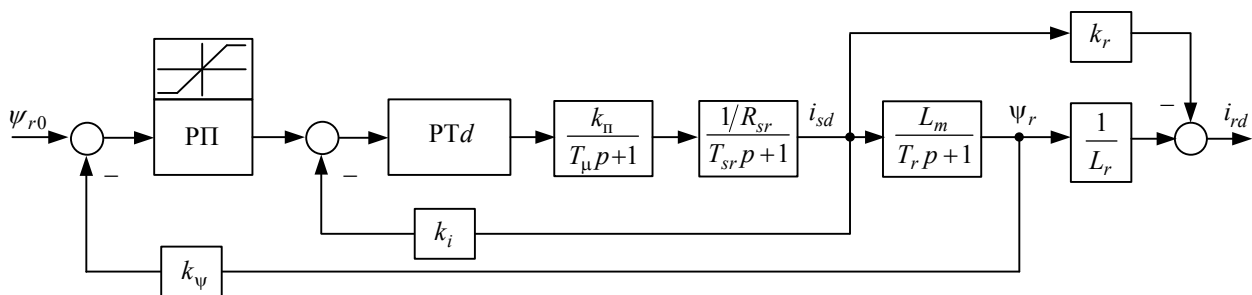


Рисунок 1 – Структурная схема канала намагничивания

Выясним, следует ли размагничивать и повторно намагничивать машину в паузах с точки зрения снижения тепловых потерь.

Для этого сравним потери, имеющие место при поддержании постоянного потокосцепления ротора

$$\Delta A_{c\psi} = \frac{3}{2} R_s i_{sd0}^2 t_{\Pi} \quad (5)$$

с потерями, имеющими место при изменении потокосцепления ротора в процессе размагничивания и намагничивания АД

$$\Delta A_{j\psi} = \frac{3}{2} \left( R_s \int_0^{t_{\Pi}} i_{sd}^2(t) dt + R_r \int_0^{t_{\Pi}} i_{rd}^2(t) dt \right) = \Delta A_{js} + \Delta A_{jr} \quad (6)$$

В формуле (5) в соответствии с (1)

$$i_{sd0} = \Psi_{r0} / L_m, \quad (7)$$

где  $\Psi_{r0}$  – амплитуда потокосцепления ротора в режиме холостого хода.

Потери  $\Delta A_{c\psi}$  назовем статическими, так как они имеют в любой момент времени постоянную мощность, а потери  $\Delta A_{j\psi}$  – динамическими, так как их мощность изменяется в функции времени. Следует отметить, что в некоторых источниках, например в [2], потерями  $\Delta A_{jr}$  пренебрегают.

Возможные варианты переходных процессов размагничивания и намагничивания двигателя в паузах при разных уровнях ограничения регулятора потокосцепления, определяющих коэффициент форсировки переходных процессов, показаны на рис. 2. При минимально возможных (необходимых в статике) уровнях ограничения, когда  $i_{sd\max} = i_{sd0}$ ,  $i_{sd\min} = 0$  (вариант а), ток  $i_{sd}$  изменяется практически мгновенно, а потокосцепление и ток  $i_{rd}$  – по экспоненциальному закону с постоянной времени  $T_r$ . В другом крайнем случае (вариант в), когда задание на  $i_{sd}$  не ограничено или не достигает своего уровня ограничения, потокосцепление ротора изменяется максимально быстро (в соответствии с настройкой контура потокосцепления), но это достигается за счет больших пиков токов статора и ротора. При использовании варианта б (ограничение задания на ток  $i_{sd}$  устанавливается с учетом запаса  $\pm i_{sd0}$  на регулирование по отношению к установившимся значениям тока) динамические свойства канала регулирования потокосцепления характеризуются некоторыми промежуточными показателями.

