

УДК 62.83.52

О.И. Толочко, д-р техн. наук,
П.И. Розкаряка, **Г.С. Чекавский**, кандидаты техн. наук,
В.Н. Трандафилов

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ПОЗИЦИОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПРИ УЧЕТЕ ЭНЕРГИИ ПОТЕРЬ ОТ ПОДДЕРЖАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДВИГАТЕЛЯ

Аннотация. Рассматриваются системы позиционного электропривода на базе двигателя постоянного тока с независимым возбуждением и короткозамкнутого асинхронного двигателя, управляемого с ориентацией по потокоцеплению ротора. Определены времена отработки заданного перемещения из условия минимизации энергопотребления с учетом тепловых потерь, расходуемых на поддержание магнитного поля двигателя на заданном уровне, для наиболее распространенных законов управления процессом перемещения.

О. I Толочко., доктор технічних наук, професор
П. I.Розкаряка , **Г.С.Чекавський** ,кандидати технічних наук
В. М.Трандафілов

ОПТИМІЗАЦІЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ПОЗИЦІЙНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ПРИ ОБЛІКУ ЕНЕРГІЇ ВТРАТ ВІД ПІДТРИМАННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ДВИГУНА

Аннотация. Розглядаються системи позиційного електропривода на базі двигуна постійного струму з незалежним збудженням і короткозамкнутого асинхронного двигуна, керованого з орієнтацією за потокоцепленням ротора. Визначено тривалості відпрацювання заданого переміщення за умови мінімізації енергоспоживання з урахуванням втрат, пов'язаних із підтриманням магнітного поля двигуна на заданому рівні, для найбільш поширених законів керування процесом переміщення.

О.І Tolochko, D.E. Professor

G.S.Chekavskij, PhD

P. I Rozkaryaka, PhD

V. N.Trandafilov

ENERGY OPTIMIZATION POSITIONAL ELECTRIC ENERGY TAKING INTO ACCOUNT THE LOSSES FROM MAINTAINING MAGNETIC FIELD MOTOR

Abstract. In the paper positional electric drive systems on base of DC motor with independent excitation and induction motor, controlled by FOC-system, have been considered. Times of programming motion working-off have been found for the most popular position control algorithms from condition of power consumption minimization with considering of heat losses provided by motor magnetic flux holding on the reference level.

Введение. Задачи снижения энергопотребления средствами электропривода (ЭП) в последнее время приобрели большую актуальность при общей тенденции роста стоимости электроэнергии. В позиционных ЭП увеличение времени отработки перемещения приводит к уменьшению тепловых потерь от динамической составляющей моментобразующего тока [5,6] и к увеличению потерь от его статической составляющей при условии, что двигатель нагружен в течение всего времени отработки.

Поэтому существует некоторое оптимальное время отработки перемещения t_{0opt} , при котором сумма статических и динамических потерь будет минимально при принятом законе управления и существующих ограничениях на координаты привода (например, на скорость и ускорение).

При определении этого времени мощность статических потерь обычно считают постоянной, что справедливо при постоянстве статического момента. В большинстве случаев в позиционных системах ЭП не управляют магнитным полем двигателя, поддерживая значение его потока (потокоцепления) на заданном уровне, на что также расходуется опреде-

ленное количество энергии, однако при оптимизации

энергопотребления за счет выбора t_{0opt} этими потерями часто пренебрегают. В позиционных ЭП на основе двигателя постоянного тока (ДПТ) с независимым возбуждением такое пренебрежение не приводит к существенной погрешности в определении t_{0opt} ввиду малости величины тока возбуждения по сравнению с током якоря. Но для позиционных ЭП на основе короткозамкнутого асинхронного двигателя, (АД), управляемого с ориентацией по полю ротора, такое допущение неприемлемо ввиду соизмеримости величин потоко- и моментобразующей составляющих обобщенного вектора тока статора.

Цель работы – определение оптимального по тепловым потерям времени отработки заданного перемещения позиционными ЭП с учетом потерь на поддержание магнитного поля двигателя.

Материал и результаты исследований. В качестве исследуемых позиционных ЭП выберем системы подчиненного управления положением на базе ДПТ с независимым возбуждением и АД с векторным полеориентированным управлением (FOC). Такой выбор обусловлен широким применением этих систем и общностью их математического описания.

