

УДК 681.513.5

С. Г. Деев,
Е. М. Потапенко, д-р техн. наук

РОБАСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С СИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Аннотация. Рассматривается робастная энергосберегающая система управления синхронным электроприводом при использовании комбинированных методов управления с оценкой и компенсацией неопределённости внешних воздействий, механических и электрических параметров.

Ключевые слова: система управления, неопределённость, энергосбережение, комбинированное управление, наблюдатель, закон управления, регулятор тока, синхронный двигатель

S. Deyev,
E. Potapenko, ScD.

ROBUST CONTROL OF SYNCHRONOUS DRIVE WITH SYNCHRONOUS PERMANENT MAGNET MOTOR

Abstract. Considered robust energy-saving control system synchronous drive using combined methods of control uncertainty estimation and compensation of external influences, mechanical and electrical parameters.

Keywords: control system, uncertainty, energy saving, combined control, observer, law of control, current regulator, synchronous motor

С. Г. Деев,
Е. М. Потапенко, д-р техн наук

РОБАСТНЕ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ З СИНХРОННИМ ДВИГУНОМ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

Анотація. Розглядається робастна енергозберігаюча система керування синхронним електроприводом при використанні комбінованих методів керування з оцінкою і компенсацією невизначеності зовнішніх впливів, механічних і електричних параметрів.

Ключові слова: система керування, невизначеність, енергозбереження, комбіноване керування, спостерігач, закон керування, регулятор струму, синхронний двигун

Введение. Всё большее распространение в современной промышленности и на транспорте получают синхронные электродвигатели с постоянными магнитами (СДПМ), так как по своим регулировочным характеристикам они имеют ряд преимуществ по сравнению с другими типами электродвигателей [1]. Тем не менее применение СДПМ осложняется наличием неопределённостей как в самих электроприводах [2], так и внешних воздействиях на него [3, 4]. Актуальной является проблема энергосбережения, особенно в случае использования автономных источников питания, как например, в электротранспорте и электромобилях [1].

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

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

$$I\ddot{\omega} = m + m_1, \quad (1)$$

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

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

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

в них I – момент инерции ротора двигателя, φ – угол поворота ротора, m – электромагнитный момент двигателя, m_1 – 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 производится следующим образом [3, 6, 7].

Пусть 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

$$f_m = -I_\delta \dot{\omega} + m_\delta + m_1.$$

Уравнение наблюдателя неопределённости определяется выражением

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

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

Для устранения необходимости использования $\dot{\omega}$ вводится обозначение

$$\lambda = \hat{f}_m + LI_0\omega, \quad (7)$$

откуда следует

$$\hat{f}_m = \lambda - LI_0\omega. \quad (8)$$

С учетом (7) наблюдатель (6) принимает вид

$$\dot{\lambda}_m = L[\lambda - LI_0\omega + m_0]. \quad (9)$$

Таким образом, вместо наблюдателя, содержащего $\dot{\omega}$, используется наблюдатель (8), (9), содержащий ω .

Комбинированный закон управления 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. Минимизация потерь в электроприводе.

Электрические потери в электроприводе включают потери в меди и стали [7, 8, 9, 10]

$$\Delta P = 1,5R_s(i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + 1,5R_c(i_{dc}^2 + i_{qc}^2), \quad (12)$$

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

$$i_{ds} = i_{dc} + i_d, \quad i_{qs} = i_{qc} + i_q. \quad (13)$$

Сложность оптимизации по выражению (13) заключается в зависимости потерь мощности от двух переменных: i_d и i_q . Для упрощения оптимизации, на основании выражения (2) вводится новая переменная k так, чтобы можно было записать [7]

$$i_d = \frac{k - \psi_m}{L_d - L_q}, \quad i_q = \frac{m}{1,5Z_p k}. \quad (13)$$

Нелинейность магнитной системы в таком случае может быть учтена за счёт учёта значений индуктивностей L_d, L_q , например [1]

$$L_d = \frac{\psi_m - \psi_0 \cos \alpha}{i_d}, \quad L_q = \frac{\psi_0 \cos \alpha}{i_q}. \quad (14)$$

Для минимизации потерь в выражение (12) подставляются зависимости (13) 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 (13) позволяет определить значения программных токов i_{dp} и i_{qp} , соответствующих минимуму потерь.

На рис. 1 показана зависимость оптимального значения параметра k от угловой скорости ротора, рассчитанная по данным электродвигателя [7]: $L_q = 12,5 \text{ мГн}$, $L_d = 5,7 \text{ мГн}$, $\psi_m = 0,123 \text{ мВб}$, $R_s = 1,2 \text{ Ом}$, $R_c = 416 \text{ Ом}$, $n = 3500 \text{ об/мин}$, $m = 2,4 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

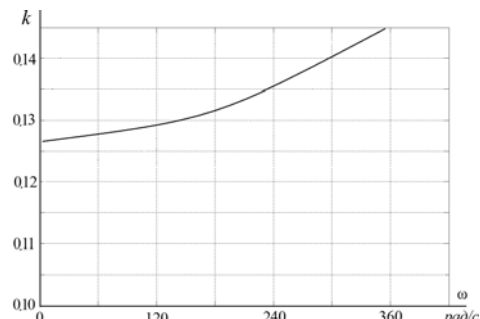


Рис. 1. Зависимость изменения параметра k от угловой скорости электропривода с СДПМ

3. 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 неопределённости. Датчики тока измеряют полный ток, состоящий из тока нагрузки и тока, соответствующего потерям в стали. В регуляторах токи потерь в стали, погрешности и изменения, связанные с отклонением от номинальных параметров и влиянием перекрёстных связей, включены в неопределённости, которые оцениваются 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 f_i .

