

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С СИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Введение. Большое распространение в современной промышленности, на транспорте и в других областях получают синхронные электродвигатели с постоянными магнитами (СДПМ). По своим регулировочным характеристикам, массогабаритным показателям и энергопотреблению они имеют определённые преимущества по сравнению с другими типами существующих электродвигателей. Разработка и эксплуатация электроприводов с СДПМ осложняется наличием неопределённостей в таком электроприводе [2], и внешних воздействиях на него [3, 4]. Актуальной остаётся проблема энергосбережения, особенно в случаях использования электропривода в устройствах с автономными источниками питания и мобильных установках, как, например, в электротранспорте и электромобилях [1].

Цель работы. Синтез и анализ методов энергосберегающего робастного управления применительно к электроприводу с явнополусным СДПМ.

Постановка задачи. Электропривод с СДПМ описывается следующей системой уравнений, записанных в синхронном базисе (d, q), связанном с вектором потокосцепления магнита [5, 6]

$$I \dot{\omega} = m + m_l, \quad (1)$$

$$m = 1,5 Z_p [\psi_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q], \quad (2)$$

$$u_d = L_d p i_d + R_s i_d - L_q i_d \omega_e, \quad (3)$$

$$u_q = L_q p i_q + R_s i_q + L_d i_d \omega_e + \omega_e \psi_m, \quad (4)$$

где I – момент инерции ротора двигателя, ω – угловая скорость ротора, m – электромагнитный момент двигателя, m_l – неизвестный момент нагрузки, Z_p – число пар полюсов, ψ_m – магнитный поток, создаваемый постоянным магнитом, ω_e – электрическая угловая скорость ротора, L_d , L_q – индуктивности, i_d , i_q – составляющие токов статора, идущие на создание электромагнитного момента, u_d , u_q – напряжения, R_s – активное сопротивление меди статора.

1. Формирование робастного электромагнитного момента рассмотрено ранее в работах [3, 6, 7].

Примем I_0 , m_0 – номинальные известные значения; I_δ , m_δ – отклонения от номинальных значений. С учетом принятых обозначений уравнение (1) примет вид

$$I_0 \dot{\omega} = m_0 + f_m, \quad (5)$$

где неопределенность

$$f_m = -I_\delta \dot{\omega} + m_\delta + m_l.$$

Неопределенность вычисляется в наблюдателе неопределенности. Уравнение наблюдателя неопределенности определяется выражением

$$\hat{\dot{f}}_m = L [\hat{f}_m - (I_0 \dot{\omega} - m_0)], \quad (6)$$

где L – коэффициент усиления наблюдателя, $\hat{f}_m$ – оценка неопределенности f_m .

Для устранения необходимости использования производной скорости $\dot{\omega}$ вводим обозначение

$$\lambda = \hat{f}_m + L I_0 \omega, \quad (7)$$

откуда следует уравнение наблюдателя

$$\hat{\dot{f}}_m = \lambda - L I_0 \omega. \quad (8)$$

с учетом (7) наблюдатель (6) принимает вид

$$\dot{\lambda} = L [\lambda - L I_0 \omega + m_0]. \quad (9)$$

Преобразование позволяет вместо уравнения наблюдателя использующего $\dot{\omega}$, используется наблюдатель (8), (9), содержащий ω .

Комбинированный закон управления электромагнитным моментом задается в виде

$$m_0 = m_{00} - \hat{f}_m, \quad (10)$$

где

$$m_{00} = -k_1 (\omega - \omega_p), \quad (11)$$

k_1 – коэффициент закона управления.

2. Регуляторы контуров тока. В приводе используются два робастных регулятора токов i_d и i_q , аналогичных регуляторам, рассмотренным в работах [6, 7]. Каждый из регуляторов тока включает в себя собственно регулятор и компенсатор с наблюдателем неопределенности. Датчики тока измеряют полный ток, состоящий из моментного тока и тока, соответствующего потерям в стали. В регуляторах токи потерь в стали, погрешности и изменения, связанные с отклонением от номинальных параметров и влиянием перекрёст-

ных связей, включены в неопределённости, которые оцениваться и компенсируются. В результате на выходе регуляторов тока формируются напряжения в базисе (d, q) , которые после преобразования в трёхфазный базис ABC, используются в качестве управляющих сигналов для инвертора.