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

При анализе тепловых потерь в исследуемых системах примем следующие допущения:

1) форма напряжений, подводимых к обмоткам приводного двигателя, идеальна применительно к питанию рассматриваемого типа двигателя (обмотки ДПТ питаются постоянным напряжением, трехфазная обмотка статора АД – синусоидальным напряжением; коммутационные составляющие и высшие гармоники отсутствуют);

2) параметры обмоток двигателя постоянные и сосредоточенные;

3) насыщение магнитной цепи и вихревые токи отсутствуют;

4) потери на перемагничивание в АД пренебрежимо малы по сравнению с греющими потерями в обмотках двигателя, размагничивающее влияние реакции якоря ДПТ отсутствует;

5) момент статического сопротивления остается неизменным на всем периоде отработки перемещения $M_c(t) = M_c = \text{const}$;

6) магнитный поток двигателя в процессе перемещения поддерживается неизменным;

7) инерционностью системы управления можно пренебречь, т.е. управляющие воздействия, сформированные задающими устройствами, воспроизводятся идеально точно;

8) при формировании желаемых диаграмм отработки перемещений учитываются ограничения на скорость и ускорение.

Графики сигналов задания на ускорение $\varepsilon(t)$, скорость $\omega(t)$ и положение $\varphi(t)$ при отработке заданного перемещения φ_0 за время t_0 , обеспечивающие минимизацию динамических тепловых потерь ΔA_j при наличии ограничений на ускорение ε_0 и скорость ω_0 , представлены на рис. 1.

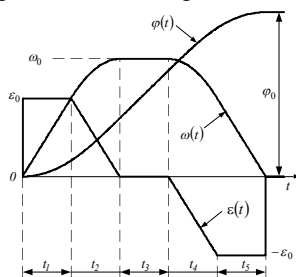


Рис. 1. Обобщенная диаграмма отработки заданного перемещения

Характерной особенностью этих графиков является равенство ограничений на ускорение при разгоне и торможении с одновременным выполнением условий $t_1 = t_5$ и $t_2 = t_4$. В дальнейшем такие диаграммы будем называть симметричными. В общем случае, при некоторых сочетаниях параметров ε_0 , ω_0 , φ_0 и t_0 , скорость и (или) ускорение могут не достигать своих уровней ограничения. При этом возможны частные случаи диаграмм.

Так, при $\varepsilon(t) < \varepsilon_0$ и $\omega(t) < \omega_0$ тахограмма будет иметь параболическую форму, а участки t_1 , t_3 и t_5 будут отсутствовать; при достижении $\omega(t)$ уровня ω_0 в диаграммах появится участок t_3 , а при достижении

$\varepsilon(t)$ уровня ε_0 – участки t_1 и t_5 . Кроме того, при отсутствии участков t_2 и t_4 тахограмма будет иметь трапециевидальную форму, а при отсутствии участков t_2 , t_3 и t_4 – треугольную. Оба последних варианта обеспечивают управление, оптимальное по быстродействию. Таким образом, диаграмма рис. 1 является обобщенной, так как варьированием в ней количества указанных выше временных диапазонов можно получить 6 различных вариантов симметричных диаграмм, наиболее часто используемых для управления позиционными механизмами.

Для получения общих формул, позволяющих рассчитать тепловые потери в обеих рассматриваемых системах, введем обобщенные параметры, обозначения которых представлены в табл. 1 (столбец 1), которым соответствуют реальные параметры ДПТ и АД (столбцы 2 и 3 соответственно). Параметры ДПТ имеют следующие обозначения: R_a , R_g – активные сопротивления обмоток якоря и возбуждения соответственно; k – конструктивная постоянная двигателя; Φ_0 – магнитный поток; L_g – индуктивность обмотки возбуждения; i_a , $i_{в0}$ – токи якоря и возбуждения. Параметры АД: R_s , R_r – активные сопротивления фаз статора и ротора; L_m – взаимная индуктивность; L_r – полная индуктивность ротора; $k_r = L_m / L_r$ – коэффициент электромагнитной связи ротора; z_p – число пар полюсов; Ψ_{r0} – модуль обобщенного вектора потокосцепления ротора; i_{sq} , i_{sd0} – моментобразующая и потокообразующая составляющие тока статора. Индексом «0» помечены поддерживаемые неизменными координаты, характеризующие состояние магнитного поля.