Закон управления регулятора каждого из регуляторов тока тока имеет вид

$$u_p = k_0^{-1} [v (i_p - \hat{i}) - \hat{f}_i], \quad (15)$$

где v – постоянный коэффициент.

4. Функциональная схема системы управления электроприводом

показана на рис. 2. 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 (13). Регуляторы токов и компенсаторы неопределённости контуров токов i_d, i_q 6, 7 и 4, 5 соответственно построены по 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. Проведенное моделирование (рис. 3) подтвердило робастность разработанной системы.

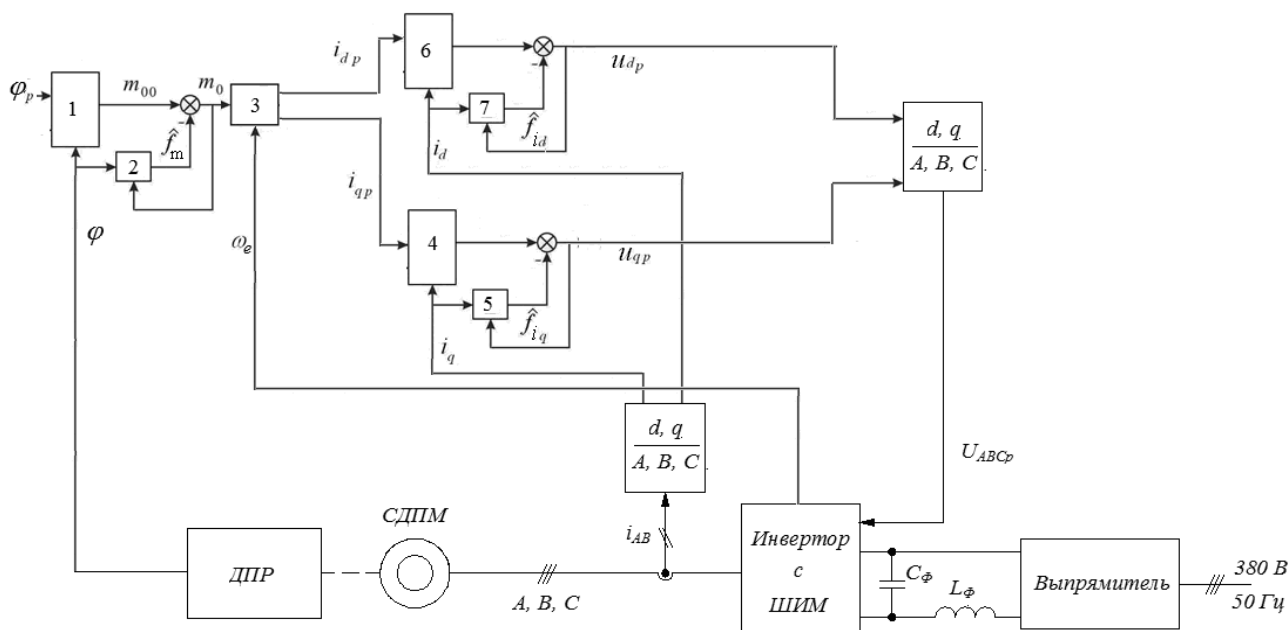


Рис. 2. Функциональная схема системы управления электроприводом

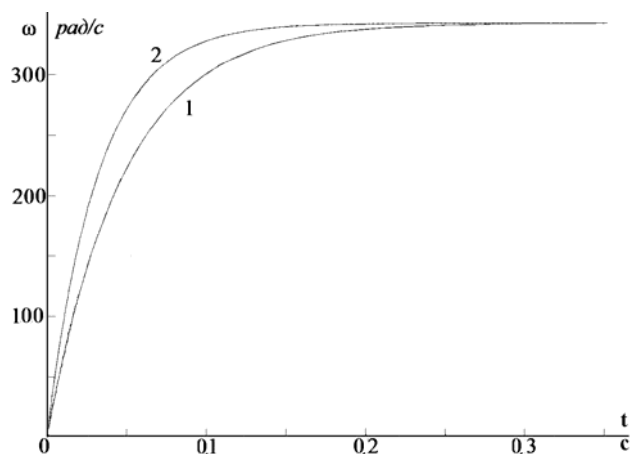


Рис. 3. Моделирование переходного процесса по скорости с различными значениями момента инерции (1 – при $I = I_n$, 2 – при $I = 3I_n$)

Выводы

1. Разработан метод управления электроприводами с СДПМ, обеспечивающий робастность электропривода по отношению к неопределенностям различного вида. Работоспособность предлагаемой системы подтверждается результатами математического моделирования.