Исходная система при этом представлена с номинальными значениями параметров, на которую действует вектор неопределённости $\hat{f}_i$.

Закон управления регулятора каждого из регуляторов тока имеет вид

$$u_p = k_0^{-1} [v(i_p - \hat{i}) - \hat{f}_i], \quad (12)$$

где v – постоянный коэффициент.

Для каждого контура тока синтезирован наблюдатель

$$p\hat{i} = -(T_{s0}')^{-1}\hat{i} + k_0 u_p + \hat{f}_i + l_1(\hat{i} - i), \quad (13)$$

$$p\hat{f}_i = l_2(\hat{i} - i), \quad (14)$$

где l_1, l_2 – постоянные коэффициенты наблюдателя неопределённости.

3. Минимизация потерь в электроприводе. Электрические потери в электроприводе включают потери в меди и стали [7, 8, 9, 10]

$$\Delta P = 1,5 R_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + 1,5 R_c (i_{dc}^2 + i_{qc}^2), \quad (15)$$

где R_c – сопротивление, характеризующее потери в стали, i_{ds}, i_{qs} – полные токи статора, i_{dc}, i_{qc} – части составляющих токов статора, соответствующие потерям в стали, по осям d и q , при этом

$$i_{ds} = i_{dc} + i_d, \quad i_{qs} = i_{qc} + i_q. \quad (16)$$

Сложность оптимизации по выражению (15) заключается в зависимости потерь мощности от переменных i_d, i_q и ω . Оптимальная зависимость соотношения токов i_d, i_q носит сложный характер

В данной работе для упрощения задачи оптимизации, на основании выражения (2) вводится новая переменная k так, чтобы можно было записать [7]

$$i_d = \frac{k - \psi_m}{L_d - L_q}, \quad i_q = \frac{m}{1,5 Z_p k}. \quad (17)$$

Нелинейность магнитной системы в таком случае может быть учтена с помощью значений индуктивностей L_d, L_q , например [1, 12] (рис.1) с учётом того, что токи i_d, i_q связаны со значением тока статора i_s .

$$L_d = \frac{\psi_m - \psi_0 \cos \alpha}{i_d}, \quad L_q = \frac{\psi_0 \sin \alpha}{i_q}. \quad (18)$$

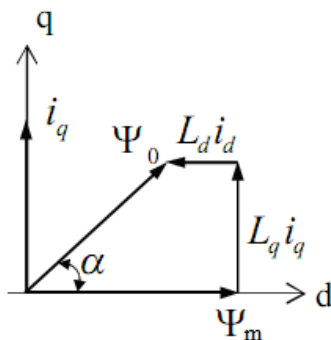


Рис.1. – Векторная диаграмма СДПМ

Для минимизации потерь в выражение (15) подставляются зависимости (17) и значения потерь в меди и стали [7]. Значение k , при котором потери мощности в электроприводе будут минимальными, определяется из уравнения

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial k} = 0.$$

Найденное значение k с помощью выражений (17) позволяет определить значения программных токов i_{dp} и i_{qp} , соответствующих минимуму потерь.

На рис. 2 показана зависимость оптимального значения параметра k от угловой скорости ротора, рассчитанная по данным электродвигателя [7].

