

РОБАСТНОЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ СИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Введение. Синхронные электродвигатели с постоянными магнитами (СДПМ) по динамическим и эксплуатационным характеристикам имеют ряд преимуществ по сравнению с другими типами электродвигателей и перспективны для использования в различных областях техники, например, в электро- и гибридных силовых установках транспортных средств, электроприводах поворота антенн радиолокаторов и в других областях [1]. В указанных случаях особенно остро стоит задача энергосбережения. Условия эксплуатации отличаются наличием неопределённостей в самих электроприводах и внешних воздействиях на него.

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 потокосцепления магнита.

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

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

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

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

где 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 [2, 5].

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

$$I_0 \ddot{\varphi} = m_0 + f_m, \quad (5)$$

где неопределенность

$$f_m = -I_\delta \ddot{\varphi} + m_\delta + m_1.$$

В этом случае уравнение наблюдателя неопределённости определяется выражением

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

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

Для устранения необходимости использования ускорения $\ddot{\varphi}$ вводится обозначение

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

откуда следует

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

с учетом (7) наблюдатель (6) принимает вид

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

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

Комбинированный закон управления задается в виде

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

где

$$m_{00} = -k_1 (\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_p) - k_2 (\varphi - \varphi_p), \quad (11)$$

k_1, k_2 – коэффициенты закона управления.

3. Минимизация потерь в электроприводе. Электрические потери в электроприводе включают потери в меди и стали [3, 4]

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

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

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

Токи, соответствующие потерям в стали [3], определяются выражениями

$$i_{dc} = -\frac{\omega_e L_q i_q}{R_c}, \quad i_{qc} = -\frac{\omega_e(\Psi_m + L_d i_d)}{R_c}. \quad (14)$$

С учётом (14) и (15) выражение (13) принимает вид

$$\Delta P = 1,5R_s \left(\left(i_d - \frac{\omega_e L_q i_q}{R_c} \right)^2 + \left(i_q - \frac{\omega_e(\Psi_m + L_d i_d)}{R_c} \right)^2 \right) + 1,5R_c \left(\left(-\frac{\omega_e L_q i_q}{R_c} \right)^2 + \left(-\frac{\omega_e(\Psi_m + L_d i_d)}{R_c} \right)^2 \right). \quad (15)$$

Сложность оптимизации по выражению (15) 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

$$i_d = \frac{k - \Psi_m}{L_d - L_q}, \quad i_q = \frac{m}{1,5Z_p k}. \quad (16)$$

Справедливость такой замены подтверждается подстановкой (16) в выражение (2), при этом получается тождество $m \equiv m$.

Для минимизации потерь в выражение (15) подставляются зависимости (16).

Значение k , при котором электрические потери в электроприводе будут минимальными, определяется из уравнения

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial k} = 0. \quad (17)$$

Найденное значение k с помощью выражений (16) 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 при различных значениях момента нагрузки, рассчитанная по данным электродвигателя [3]: $L_q = 12,5 \text{ мГн}$, $L_d = 5,7 \text{ мГн}$, $\Psi_m = 0,123 \text{ мВб}$, $R_s = 1,2 \text{ Ом}$, $R_c = 416 \text{ Ом}$, $n = 3500 \text{ об/мин}$, $m = 2,4 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

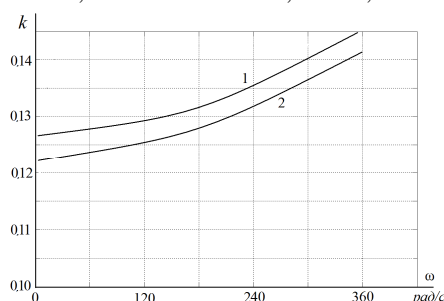


Рисунок 1 – Зависимость изменения параметра k от угловой скорости электропривода с СДПМ при номинальной нагрузке (1) и без нагрузки (2).

Как следует из рис. 1, оптимальное значение параметра k для явнополюсных СДПМ относительно мало зависит от значений скорости и момента.

2. Регуляторы контуров тока. В приводе используются два робастных регулятора токов i_d и i_q , аналогичных регуляторам, рассмотренным в работах [2, 5]. Каждый из регуляторов тока включает в себя собственно регулятор и компенсатор с наблюдателем неопределённости. Датчики тока измеряют полный ток, состоящий из моментного тока и тока, соответствующего потерям в стали [6, 3]. 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 , а именно

$$p i_{dq} = -(T'_{s0})^{-1} i_{dq} + k_0 u_{dq} + \hat{f}_i, \quad (18)$$

где p – оператор дифференцирования, k_0 – коэффициент передачи преобразователя.