2. 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.

4. Робастность и простота управления обеспечиваются за счёт применения робастных регуляторов электромагнитного момента и статорных токов.

Список использованной литературы

1. Jae-Woo Jung, Jeong-Jong Lee, Soon-O Kwon, Jung-Pyo Hong, and Ki-Nam Kim, (2009), Equivalent Circuit Analysis of Interior Permanent Magnet
2. Synchronous Motor Considering Magnetic Saturation. *World Electric Vehicle Journal*, Vol.3. EVS24, Stavanger, Norway, May13 – 16, 2009.
3. 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.
4. Holtz J. Special Section on Sensorless Control of Synchronous Machine Drives, (2006), *Industrial Electronics, IEEE TRANSACTIONS*, Vol.2, pp. 350 – 458.
5. Vas P., (1998), *Sensorless and Direct Torque Control*, Oxford, New York, Tokyo: Oxford University Press, 728 p.
6. Виноградов А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока [Текст] / А. В. Виноградов // *Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина*. – Иваново, 2008. – 298 с.
7. Деев С. Г. Принципы формирования робастного управления синхронным электроприводом [Текст] / С. Г. Деев, Е. М. Потапенко // Тематический выпуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика». – К. : Техніка. – 2011. – № 3. – С. 58 – 59.
8. Деев С. Г. Робастное энергосберегающее управление синхронным электроприводом [Текст] / С. Г. Деев, Е. М. Потапенко // *Вісник національного університету «Харьківський політехнічний інститут»*

Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика». – Харків : НТУ «ХПІ». – 2013. – № 36(1009). – С. 97 – 99.

9. Vaez S., John V.I., and Rahman V.A., (1999), An On-Line Loss Minimization Controller for Interior Permanent Magnet Motor Drives. *IEEE TRANSACTIONS on Energy Conversion*, No.4, p. 1435 - 1440.

10. Monajemy R., (1999), 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*, p.1 – 6.

11. 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. – Вип. 1/2011. – Ч. 1. – С. 136 – 137.

Получено 18.07.2014

References

1. Jae-Woo Jung, Jeong-Jong Lee, Soon-O Kwon, Jung-Pyo Hong, and Ki-Nam Kim, (2009), Equivalent Circuit Analysis of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Considering Magnetic Saturation. *World Electric Vehicle Journal*, Vol. 3. *EVS24*, Stavanger, Norway, May 13–16, 2009.

2. Tolochko O.I., and Bozhko V.V. Osobennosti vektornogo upravleniya sinhronimi electrodvigateliami 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 Energoserberigauchi Sistemi, Tematicheskij Vipusk "Poblemi Avtomatizovanogo Elektroprivoda. Teoriya i Praktika"*, Kremenchuk, Ukraine, Vol. 3, pp. 58 – 59 (In Russian).

3. Holtz J., (2006), Special Section on Sensorless Control of Synchronous Machine Drives, *Industrial Electronics, IEEE TRANSACTIONS*, Vol. 2, pp. 350 – 458.

4. Vas P., (1998), Sensorless and Direct Torque Control, *Oxford, New York, Tokyo: Oxford University Press*, 728 p.

5. Vinogradov A.B. Vektornoie upravlenie elektroprivodami peremennogo toka [Vector Control AC Drives], (2008) *Ivanovskiy Gosudarstvennii Energeticheskij Institute imeni V.I. Lenina*, Ivanovo, Russian Federation, 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 Vipusk "Poblemi Avtomatizovanogo 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 Natsionalnogo*

Universiteta "Harkovkiy Politehnicheskij Institute" Tematicheskij Vipusk "Poblemi Avtomatizovanogo Elektroprivoda. Teoriya i Praktika", HNU "HPI" Publ., Kharkov, Ukraine, Vol. 3, pp. 58 – 59 (In Russian).

8. Vaez S., John V.I., and Rahman V.A., (1999), An On-Line Loss Minimization Controller for Interior Permanent Magnet Motor Drives. *IEEE TRANSACTIONS on Energy Conversion*, Vol. 4, pp. 1435 - 1440.

9. Monajemy R., (1999), 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*, 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).



Деев

Сергей Георгиевич, ст. преподаватель каф. электропривода и автоматизации технологических процессов Запорожского нац. технического ун-та. 69063, ул. Жуковского, д. 64, г. Запорожье. Тел.: 050- 239-58-18. E-mail: sgd1968@mail.ru



Потапенко

Евгений Михайлович, д-р техн. наук, проф. каф. электропривода и автоматизации технологических процессов Запорожского нац. технического ун-та. 69063, ул. Жуковского, д. 64. г. Запорожье. Тел.: 097-405-93-89. E-mail: sgd1968@mail.ru