

УДК 681.527.2

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

## ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ РОБАСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ СИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

**Аннотация.** Рассматриваются принципы построения робастных систем управления синхронным электроприводом при использовании комбинированных методов управления с оценкой и компенсацией неопределённости внешних воздействий, механических и электрических параметров.

Е.М. Потапенко, доктор технических наук  
С.Г. Деев

## ПРИНЦИПИ ФОРМУВАННЯ РОБАСТНОГО УПРАВЛІННЯ СИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

**Анотація.** Розглядаються принципи побудови робастних систем керування синхронним електроприводом при використанні комбінованих методів керування з оцінкою і компенсацією невизначеності зовнішніх збурень, механічних та електричних параметрів.

Deyev S. G.

E. M. Potapenko, ScD

## PRINCIPLES OF FORMATION OF ROBUST CONTROL SYNCHRONOUS ELECTRIC

**Abstract.** The principles of construction of robust control systems by synchronous electric drive with using of combined method's control with estimation and compensation of uncertainty of external influences, mechanical and electrical parameters are considered.

**Введение.** Самыми радикальными в отношении робастности управления являются системы с переменной структурой, системы, использующие принцип обратной динамики и комбинированные системы управления с оценкой и компенсацией неопределенностей [1]. Наименьшими недостатками обладает последний метод. Аналогичный, но более сложный, метод был применён для управления токовым контуром электропривода с синхронным двигателем с постоянными магнитами (СДПМ) [4]. В работе [2] для управления токовым контуром асинхронного электропривода (АЭП) был синтезирован более простой метод, базирующийся на работе [1].

Целью данной статьи является построение робастных регуляторов электромагнитного момента и токовых контуров привода с СДПМ.

**Постановка задачи.** Движение привода с СДПМ описывается следующей системой уравнений, записанных в синхронном базисе ( $d, q$ ), связанном с вектором потокоцепления магнитов,

$$I\dot{\omega} = m - m_1, \quad (1)$$

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

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

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

где  $I$  – момент инерции двигателя,  $\omega$  – угловая скорость ротора,  $m$  – электромагнитный момент двигателя,  $m_1$  – момент, учитывающий нагрузку и все другие воздействия на ротор,  $n$  – число пар полюсов,  $\psi_m$  – магнитный поток, создаваемый постоянным магнитом,  $L_d, L_q$  – индуктивности по соответствующим осям,  $i_d, i_q$  – токи,  $u_d, u_q$  – напряжения,  $R_s$  – активное сопротивление статора. Различают два основных типа СДПМ: явнополюсные (синхронные двигатели с внутренними магнитами) и неявнополюсные (двигатели с поверхностной установкой магнитов)

© Деев С.Г., Потапенко Е.М., 2011

. При векторном управлении СДПМ используются контур формирования электромагнитного момента для регулирования электромеханических процессов в двигателе и контуры регулирования моментной и намагничивающей составляющих токов статора.

**1. Формирование электромагнитного момента.** Уравнение (1) представим в виде

$$I_0 \dot{\phi} = m_0 + f, \quad (5)$$

где  $\phi = \omega$ ,  $I_0, m_0$  – номинальные известные значения, а неопределенность

$$f = -I_s \dot{\omega} + m_s + m_l. \quad (6)$$

Здесь и далее индекс  $\delta$  – погрешность знания соответствующей величины. Согласно уравнению (2)

$$m_0 = n[\psi_{m_0} i_q + (L_{d0} - L_{q0}) i_d i_q], \quad (7)$$

$$m_s = n[\psi_{m_s} i_q + (L_{d_s} - L_{q_s}) i_d i_q]. \quad (8)$$

Уравнение (5) представляет собой уравнение полностью детерминированного объекта с номинальными параметрами, подверженного действию суммарной неопределенности  $f$ . Из (5) следует

$$f = I_0 \dot{\phi} - m_0.$$

Задача состоит в оценке неопределенности  $f$ , входящей в уравнение (5), и ее компенсации. Аналогичная задача решена для АЭП [3]. Применение этого метода, к синхронному приводу даёт уравнения наблюдателя неопределенности

$$\dot{z} = L(\hat{f} + m_0), \quad \hat{f} = z - LI_0 \dot{\phi}. \quad (9)$$

Сформируем закон управления

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

Подстановка (10) в (5) даёт

$$I_0 \ddot{\phi} = m_0 - \hat{f} + f. \quad (11)$$

При достаточно точной оценке неопределенности вместо уравнения (11) можно рассматривать невоз-

мушенное уравнение

$$I_0 \ddot{\varphi} = m_{00}. \quad (12)$$

Отслеживание заданной траектории уравнения (12) обеспечивается за счет закона управления

$$m_{00} = I_0 \ddot{\varphi}_p - k_1(\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_p) - k_2(\varphi - \varphi_p), \quad (13)$$

где  $k_1, k_2$  – коэффициенты управления, индекс  $p$  указывает на программные значения соответствующих переменных.

Подстановка (13) в (12) приводит

$$I_0(\ddot{\varphi} - \ddot{\varphi}_p) + k_1(\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_p) + k_2(\varphi - \varphi_p) = 0, \quad (14)$$

с характеристическим уравнением

$$I_0 p^2 + k_1 p + k_2 = 0. \quad (15)$$

Выбор коэффициентов осуществляется с помощью стандартных полиномов.

Таким образом, оценка и компенсация неопределенности  $f$  производится вне зависимости от того, какими причинами было вызвано ее появление.