Исследования, выполненные в [1], показали, что из рассматриваемых вариантов наименьшие потери имеют место в первом случае (см. рис. 2а). В [1] также найдено аналитическое выражение для определения момента начала намагничивания двигателя  $\tau_{\text{нв}} = t_{\text{нв}} / T_r$  в функции времени паузы  $\tau_{\Pi} = t_{\Pi} / T_r$ :

$$\tau_{\text{нв}} = \ln(1 + \Delta \Psi_r^* \cdot e^{\tau_{\Pi}}), \quad (8)$$

где  $\Delta \Psi_r^* = (\Psi_r(\tau_{\Pi}) - \Psi_{r0}) / \Psi_{r0}$  – отклонение потокосцепления ротора от установившегося значения в конце паузы.

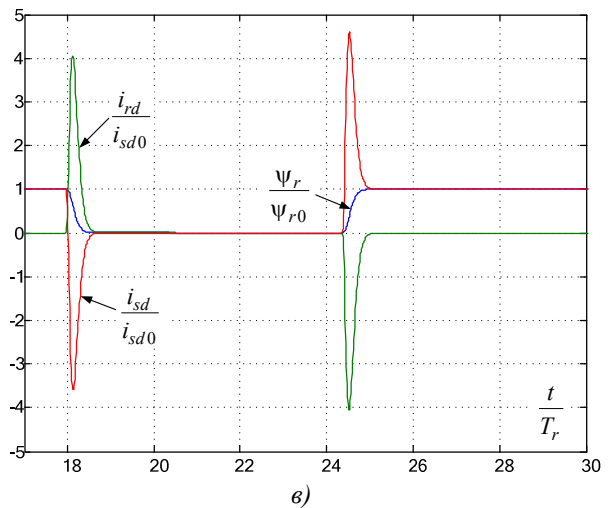
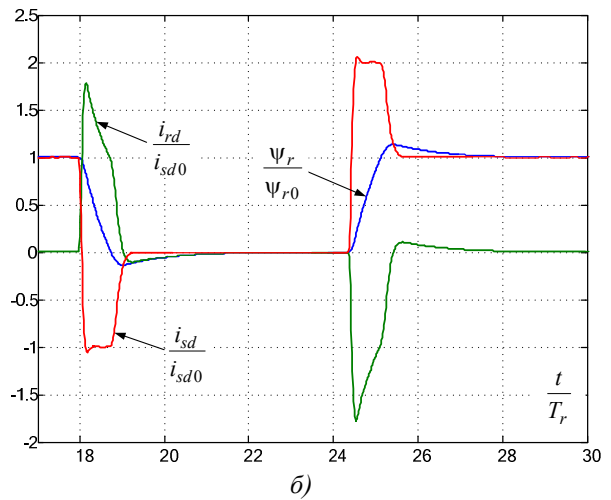
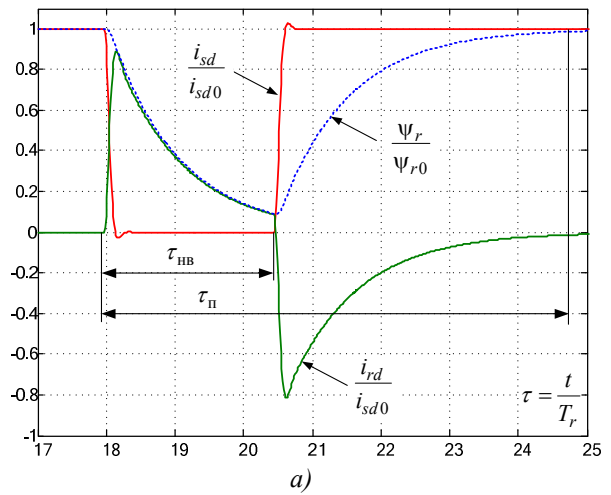


Рисунок 2 – Переходные процессы при размагничивании и намагничивании двигателя в паузе:

- а)  $d$ -составляющая тока статора ограничена на уровне  $i_{sd\max} = i_{sd0}$ ,  $i_{sd\min} = 0$ ;
- б)  $d$ -составляющая тока статора ограничена на уровне  $i_{sd\max} = 2i_{sd0}$ ,  $i_{sd\min} = -i_{sd0}$ ;
- в)  $d$ -составляющая тока статора не достигает уровня ограничения.

