

УДК 681.513.5

Е. М. Потапенко, д-р техн. наук,

С. Г. Деев

## 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

Е. Potapenko, ScD,

S. Deyev

## 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

Е. М. Потапенко, д-р техн наук,

С. Г. Деев

## 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 электромотоциклах [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]:

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

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

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

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

в них  $I$  – момент инерции ротора двигателя,  $\varphi$  – угол поворота ротора,  $m$  – электромагнитный момент двигателя,  $m_1$  – неизвестный момент нагрузки,  $Z_p$  – число пар полюсов,  $\psi_m$  – магнитный поток, создаваемый постоянным магнитом,  $\omega_e$  – 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;  $I_\delta, m_\delta$  – 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  $\omega$ .

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]:  $L_q = 12,5 \text{ мГн}$ ,  $L_d = 5,7 \text{ мГн}$ ,  $\psi_m = 0,123 \text{ мВб}$ ,  $R_s = 1,2 \text{ Ом}$ ,  $R_c = 416 \text{ Ом}$ ,  $n = 3500 \text{ об/мин}$ ,  $m = 2,4 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

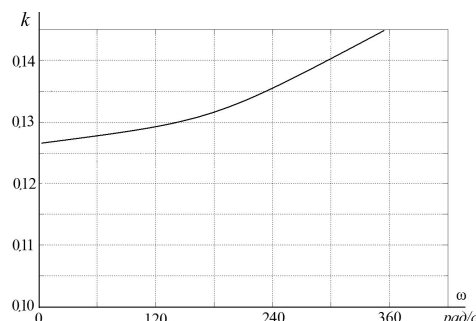


Рис. 1. Зависимость изменения параметра  $k$  от угловой скорости электропривода с СДПМ

## 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 АВС 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 трёхфазную форму подаются на инвертор в качестве управляющих сигналов. Проведенное моделирование (рис. 3) подтвердило робастность разработанной системы.

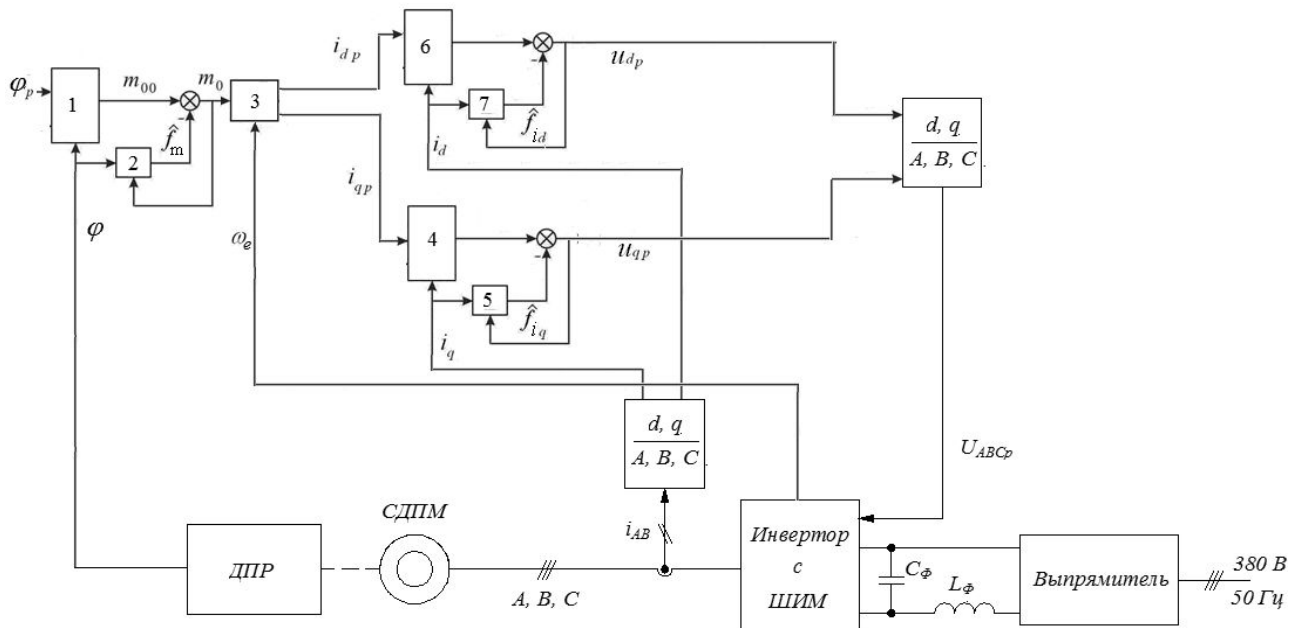


Рис. 2. Функциональная схема системы управления электроприводом

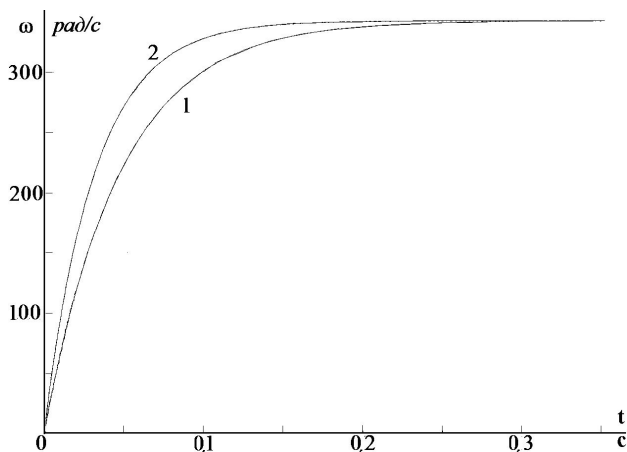


Рис. 3. Моделирование переходного процесса по скорости с различными значениями момента инерции (1 – при  $I = I_f$ , 2 – при  $I = 3I_f$ )

**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 «Харківський політехнічний інститут»*

Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика». – Харьков : НТУ «ХПИ». – 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. Osobnosti 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 Energoserbigauchi 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 Gosudarstvennij 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 Natchionalnogo*

*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 electroprivodov 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