Для каждого контура тока синтезирован наблюдатель

$$\hat{p}\dot{i} = -(T'_{s0})^{-1}\hat{i} + k_0 u_p + \hat{f}_i + l_1(\hat{i} - i), \quad (19)$$

$$\hat{p}\dot{f}_i = l_2(\hat{i} - i), \quad (20)$$

где l_1, l_2 – постоянные коэффициенты наблюдателя.

Закон управления регулятора тока имеет вид

$$u_p = k_0^{-1}[v(i_p - \hat{i}) - \hat{f}_i], \quad (21)$$

где v – постоянный коэффициент.

5. 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} . Регуляторы токов и компенсаторы неопределённости контуров токов i_d, i_q 6, 7 и 4, 5 соответственно построены по уравнениям (19)–(21). Регуляторы тока формируют программные напряжения в осях d, q, которые после преобразования в трехфазную форму подаются на инвертор в качестве управляющих сигналов.

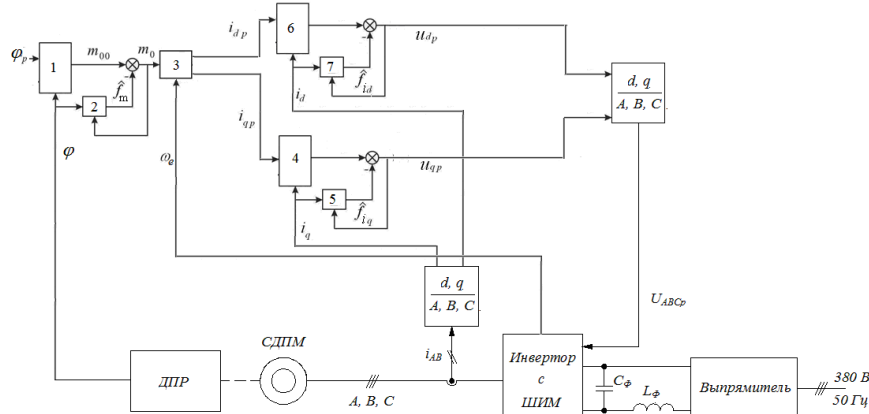


Рисунок 2 – Функциональная схема системы управления электроприводом.

Выводы. 1. Получена зависимость потерь мощности (15) от составляющих статорных токов, формирующих электромагнитный момент.

2. Предложено преобразование, позволяющее вместо выражения потерь мощности через токи i_d и i_q , получить зависимость этих потерь от одной переменной k , что существенно упрощает задачу оптимизации.

3. Предложенный метод формирования статорных токов по критерию минимума потребляемой мощности обеспечивает формирование заданного электромагнитного момента и минимизацию энергопотребления в реальном времени.

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

5. Предложен метод синтеза робастного энергосберегающего управления синхронным электроприводом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нгуен Куанг Тхиеу. Развитие теории и методы повышения энергоэффективности однодвигательных тяговых электроприводов автотранспортных средств: автореф. дис. на соискание научн. степени доктора техн. наук: спец. 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы». – Москва, 2012. – 40 с.
2. Деев С.Г. Принципы формирования робастного управления синхронным электроприводом / С.Г. Деев, Е.М. Потапенко // Тематический выпуск «Проблемы автоматизованого электропривода. Теорія й практика». – Киев: Техника. – 2011. – №3. – С. 58–59.
3. Vaez S., John V.I., Rahman V.A. An On-line loss Minimization Conroller for Interior Permanent Magnet Motor Drives. IEEE TRANSACTIONS on Energy Conversion, 1999, №4, p.1435-1440.
4. 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
5. Потапенко Е.М. Робастные алгоритмы векторного управления асинхронным приводом / Е.М. Потапенко, Е.Е. Потапенко. – Запорожье: ЗНТУ. – 2009. – 352 С. (Монография).
6. Толочко О.И. Особенности векторного управления синхронными двигателями с постоянными магнитами при учёте потерь в стали/ О.И. Толочко, В.В. Божко // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тематичний випуск «Проблемы автоматизованого электропривода. Теорія й практика». – Кременчук:КрНУ, 2012.- Вип.3/2012(19): Техника. – 2011. – №3. – С. 58–59.