Сравним потери в паузе при поддержании пото-

косцепления ротора на постоянном уровне и при размагничивании машины с последующим ее намагничиванием при ограничении  $d$ -составляющей тока статора на уровне  $i_{sd\max} = i_{sd0}$ ,  $i_{sd\min} = 0$  (см. рис. 2а).

При анализе примем допущение, что при регулировании магнитного потока ток  $i_{sd}$  изменяется скачкообразно, а  $i_{rd}$  – по экспоненциальному закону, т.е.

$$i_{sd}(\tau) = \begin{cases} 0, & 0 < \tau < \tau_{\text{нв}} \\ i_{sd0}, & \tau_{\text{нв}} < \tau < \tau_{\text{п}} \end{cases} \quad (9)$$

$$i_{rd}(\tau) = \begin{cases} i_{rd\max} e^{-\tau}, & 0 < \tau < \tau_{\text{нв}}, \\ i_{rsd\max} (1 + (e^{-\tau_{\text{нв}}} - 1)e^{-\tau + \tau_{\text{нв}}}), & \tau_{\text{нв}} < \tau < \tau_{\text{п}}, \end{cases} \quad (10)$$

где

$$\tau = t/T_r, \quad (11)$$

$$i_{rd\max} = i_{sd0} k_r. \quad (12)$$

Время  $\tau_{\text{нв}}$  определяем по формуле (8), считая, что  $\Delta\psi_r^* = 0,05$  и экспонента достигает своего установившегося значения.

Подставляя (9), (10) в (6), после интегрирования получим:

$$\Delta A_{jr} = \frac{3}{2} T_r R_r i_{sd0}^2 k_r^2 \cdot \left( 1 - e^{-\tau_{\text{нв}}} - \frac{1}{2} e^{-2(\tau_{\text{нв}} + \tau_{\text{п}})} \cdot (e^{-\tau_{\text{нв}}} - 1)^2 \right),$$

$$\Delta A_{js} = \frac{3}{2} T_r R_s i_{sd0}^2 \cdot (\tau_{\text{п}} - \tau_{\text{нв}}).$$

Нормируя статические и динамические потери в паузе по величине

$$\Delta A_{\sigma} = \frac{3}{2} T_r R_s i_{sd0}^2, \quad (13)$$

получаем:

$$\Delta A_{c\psi}^* = \tau_{\text{п}} \quad (14)$$

$$\Delta A_{js}^* = \tau_{\text{п}} - \tau_{\text{нв}} \quad (15)$$

$$\Delta A_{jr}^* = \frac{R_r k_r^2}{R_s} \cdot \left( 1 - e^{-\tau_{\text{нв}}} - \frac{1}{2} e^{-2(\tau_{\text{нв}} + \tau_{\text{п}})} \cdot (e^{-\tau_{\text{нв}}} - 1)^2 \right) \quad (16)$$

$$\Delta A_{j\psi}^* = \Delta A_{js}^* + \Delta A_{jr}^*. \quad (17)$$

Графики, построенные на основании зависимостей (14) и (17), представлены на рис. 3.

Абсциссы точек пересечения графика  $\Delta A_c^*(\tau_{\text{п}})$  с графиками  $\Delta A_j^*(\tau_{\text{п}})$ , определяют минимальное время паузы  $\tau_{\text{пmin}}$ , при котором тепловые потери в обмотках при размагничивании и намагничивании АД окажутся меньше, чем эти же потери при поддержании в паузе  $\psi_r = \text{const}$ . Время  $\tau_{\text{пmin}}$  можно найти из уравнения:

$$\tau_{\text{нв}} = \frac{R_r k_r^2}{R_s} \cdot \left( 1 - e^{-\tau_{\text{нв}}} - \frac{1}{2} e^{-2(\tau_{\text{нв}} + \tau_{\text{пmin}})} \cdot (e^{-\tau_{\text{нв}}} - 1)^2 \right), \quad (18)$$