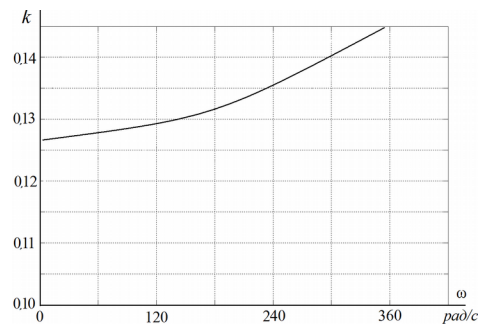


Рис.2. – Зависимость изменения параметра k от угловой скорости электропривода с СДПМ

Максимальное программное значение момента двигателя ограничивается максимально допустимым током статора

$$i_{s_max} \geq \sqrt{i_{ds}^2 + i_{qs}^2} . \quad (19)$$

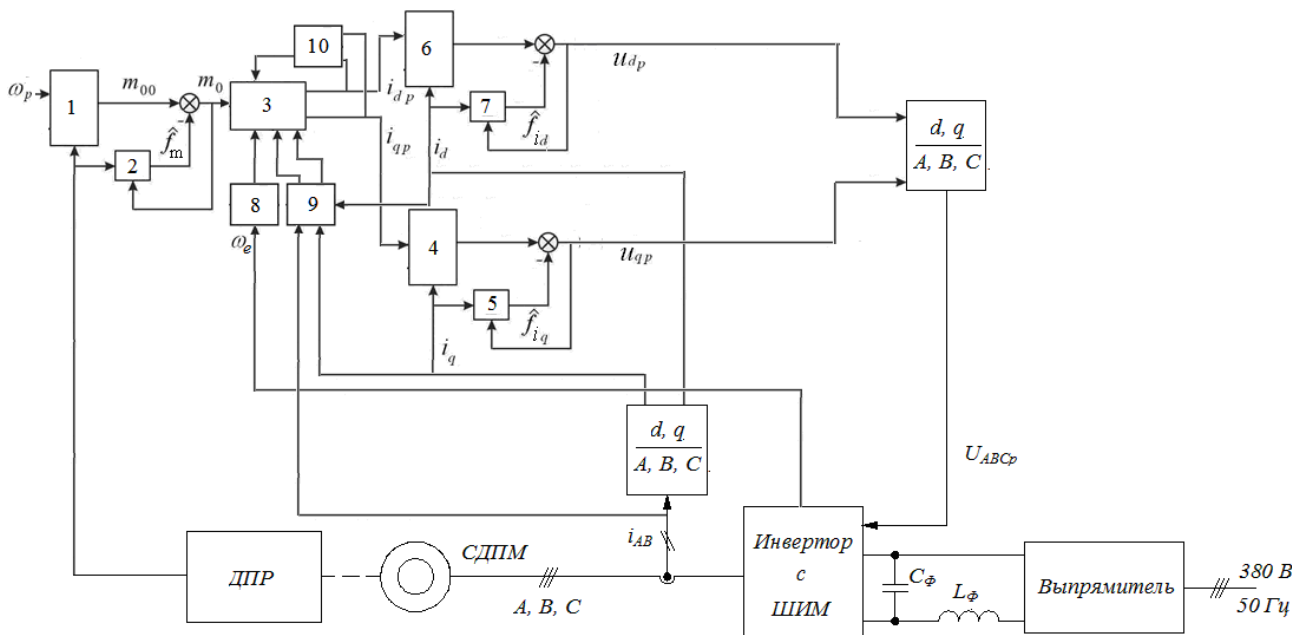


Рис.3. – Функциональная схема системы управления электроприводом.

4. Схема системы управления электроприводом показана на рис. 3. Формирователь момента 1, обеспечивающий робастное комбинированное управление с наблюдателем неопределённости 2, выполнен по уравнениям (5)–(11). Блок оптимизации 3 обеспечивает расчёт оптимальных программных токов i_{dp} и i_{qp} по уравнениям (17). Блок 9 определяет значения индуктивностей L_d , L_q , блок 8- текущее значение параметра k [7]. Регуляторы токов и компенсаторы неопределённости контуров токов i_d , i_q 6, 7 и 4, 5 соответственно построены по уравнениям (12)- (14) и уравнениям (19)–(21), приведенным в [7]. Регуляторы тока формируют программные напряжения в осях d, q, которые после преобразования в трехфазную форму подаются на инвертор в качестве управляющих сигналов. Блок 10 ограничивает максимально возможное значение программного момента из условия ограничения максимально допустимого тока статора с учётом выражения (19).

