

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ НА ОСНОВЕ КОМПЕНСАЦИИ ВОЗМУЩАЮЩЕГО МОМЕНТА

Смелов Д.А., Жуков Ю.А.

*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
имени Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург*

Ключевые слова: синхронный двигатель, управление, возмущающий момент, адаптивный регулятор, компенсация возмущений, пульсации момента.

Аннотация. Разработка методов компенсации возмущающих моментов синхронных машин весьма важна в задачах прецизионного управления мехатронных и робототехнических систем. В работе представляется перспективный современный адаптивный алгоритм управления синхронной машиной с постоянными магнитами на основе компенсации возмущающего момента. На основе модели потокосцепления машины в среде Matlab разработана модель привода и дискретной адаптивной системы управления. Получены результаты моделирования, демонстрирующие эффективность разработанного алгоритма компенсации.

ADAPTIVE CONTROL OF A PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR BASED ON COMPENSATION OF THE DISTURBING TORQUE

Smelov D.A., Zhukov Yu.A.

*Baltic State Technical University "Voenmeh" named after D.F. Ustinov,
Saint-Petersburg*

Keywords: synchronous motor, control, disturbing torque, adaptive regulator, compensation of disturbances, torque pulsations.

Abstract. The development of methods for compensating the disturbing moments of synchronous machines is very important in the tasks of precision control of mechatronic and robotic systems. The paper presents a promising modern adaptive algorithm for controlling a synchronous machine with permanent magnets based on compensation of the disturbing torque. Based on the flow coupling model of the machine in the Matlab environment, a model of a drive and a discrete adaptive control system has been developed. Simulation results demonstrating the effectiveness of the developed compensation algorithm have been obtained.

1. Введение. Возмущающий крутящий момент на валу синхронной машины с постоянными магнитами (СДПМ) является причиной ухудшения качества регулирования в прецизионных системах управления. К возмущающим относятся внешние возмущения со стороны объекта управления и внутренние пульсации крутящего момента, вызванные несинусоидальной обратной электродвижущей силой (ЭДС), несовершенством конструкции двигателя и преобразователя (индуктивность, ошибки согласования фаз и погрешности измерения тока). Пульсации момента ухудшают точность, плавность хода, КПД и долговечность. Особенно критичны описанные последствия в медицинских устройствах, аэрокосмической технике, прецизионных станках.

Для качественного управления необходимо знать параметры модели двигателя. Адаптивные алгоритмы позволяют динамически подстраиваться к

изменениям параметров синхронного двигателя с постоянными магнитами и внешних условий, в следствие чего такие подходы являются перспективными направлениями в теории управления.

В [1] для компенсации пульсаций вращающего момента используется оценка момента с использованием обратной связи по току и скорости с помощью адаптивного наблюдателя. Этот метод использует детальную модель машины, полученную путем дифференцирования магнитной совместной энергии в зависимости от положения ротора. Магнитный поток оценивается на основе модели потока и модели напряжения. По результатам измерения тока и оцененного потока рассчитывается крутящий момент. Основанные на точном знании параметров методы управления не всегда эффективны.

В [2] разработан адаптивный алгоритм управления с обратной связью, включающий адаптивный регулятор с автоматической настройкой для оценки неопределенностей. В [3] для компенсации пульсаций в контурах тока и скорости использовалась обратная связь по измерению крутящего момента. Рассмотренные алгоритмы не учитывают нелинейных связей объекта или требуют применения дополнительных датчиков.

В настоящей статье применен метод нелинейного адаптивного управления синхронной машиной с постоянными магнитами для компенсации возмущающего момента [4].

2. Модель синхронной машины с постоянными магнитами

Уравнение электрического равновесия и моментов машины описывается на основе индуктивностей фаз:

$$\begin{cases} L_{aa} \frac{dI_a}{dt} + L_{ab} \frac{dI_b}{dt} + L_{ac} \frac{dI_c}{dt} = U_a - I_a R_a - \omega \frac{d\psi_a}{d\theta}, \\ L_{ba} \frac{dI_a}{dt} + L_{bb} \frac{dI_b}{dt} + L_{bc} \frac{dI_c}{dt} = U_b - I_b R_b - \omega \frac{d\psi_b}{d\theta}, \\ L_{ca} \frac{dI_a}{dt} + L_{cb} \frac{dI_b}{dt} + L_{cc} \frac{dI_c}{dt} = U_c - I_c R_c - \omega \frac{d\psi_c}{d\theta}, \\ J \frac{d\omega}{dt} = T_e - b\omega - T_d, \end{cases} \quad (1)$$

где U_a, U_b, U_c – напряжения фаз, I_a, I_b, I_c – токи фаз, R_a, R_b, R_c – сопротивления фаз, J – момент инерции ротора, ω – угловая скорость ротора, T_e – электромагнитный момент, b – коэффициент сил трения, T_d – внешний возмущающий момент, θ – угол поворота вала машины, L_{aa}, L_{bb}, L_{cc} – индуктивности фаз, $L_{ab} = L_{ba}, L_{ac} = L_{ca}, L_{cb} = L_{bc}$ – взаимные индуктивности фаз, L_{ar}, L_{br}, L_{cr} – взаимные индуктивности фаз и ротора, ψ_a, ψ_b, ψ_c – потокосцепление фаз.