в котором

$$\tau_{\text{нв}} = \tau_{\text{нв}}(\tau_{\text{пmin}}) = \ln(1 + \Delta\psi_r^*(\tau_{\text{пmin}}) \cdot e^{\tau_{\text{пmin}}}).$$

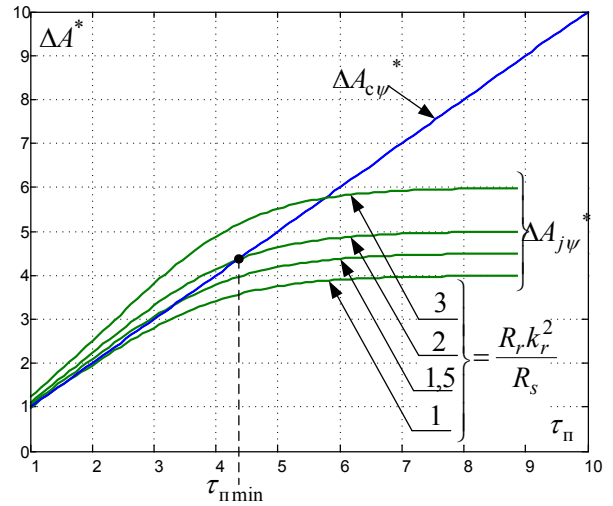


Рисунок 3 – Графики зависимостей статических и динамических потерь в обмотках АД от времени паузы

Уравнение (18) не имеет аналитического решения. Зависимость  $\tau_{\text{пmin}} = f(R_r k_r^2 / R_s)$ , построенная по результатам численного решения (18), показана на рис. 4. Эту зависимость с достаточной точностью можно аппроксимировать степенным полиномом пятого порядка:

$$\tau_{\text{пmin}} = 0.926 k_{rs}^5 - 10.334 k_{rs}^4 + 45.625 k_{rs}^3 - 99.94 k_{rs}^2 + 110.6 k_{rs} - 46.37, \quad (19)$$

где  $k_{rs} = \frac{R_r k_r^2}{R_s}$ .

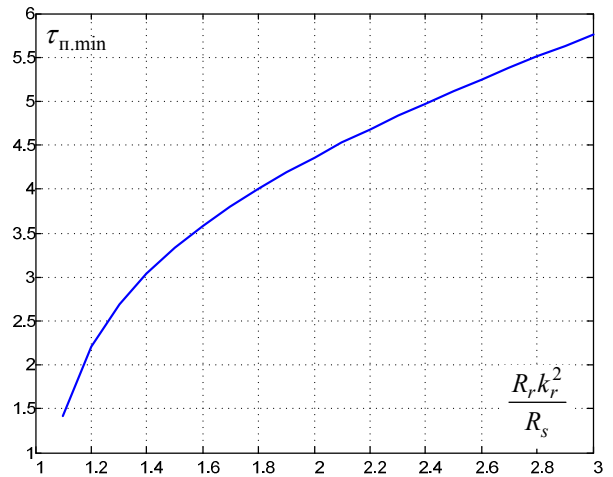


Рисунок 4 – График зависимости времени паузы  $\tau_{\text{пmin}}$ , при котором  $\Delta A_c^*(\tau_{\text{пmin}}) = \Delta A_j^*(\tau_{\text{пmin}})$ ,

от отношения  $\frac{R_r k_r^2}{R_s}$

Следует отметить, что, ввиду экспоненциального закона изменения потокосцепления, при  $\tau_{\text{п}} > 8T_r$  в графиках переходных процессов, представленных на рис. 2а, появляется участок с нулевыми значениями токов  $i_{sd}$  и  $i_{rd}$ . Поэтому при дальнейшем увеличении времени паузы динамические потери

$\Delta A_{j\psi}$  більше не збільшуються, т.е. досягають свого установившого значення, в той час як потери  $\Delta A_{с\psi}$  продовжують лінійно зростати (см. графіки на рис. 3).