Проведенное моделирование [11] подтвердило робастность разработанной системы.

Выводы. 1. Предложенный метод формирования статорных токов по критерию минимума потребляемой мощности обеспечивает формирование заданного электромагнитного момента и минимизацию энергопотребления в реальном времени и учитывает нелинейность магнитной цепи. 2. Простота расчёта оптимального значения токов i_d, i_q достигается за счёт введения дополнительного коэффициента k. 3. Робастность и простота управления электроприводом обеспечиваются за счёт применения робастных регуляторов электромагнитного момента и статорных токов.

- Список литературы:** 1. Jae-Woo Jung, Jeong-Jong Lee, Soon-O Kwon, Jung-Pyo Hong, Ki-Nam Kim. Equivalent circuit analysis of interior permanent magnet synchronous motor considering magnetic saturation. World Electric Vehicle Journal Vol.3. (2009), EVS24, Stavanger, Norway, May13-16, 2009. 2. Толочко О.И. Особенности векторного управления синхронными двигателями с постоянными магнитами при учёте потерь в стали [Текст]/ О.И. Толочко, В.В. Божко // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика»*. – Кременчук: КрНУ, 2012.-Вип.3/2012(19) – с. 58–59. 3. Holtz J. Special section on sensorless control of synchronous machine drives/ Industrial electronics, IEEE TRANSACTIONS, 2006, Vol.2, p.350-458. 4. Vas P. Sensorless and direct torque control. – Oxford, New York, Tokyo: Oxford University Press, 1998–728 p. 5. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока [Текст]/ А.В. Виноградов// Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина: –Иваново, 2008, 298 с. 6. Деев С.Г. Принципы формирования робастного управления синхронным электроприводом [Текст]/ С.Г. Деев, Е.М. Потапенко // Тематический выпуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика». – Киев: Техника. – 2011. – №3. – с. 58–59. 7. Деев С.Г. Робастное энергосберегающее управление синхронным электроприводом [Текст] / С.Г. Деев, Е.М. Потапенко // *Вісник національного університету «Харківський політехнічний інститут» Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика»*. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2013. – №36(1009). – с. 97–99. 8. Vaez S., John V.I., Rahman V.A. An On-line loss Minimization Controller for Interior Permanent Magnet Motor Drives. IEEE TRANSACTIONS on Energy Conversion, 1999, №4, p.1435-1440. 9. Monajemy R. Control and Dynamics of Constant Power Loss Based Operation of Permanent Magnet Motor Drive System. IECON'99. The 25th Annual conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 1999, p.1-6. 10. Деев С.Г. Энергетические и регулировочные характеристики многодвигательных электроприводов переменного тока [Текст] / С.Г. Деев, Е.М. Потапенко // *Вісник Кременчуцького державного університету*. – Кременчук: КДУ. – 2011. – Випуск 1/2011, Ч. 1. – с. 136–137. 11. Деев С.Г. Робастное управление электроприводом с синхронным двигателем с постоянными магнитами [Текст] / С.Г. Деев, Е.М. Потапенко // *Електротехнічні системи. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика»*. – Киев: Техника. – 2014. – №15 (91). – с. 75–78. 12. Щур І.З. Система керування синхронною машиною з постійними магнітами з максимальною енергетичною ефективністю при ослабленні поля. [Текст] / І.З. Щур, М.Ф. Манзюк // *Вісник національного університету «Харківський політехнічний інститут» Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика»*. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2013. – №36(1009) с. 263-266.