Также на основе индуктивностей формируются потокосцепления фаз:

$$\begin{cases} \psi_a = L_{aa} I_a + L_{ab} I_b + L_{ac} I_c + L_{ar} I_m, \\ \psi_b = L_{ba} I_a + L_{bb} I_b + L_{bc} I_c + L_{br} I_m, \\ \psi_c = L_{ca} I_a + L_{cb} I_b + L_{cc} I_c + L_{cr} I_m, \end{cases} \quad (2)$$

где I_m – эквивалентный ток потокосцепления возбуждения.

Электромагнитный момент T_e вычисляется из энергетического баланса машины при отсутствии потерь по уравнению (3):

$$\begin{aligned} T_e = & \frac{1}{2} p ((I_b^2 - 2I_a^2 + I_c^2 + 2I_a I_b + 2I_a I_c - 4I_b I_c) L_2 \sin(2p\theta) + \\ & + (2\sqrt{3}I_a I_b + \sqrt{3}I_c^2 - \sqrt{3}I_b^2 2\sqrt{3}I_a I_c) L_2 \cos(2p\theta) + \\ & + (I_b - 2I_a + I_c) \psi_0 \sin(p\theta) + (\sqrt{3}I_b - \sqrt{3}I_c) \psi_0 \cos(p\theta)), \end{aligned} \quad (3)$$

где L_2 – индуктивность второй гармоники потокосцепления фаз, p – количество пар полюсов машины, ψ_0 – потокосцепление возбуждения.

Выражения (1-3) определяют математическую модель синхронной машины в фазных координатах а-б-с. В модели определены две гармоники взаимоиндукции. На основе (1)-(3) в среде Matlab разработана модель синхронной машины.

3. Адаптивный алгоритм для компенсации влияния возмущений момента

При векторном управлении двигателем используется модель во вращающихся d - q -координатах, полученная на основе преобразования Парка:

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = U_d - i_d R + \omega p L_q i_q, \\ L \frac{di_q}{dt} = U_q - i_q R - \omega p (L_d i_d + \psi_0)', \\ J \frac{d\omega}{dt} = k_m i_q - b\omega - T_d, \end{cases} \quad (4)$$

где L – фазная индуктивность, R – сопротивление фазы, $k_m = p\psi_0$ – коэффициент преобразования двигателя по моменту, U_d, U_q – напряжения фаз в координатах d - q , I_d, I_q – токи фаз в координатах d - q .

Динамическая модель двигателя в d - q -координатах, содержит пять положительных параметров J, k_m, b, R, L и неизвестный параметр T_d , точное значение которого не так просто определить.

Нагрузка, создаваемая крутящим моментом T_d , зависит от условий применения и может меняться от случая к случаю, так что её измерения в автономном режиме могут отличаться от их истинных значений в режиме реального времени.

Остальные параметры J, k_m, b, R, L могут быть известны с некоторыми погрешностями в пределах каждого класса двигателей.

Когда все параметры известны (или определены), кроме T_d , то на основе (4) адаптивный закон управления в системе d - q -координат представляется в форме:

$$\begin{aligned}
 U_q &= L \left\{ \frac{R}{L} i_q + p \omega i_d + \frac{k_M}{L} \omega + \frac{J}{k_M} \left[\frac{d^3 \theta_r}{dt^3} + (k_1 + k_2) \ddot{\theta}_r - k_1 k_2 \dot{\hat{\theta}} \right] - \right. \\
 &\quad \left. - \frac{J}{k_M} \left(\frac{k_M}{J} i_q - \frac{b}{J} \omega - \frac{\hat{T}_d}{J} \right) \times (k_1 + k_2 - \frac{b}{J}) - k_3 \tilde{i}_q - \gamma^{-1} \frac{k_M}{J} \omega \right\}, \\
 U_d &= L \left(\frac{R}{L} i_d - p \omega i_q - k_4 \tilde{i}_d \right), \\
 \hat{T}_d &= \lambda \left[-J \ddot{\omega} - \frac{J^2}{k_M} (k_1 + k_2 - \frac{b}{J}) \gamma \tilde{i}_q \right],
 \end{aligned} \tag{5}$$

где θ_r – эталонный угол, $k_1 - k_4$ – коэффициенты усиления, λ, γ – коэффициенты адаптации, $\dot{\hat{\theta}}$ – оценка скорости, $\tilde{i}_d, \tilde{i}_q$ – оценка по токам. Фазные напряжения формируются из обратного преобразования Парка.