Выше рассматривался явнополюсный СДПМ.

*Примечание.* Если в выражении (2) второе слагаемое в квадратных скобках отнести к неопределенности, то по динамическим свойствам привод фактически будет обладать такими же свойствами, как и привод с неявнополюсным СДПМ.

**2. Регуляторы контуров тока.** Представим исходную систему (3) и (4) в виде номинальной модели, на которую действует вектор неопределенности  $f_{dq}$ ,

$$p i_{dq} = -(T'_{s0})^{-1} i_{dq} + k_0 u_{dq p} + f_{dq}, \quad (16)$$

$$k_0 = k_1 (\sigma L_{s0})^{-1}, \quad T'_{s0} = \sigma L_{s0} (R_{s0})^{-1}, \quad (17)$$

$$f_d = L_{d\delta} p i_d + R_{s\delta} i_d - L_q i_q n \omega, \quad (18)$$

$$f_q = L_{q\delta} p i_q + R_{s\delta} i_q + L_d i_d n \omega + n \omega \psi_{m\delta}, \quad (19)$$

где  $k_0$  – коэффициент передачи преобразователя частоты,  $i_{dq} = [i_d, i_q]^T$ ,  $u_{dq} = [u_d, u_q]^T$ ,  $f_{dq} = [f_d, f_q]^T$ . Все коэффициенты и переменные в (16), за исключением  $p i_{dq}$  и  $f$ , считаются известными. В коэффициентах уравнений (16)–(19) выделены номинальные составляющие с индексом 0 и неопределенности с индексом  $\delta$ . Система (16)–(19) аналогична системе (8.7)–(8.9) работы [3], для каждого контура (намагничивания и моментного) которой синтезирован наблюдатель

$$p \hat{i} = -(T'_{s0})^{-1} \hat{i} + k_0 u_p + \hat{f} + l_1(\hat{i} - i), \quad (20)$$

$$p \hat{f} = l_2(\hat{i} - i), \quad (21)$$

где  $l_1, l_2$  – постоянные коэффициенты наблюдателя.

При правильном выборе коэффициентов  $l_1, l_2$   $\hat{f} \rightarrow f$ ,  $\hat{i} \rightarrow i$ . Регулятор контура тока задаётся

$$u_p = k_0^{-1} [q (i_p - \hat{i}) - \hat{f}], \quad (22)$$

где  $q$  – постоянный коэффициент. Подстановка (22) в каждое из скалярных уравнений (16) даёт уравнение

$$p i = -(T'_{s0})^{-1} i + q(i_p - \hat{i}) + f - \hat{f}. \quad (23)$$

При точной работе наблюдателя уравнение (23) переходит в уравнение инерционного звена первого порядка

$$p i = -[(T'_{s0})^{-1} + q] i + q i_p, \quad (24)$$

с желаемым видом передаточной функции.

Предлагаемый наблюдатель неопределенности обоих контуров тока в вычислительном отношении представляет собой 4 независимых дифференциальных уравнений первого порядка. В работе [4] все уравнения наблюдателя обоих контуров тока взаимосвязаны и их общий порядок равен четырём. Известно, что объём вычислений пропорционален квадрату порядка системы. На основании сказанного, объём вычислений предлагаемого метода равен  $4 \cdot 1^2 = 4$ . Объём вычислений наблюдателя работы [4] равен  $4^2 = 16$ . Таким образом, объём вычислений предлагаемого метода в 4 раза меньше объёма вычислений метода работы [4].

**Выводы.** Разработаны методы управления электроприводами с СДПМ, обеспечивающие робастность электропривода по отношению к неопределенности приведенного момента инерции ротора, ко всем видам внешних воздействий на ротор двигателя, к отклонениям от номинальных значений параметров токовых контуров, включающих в себя СДПМ и преобразователь частоты (сопротивления, индуктивности). Предлагаемые методы отличаются простотой и малым объёмом вычислений. Работоспособность предлагаемых методов подтверждается работоспособностью аналогичных методов для асинхронных электроприводов.

Список использованной литературы

1. Потапенко Е.М. Робастное управление роботом / Е.М. Потапенко – М.: // РАН. Технич. кибернетика – 1993. – № 3. – С. 183-190.
2. Потапенко Е.М. Синтез робастных комбинированных регуляторов токовых контуров при векторном управлении двигателями переменного тока / Е. М. Потапенко, Е. Е. Потапенко // Проблемы управления и информатики. – 2006. – № 6. – С.69-78.
3. Потапенко Е.М. Робастные алгоритмы векторного управления асинхронным приводом. (Монография) / Е.М. Потапенко, Е.Е. Потапенко. – Запорожье: ЗНТУ. – 2009. – 352 с.
4. A current control for permanent magnet synchronous motor with a simple disturbance estimation scheme / К.-Н. Kim, I.-С. Baik, G.-W. Moon, М.-J. Youn. – IEEE Trans. on Control Systems Technology. – 1999. – V.7. – № 3. – P. 630-633.

Получено 13.07.2011



Деев Сергей Георгиевич,  
 ст. преп. каф.ЭПА, ЗНТУ  
 ул. Жуковского, д. 64,  
 г. Запорожье, 69063.  
 моб. 050- 239-58-18  
 sgd1968@mail.ru



Потапенко  
 Евгений Михайлович  
 д-р техн. наук, проф. каф. ЭПА,  
 ЗНТУ  
 ул. Жуковского, д. 64,  
 г. Запорожье, 69063.  
 моб. 097-405-93-89