- Bibliography (transliterated):** 1. Jae-Woo Jung, Jeong-Jong Lee, Soon-O Kwon, Jung-Pyo Hong, Ki-Nam Kim. Equivalent circuit analysis of interior permanent magnet synchronous motor considering magnetic saturation. World Electric Vehicle Journal Vol.3. (2009), EVS24, Stavanger, Norway, May13-16, 2009. 2. Tolochko O.I. and Bozhko V.V. Osobennosti vektornogo upravleniya sinhronimi elektrodvigateliami s postoiannimi magnitami pri uchiote poter v stali [Features vector control of synchronous motors with permanent magnets in registered losses in the steel] (2012) *Electromechanichni i energosberigauchi sistemi/ Tematicheskij випуск «Pobleml avtomatisovanogo elektroprivoda. Teoriya i praktika»*, Kremenchuk, Ukraine: Vol.3 – pp. 58–59. (In Russian). 3. Holtz J. Special section on sensorless control of synchronous machine drives/ Industrial electronics, IEEE TRANSACTIONS, 2006, Vol.2, p.350-458. 4. Vas P. Sensorless and direct torque control. – Oxford, New York, Tokyo: Oxford University Press, 1998 – 728 p. 5. Vinogradov A.B. Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka [Vector Control AC Drives] (2008) Ivanovskiy gosudarstvenniy energeticheskij institute imeni V.I. Lenina, Ivanovo, Russia, 298 p. (In Russian). 6. Deev S.G. and Potapenko E.M. Principi formirovaniya robastnogo upravleniya sinhronnim elektroprivodom [Principles of formation of robust control synchronous electric drive], (2011). *Tematicheskij випуск «Pobleml avtomatisovanogo elektroprivoda. Teoriya i praktika»*. – Kiev, Ukraine: Tehnika. Vol.3 – pp. 58–59. (In Russian). 7. Deev S.G. and Potapenko E.M. Robastnoe energosberegaiutsheye upravlenie sinhronnim elektroprivodom [Robust energy-saving control synchronous electric drive], (2013). *Vesnik natchionalnogo universiteta «Harkovkiy politehnicheskij institute» Tematicheskij випуск «Pobleml avtomatisovanogo elektroprivoda. Teoriya i praktika»*. – HNU «HPI» Publ., Kharkov, Ukraine, Vol.3 – pp. 58–59. (In Russian). 8. Vaez S., John V.I., Rahman V.A. An On-line loss Minimization Controller for Interior Permanent Magnet Motor Drives. IEEE TRANSACTIONS on Energy Conversion, 1999, Vol.4, pp.1435-1440. 9. Monajemy R. Control and Dynamics of Constant Power Loss Based Operation of Permanent Magnet Motor Drive System. IECON'99. The 25th Annual conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 1999, pp.1-6. 10. Deev S.G. and Potapenko E.M. Energeticheskie i regulirovochnie kharakteristiki mnogodvigatelnih elektroprivodov peremennogo toka [Power and control characteristics multiengine AC drives] (2011) *Visnik Kremenchuckogo derzhavnogo universitetu, Kremenchuk St.Univ Publ., Kremenchuk, Ukraine, Vol.1, pp. 136–137. (In Russian).* 11. Deev S.G. and Potapenko E.M. Robastnoe upravlenie elektroprivodom s sinhronnim dvigatelem s postoyannimi magnitami. [Robust control synchronous electric drive] *Electrotechnic and computer system. Tematicheskij випуск «Pobleml avtomatisovanogo elektroprivoda. Teoriya i praktika»* – Kiev, Ukraine: Tehnika. Vol.19(91) – pp. 75–78. (In Russian). 12. Shchur I.Z., Mandzuk M.F. Sistema keruvannia sinhronnoiu mashinoiu z postiynimi magnitami z maksimalnoiu energetichnoiu effektivnistu pri oslableni polia [The control system of synchronous motor with permanent magnets with maximum energy efficiency with the weakening of the field], (2013). *Vesnik natchionalnogo universiteta «Harkovkiy politehnicheskij institute» Tematicheskij випуск «Pobleml avtomatisovanogo elektroprivoda. Teoriya i praktika»*. – HNU «HPI» Publ., Kharkov, Ukraine, Vol.3 – pp. 263–286. (In Ukrainian).

Получено (received) 27.08.2015