Суммарные потери энергии ΔA_Σ в рассматриваемых системах с учетом принятых допущений и принятых обозначений можно представить в виде суммы

$$\Delta A_\Sigma = \Delta A_a + \Delta A_f = R_a \int_0^{t_0} i_a^2(t) dt + R_f i_f^2 t_0. \quad (1)$$

Ток $i_a(t)$ можно представить в виде суммы статической и динамической компонент, первая из которых зависит от величины момента сопротивления M_c , а вторая – от произведения момента инерции J привода на угловое ускорение $\varepsilon(t)$:

1. Параметры ДПТ и АД, используемые при анализе тепловых потерь

Обозначение	Соответствующие параметры	
	ДПТ	АД
1	2	3
R_a	R_a	$\frac{3}{2}(R_s + k_r^2 R_r)$
R_f	R_g	$\frac{3}{2} R_r$

c	$k\Phi_0$	$\frac{3}{2}z_p k_r \Psi_{r0}$
i_f	$i_{B0} = \frac{\Phi_0}{L_B}$	$i_{sd0} = \frac{\Psi_{r0}}{L_m}$
i_a	$i_{я}$	i_{sq}

$$i_a(t) = i_{ac} + i_{aj}(t) = \frac{M_c}{c} + \frac{J}{c} \varepsilon(t). \quad (2)$$

Тогда энергия потерь (2) от тока $i_a(t)$ также может быть представлена

$$\begin{aligned} \Delta A_a &= \Delta A_{ac} + \Delta A_{aj} = R_a \int_0^{t_0} (i_{ac}^2 + i_{aj}^2(t) + 2i_{ac}i_{aj}(t)) dt = \\ &= R_a \frac{M_c^2}{c^2} t_0 + R_a \frac{J^2}{c^2} \int_0^{t_0} \varepsilon^2(t) dt + 2R_a \frac{M_c J}{c^2} \int_0^{t_0} \varepsilon(t) dt. \end{aligned}$$

Из рис. 1 видно, что при всех рассматриваемых законах изменения ускорения $\varepsilon(t)$ будет справедливым равенство $\int_0^{t_0} \varepsilon(t) dt = 0$. С учетом этого выражение

(1) для суммарных потерь энергии

$$\begin{aligned} \Delta A_{\Sigma} &= \Delta A_{ac} + \Delta A_f + \Delta A_{aj} = \\ &= R_a \frac{M_c^2}{c^2} t_0 + R_f i_f^2 t_0 + R_a \frac{J^2}{c^2} \int_0^{t_0} \varepsilon^2(t) dt. \quad (3) \end{aligned}$$

В последней формуле первые два слагаемых определяют статические потери ΔA_{ac} , мощность которых постоянна, а энергия возрастает пропорционально времени работы привода. Третье слагаемое определяет динамические потери ΔA_{aj} , мощность и энергия которых зависят от формы и параметров диаграммы ускорения $\varepsilon(t)$.

В [1] получено общее выражение для динамических потерь в позиционном ЭП на базе ДПТ, обрабатывающем диаграмму рис. 1, которое с учетом обо-

2. Формулы для вычисления энергии динамических тепловых потерь ΔA_{aj} при перемещении и оптимального времени его обработки без учета и с учетом потерь на поддержание магнитного поля двигателя

Тип тахограммы	ΔA_{aj}	t_{0onm} с учетом потерь $\Delta A_f (i_f \neq 0)$	t_{0onm} без учета потерь $\Delta A_f (i_f = 0)$
1	2	3	4
Треугольная	$16R_a \frac{J^2}{c^2} \cdot \frac{\Phi_0^2}{t_0^3}$	$\sqrt[4]{\frac{48R_a J^2 \Phi_0^2}{R_a M_c^2 + R_f c^2 i_f^2}}$	$\sqrt[4]{\frac{48J^2 \Phi_0^2}{M_c^2}}$
Трапецидальная	$\frac{27}{2} R_a \frac{J^2}{c^2} \cdot \frac{\Phi_0^2}{t_0^3}$	$\sqrt[4]{\frac{81R_a J^2 \Phi_0^2 / 2}{R_a M_c^2 + R_f c^2 i_f^2}}$	$\sqrt[4]{\frac{81J^2 \Phi_0^2}{2M_c^2}}$
Парабол. без ограничений	$12R_a \frac{J^2}{c^2} \cdot \frac{\Phi_0^2}{t_0^3}$	$\sqrt[4]{\frac{36R_a J^2 \Phi_0^2}{R_a M_c^2 + R_f c^2 i_f^2}}$	$\sqrt[4]{\frac{36J^2 \Phi_0^2}{M_c^2}}$
Парабол. с ограничением ускорения ε	$R_a \frac{J^2 \varepsilon_0^2}{c^2} \left(t_0 - \frac{2}{3} \sqrt{3t_0^2 - 12 \frac{\Phi_0}{\varepsilon_0}} \right)$	$\frac{2 \left[R_a (M_c^2 + J^2 \varepsilon_0^2) + R_f c^2 i_f^2 \right] \sqrt{\frac{\Phi_0}{\varepsilon_0}}}{\sqrt{\left[R_a (M_c^2 + J^2 \varepsilon_0^2) + R_f c^2 i_f^2 \right]^2 - \frac{4}{3} R_a^2 J^4 \varepsilon_0^4}}$	$\frac{2 (M_c^2 + J^2 \varepsilon_0^2) \sqrt{\frac{\Phi_0}{\varepsilon_0}}}{\sqrt{\left(M_c^2 + J^2 \varepsilon_0^2 \right)^2 - \frac{4}{3} J^4 \varepsilon_0^4}}$