4. Моделирование адаптивного алгоритма для компенсации влияния пульсаций момента

В пакете Matlab Simulink на основе (1)-(5) разработана модель дискретной системы управления синхронным двигателем с постоянными магнитами с адаптивной оценкой внешнего возмущения, показанная на рисунке 1.

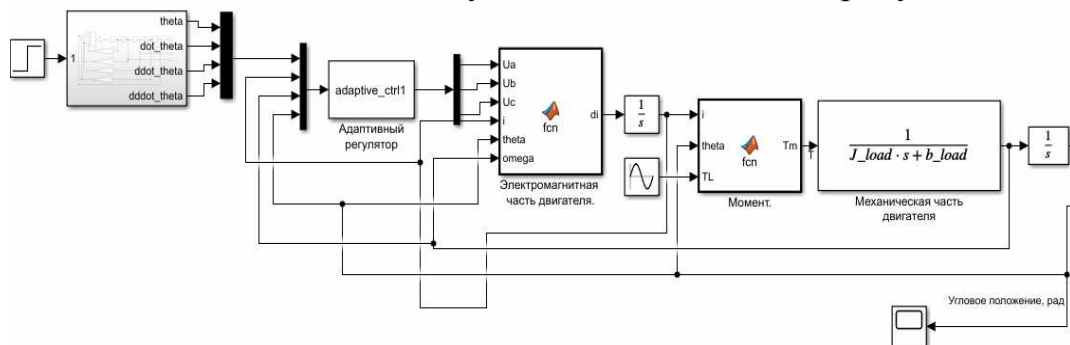


Рис. 1. Система управления СДПМ с адаптивным регулятором

Оценено качество регулирования машиной в условиях действия возмущающего момента. На рисунке 2 представлены результаты моделирования системы с адаптивной оценкой момента.

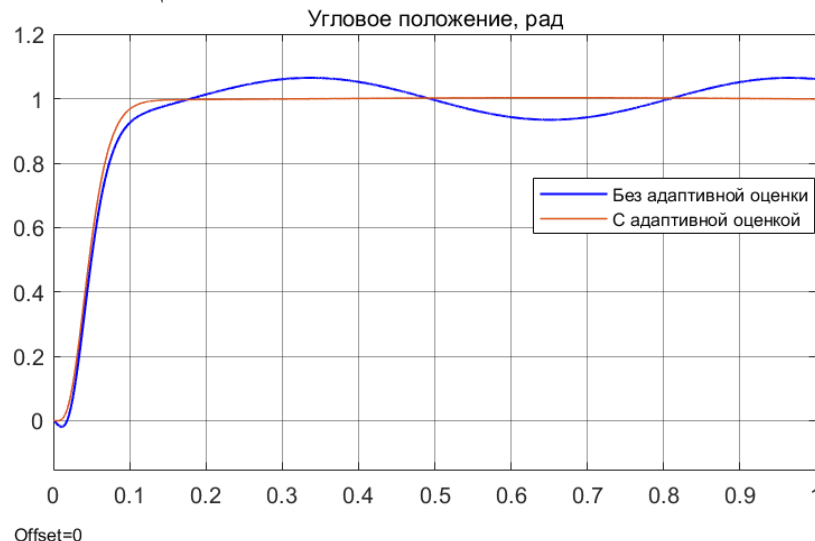


Рис. 2. Моделирование системы с адаптивной компенсацией моментных возмущений

Закключение. В статье представлен обзор методов измерения и оценки, а также современных методов компенсации пульсаций крутящего момента синхронной машины с постоянными магнитами. Проведен синтез адаптивного алгоритма для компенсации влияния возмущений момента. Алгоритм разработан в пакете Matlab, а также построена схема дискретной адаптивной системы управления СДПМ в Simulink. Результаты моделирования демонстрируют, что на основе разработанного адаптивного алгоритма управления компенсируется возмущающий момент, обеспечивая повышение качества регулирования синхронной машиной.

Список литературы

1. Piippo A., Luomi J. Torque ripple reduction in sensorless PMSM drives // IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics. 2006, pp. 920-925.
2. Petrovic V., Ortega R., Stankovic A.M. and Tadmor G. Design and implementation of an adaptive controller for torque ripple minimization in PM synchronous motors // IEEE Trans. Power Electronic. 2000, vol. 15, no. 5, pp. 871-880.
3. Nakamura K., Fujimoto H. and Fujitsuna M. Torque ripple suppression control for PM motor with current control based on PTC // 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA. 2010, pp. 1077-1082.
4. Фуртат И.Б., Жуков Ю.А., Слободзян Н.С. Обзор моделей и методов управления шаговыми двигателями // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2023. – Т. 24, №7. – С. 352-363.

Сведения об авторах:

Смелов Даниил Антонович – магистрант;

Жуков Юрий Александрович – старший преподаватель кафедры «Системы приводов, мехатроника и робототехника».