Следователно, ефективність управління контуром потякозчеплення в паузах тем вище, чем більше отношение  $\tau_{п}/\tau_{п\min}$  и  $R_s/(R_r k_r^2)$ .

При известных значениях указанных параметров с помощью выражений (14)-(17), (19) и зависимостей рис. 3, 4 можно оценить целесообразность и эффективность применения мер по управлению потякозчеплением ротора в паузах с целью снижения непроизводительных потерь энергии. Кроме того, на основании полученных формул и графиков легко разработать алгоритм управления каналом намагничивания в паузах повторно-кратковременного режима.

**Выводы.** При работе систем асинхронного электропривода с векторным полеориентированным управлением в повторно-кратковременном режиме можно уменьшить тепловые потери путем снятия задания на потякозчепление ротора в периодах пауз с последующим его восстановлением. Целесообразность и эффективность такого мероприятия зависят как от продолжительности паузы, так и от соотношения активных сопротивлений статорной и ротор-

ной цепи АД. Полученные формулы и графики можно использовать для разработки алгоритма управления каналом намагничивания и оценки его эффективности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Толочко О.И. Оптимизация энергопотребления позиционного электропривода с векторным управлением асинхронным двигателем / О.И. Толочко, П.И. Розкаряка, Г.С. Чекавский // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: "Електротехніка і енергетика". – Вип. 11 (186). – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2011. – С. 396-400.

2. Волков А.В. Потери мощности в системе «автономный инвертор напряжения с широтно-импульсной модуляцией – асинхронный двигатель» / А. В. Волков, Ю. С. Скалько // Электромашиностроение та електрообладнання. Тематичний випуск "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. – К.: Техніка, 2006. – С.309-310.

Стаття надійшла 30.06.2011 р.  
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.  
Чорним О.П.

## КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСАМИ НАМАГНІЧУВАННЯ І РОЗМАГНІЧУВАННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА В СИСТЕМАХ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ

*О. І. Толочко, д.т.н., проф., зав. каф., П. І. Розкаряка к.т.н., Г. С. Чекавський, к.т.н., доц. Донецький національний технічний університет  
вул. Артема, 58, 83001, м. Донецьк, Україна*

*А. К. Кузьель, зав. від.  
Донецький політехнічний технікум  
вул. Челюскінців, 159, 83001, м. Донецьк, Україна  
E-mail: pavel\_rozkar@mail.ru*

Виконано аналіз теплових втрат у паузах при повторно-короткочасному режимі роботи асинхронного двигуна з векторним керуванням. Виведені формули та отримані графіки, що дозволяють прийняти правильне з точки зору зниження теплових втрат в обмотках, рішення о доцільності керування потякозчепленням ротора в паузах або підтримки його на постійному рівні.

**Ключові слова:** асинхронний двигун, векторне полеорієнтоване керування, керування потякозчепленням ротора, зниження енергії втрат.

## CONTROL OF MAGNETISATION AND DEMAGNETISATION IN INDUCTION MOTOR VECTOR CONTROL SYSTEMS

*O. Tolochko, D.Sc. (Eng.), Prof., P. Rozkaryaka, Cand.Sc. (Eng.), G. Chekavskyy, Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof. Donetsk National Technical University  
Artema, 58, 83001, Donetsk, Ukraine*

*A. Kugel  
Donetsk Polytechnic College  
Cheluskinchev, 159, 83001, Donetsk, Ukraine  
E-mail: pavel\_rozkar@mail.ru*

Analysis of heat losses in pauses at short-time mode of field-oriented controlled asynchronous motor has been carried out. Expressions and graphics have been examined, they let make a right decision about appropriateness of rotor flux control or its holding at a constant nominal level in pauses, depends on necessity of decreasing of heat losses in motor's windings.

**Keywords:** asynchronous motor, vector field-oriented control, flux control, energy losses decreasing.