значений, принятых в настоящей статье, может быть представлено

$$\Delta A_{aj} = 2 \frac{R_a J^2}{c^2} \left(\varepsilon_0^2 t_1 + \frac{1}{3} \varepsilon_0^2 t_2 \right).$$

Кроме того, получены формулы динамических потерь для каждого из 6 частных случаев рассматриваемой диаграммы, в которых времена t_1 и t_2 выражены через параметры ε_0 , ω_0 , Φ_0 и t_0 , а также оптимальные с точки зрения энергопотребления времена обработки перемещений t_{0onm} без учета потерь в обмотке возбуждения ДПТ для каждой из диаграмм [1] для удобства представлены в табл.2 (столбцы 2, 4).

При учете потерь на поддержание магнитного потока приводного двигателя на заданном уровне исследованию на минимум подлежит функция (3), имеющая дополнительную составляющую $\Delta A_f = R_f i_f^2 t_0$. Энергия динамических потерь определяется используемой в каждом конкретном случае диаграммой обработки заданного перемещения табл.2 (столбец 2). Расчетные формулы, полученные в результате решения уравнений $d\Delta A_{\Sigma}(t_0)/dt_0 = 0$ относительно t_0 , приведены в табл. 2 (столбец 3). Они позволяют на основании параметров R_a , R_f , c , J , тока возбуждения i_f , момента статического сопротивления M_c с учетом имеющихся ограничений ε_0 , ω_0 определить время t_{0onm} , необходимое для расчета параметров диаграммы рис.1 и ее частных случаев из условия минимизации суммарных тепловых потерь электроэнергии.

Парабол. с огран. скорости ω	$\frac{16}{9} R_a \frac{J^2}{c^2} \cdot \frac{\omega_0^3}{\omega_0 t_0 - \varphi_0}$	$\frac{\varphi_0}{\omega_0} + \frac{4}{3} \sqrt{\frac{R_a J^2 \omega_0^2}{R_a M_c^2 + R_f c^2 i_f^2}}$	$\frac{\varphi_0}{\omega_0} + \frac{4}{3} \cdot \frac{J \omega_0}{M_c}$
Парабол. с огран. ω и ε	$2 R_a \frac{J^2 \varepsilon_0 \omega_0}{c^2} \left[1 - \sqrt{\frac{\varepsilon_0 t_0 - \varphi_0 \varepsilon_0 - \frac{1}{3}}{3 \omega_0 - 3 \omega_0^2}} \right]$	$\frac{\varphi_0}{\omega_0} + \frac{\omega_0}{\varepsilon_0} + \frac{1}{3} \cdot \frac{R_a^2 J^4 \varepsilon_0^3 \omega_0}{(R_a M_c^2 + R_f c^2 i_f^2)^2}$	$\frac{\varphi_0}{\omega_0} + \frac{\omega_0}{\varepsilon_0} + \frac{1}{3} \cdot \frac{J^4 \varepsilon_0^3 \omega_0}{M_c^4}$

Количественную оценку необходимости учета потерь, имеющих место при поддержании магнитного потока двигателя на заданном уровне, целесообразно выполнять в каждом конкретном случае при известных значениях параметров R_f , c и i_f ; это может быть направлением для дальнейших исследований.

Следует также отметить, что при достаточно большой длительности пауз между режимами отработки очередных заданных перемещений, определенный интерес, как показано в [3, 4], представляет учет не только потерь от поддержания магнитного поля двигателя на заданном уровне, но и потерь на размагничивание и намагничивание двигателя в паузах.

Выводы

1. Получены выражения, позволяющие при известных значениях параметров позиционного ЭП на основе ДПТ или АД и параметров режима работы приводного двигателя определить оптимальное с точки зрения минимизации энергопотребления двигателем время отработки заданного перемещения с учетом тепловых потерь, имеющих место при поддержании магнитного поля двигателя.

2. Направлениями дальнейших исследований могут быть, во-первых, количественная оценка эффективности учета потерь, имеющих место при поддержании характеристик магнитного поля на заданном уровне, и ее зависимость от параметров, определяющих величину тепловых потерь, для разных законов движения; во-вторых, учет потерь, имеющих место при размагничивании и намагничивании двигателя в паузах повторно-кратковременного режима, при разработке алгоритмов управления позиционными ЭП из условия минимизации общих тепловых потерь.

Список использованной литературы

1. Толочко О.И. Расчет энергопотребления позиционного электропривода, реализующего оптимальное по тепловым потерям управление / О.И. Толочко, П.И. Розкаряка // 36. Наук. праць ДонНТУ. Серія «Ел.техніка і енергетика». – Вип. 7 (128). – Донецьк: ДонНТУ. – 2007. – С.31-34.
2. Толочко О.И. Формирование оптимальных по нагреву диаграмм управления позиционным приводом с учетом ограничений на скорость и ускорение / О.И. Толочко, П.И. Розкаряка // 36. Наук. праць ДонНТУ. Серія: «Ел.техніка і енергетика». – Вип. 41. – Донецьк: ДонНТУ. – 2002. – С. 159-163.
3. Толочко О.И. Оптимизация энергопотребления позиционного электропривода с векторным управлением асинхронным двигателем / О.И. Толочко, П.И. Розкаряка, Г.С. Чекавский // Наук.праць ДонНТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика». – Вип. 11 (186). – Донецьк: ДонНТУ – 2011. – С.396-400.
4. Управление процессами намагничивания и размагничивания асинхронного двигателя в системах векторного управления / О.И. Толочко, П.И. Розкаряка, Г.С. Чекавский, А.К. Кужель // Проблемы энергоресурсосбережения в электротехнических системах. Наука, освіта і практика. Наук. ви-

дання. – Вип.1/2011 (1). – Кременчук: КНУ. – 2011. – С. 40-41.

5. Энергосбережение и оптимизация потерь в позиционных электроприводах / Е.В. Полилов, А.Б. Зеленев, В.П. Яблонь, Д.И. Морозов // *Электромашинобуд. та електрообладн. Тематич. вип. «Проблеми автоматизованого ел.привода. Теорія і практика».* – К.: Техніка. – 2006. – С.315-319.

6. Энергосбережение и оптимизация потерь в позиционных электроприводах. Ч.2. / А.Б. Зеленев, Е.В. Полилов, В.П. Яблонь, Д.И. Морозов // *Вест. КГПУ им. М.Остроградского.* – Вип. 3/2007 (44). – Кременчук: КГПУ. – 2007. – С.82-87.

Получено 12.07.2011



Толочко Ольга Ивановна,
 д-р техн. наук,
 зав. каф. ЭАПУ ДонНТУ,
 83001, г. Донецк,
 ул. Артема, 58,
 тел. (+38 062) 301-03-35,
 e-mail: toi@elf.dgtu.donetsk.ua



Розкаряка Павел Иванович, канд.
 техн. наук,
 доц. каф. ЭАПУ ДонНТУ,
 83001, г. Донецк,
 ул. Артема, 58,
 тел. (+38 062) 301-09-78,
 e-mail: pavel_rozkar@mail.ru



Чекавский
 Глеб Станиславович, канд. техн.
 наук,
 доц. каф. ЭАПУ ДонНТУ, 83001,
 г. Донецк,
 ул. Артема, 58,
 тел. (+38 062) 301-03-05,
 e-mail: gleb@elf.dgtu.donetsk.ua



Трандафилов
 Владимир Николаевич,
 ассистент каф. ЭАПУ
 ДонНТУ,
 83001, г. Донецк,
 ул. Артема, 58,
 тел. (+38 062) 301-03-05,
 e-mail: trandafilov_vn@mail.ru