

УДК 621.3.078

Система прямого управления моментом и потокосцеплением ротора асинхронного электродвигателя

Е.М. Овсянников, Нгуен Куанг Тхиеу

В статье предложена система прямого управления моментом асинхронного электродвигателя с отдельным регулированием потокосцепления ротора и электромагнитного момента. Приведены результаты имитационного моделирования асинхронного электропривода, показаны достоинства разработанной системы управления — простота исполнения, высокое динамическое качество, малые пульсации момента.

Ключевые слова: система управления асинхронным электроприводом, прямое управление моментом.

This paper proposes a direct torque control system of induction motor with decoupled control of rotor flux and electromagnetic torque. The simulation results of an induction motor drive show advantages of the developed control system: simplicity of implementation, high dynamic performance and low torque ripple.

Keywords: induction motor drive control system, direct torque control.

Широкое использование в различных областях машиностроения регулируемого асинхронного электропривода (ЭП) в настоящее время объясняется простотой конструкции, низкой стоимостью, налаженным производством и малыми затратами на обслуживание асинхронных электродвигателей (АД) с короткозамкнутым ротором. Для управления координатами ЭП широкое распространение получает метод векторного управления и его усовершенствование — метод прямого управления моментом (ПУМ) [1–3].

Главным недостатком классической векторной системы управления ЭП является ее сложная структура вследствие необходимости выполнения операций преобразования систем координат из неподвижной во вращающуюся, ориентированную по полю ротора, и обратно.

По сравнению с векторными системами управления ЭП системы ПУМ благодаря применению гистерезисных регуляторов и таблицы оптимальных переключений силовых ключей преобразователя частоты (ПЧ) обладают рядом достоинств — простота реализации, высокая динамика. Однако использование релейных регуляторов обуславливает возрастание коммутационных потерь в ПЧ и повышение пульсаций момента АД.

Для устранения отмеченных выше недостатков классических систем управления ЭП в статье предложена система ПУМ АД с отдельным управлением моментом и потокосцеплением ротора в неподвиж-



ОВСЯННИКОВ

Евгений Михайлович

доктор технических наук,
профессор кафедры
«Электротехника
и компьютеризированные
электромеханические
системы»
(МГТУ МАМИ)



НГУЕН

Куанг Тхиеу

кандидат технических
наук, докторант кафедры
«Электротехника
и компьютеризированные
электромеханические
системы»
(МГТУ МАМИ)

ной системе координат, связанной со статором. Это позволяет упростить структуру системы управления ЭП по сравнению с традиционными векторными системами за счет исключения блоков преобразования координат. При этом удастся сохранить высокое динамическое качество, присущее системам ПУМ, при применении способа широтно-импульсной модуляции (ШИМ) для формирования управляющего напряжения АД вместо релейных регуляторов и таблиц переключений силовых ключей.

Синтез контуров регулирования момента и потокосцепления ротора асинхронного двигателя

В ортогональной неподвижной системе координат (α, β), связанной со статором, процессы энергопреобразования в трехфазном АД при общепринятых допущениях можно описать следующей системой уравнений [3]:

$$\begin{cases} \pi_{s\alpha} = -k_1 i_{s\alpha} + k_3 \Psi_{r\alpha} + k_4 \omega_r \Psi_{r\beta} + u_{s\alpha} / L_\sigma; \\ \pi_{s\beta} = -k_1 i_{s\beta} - k_4 \omega_r \Psi_{r\alpha} + k_3 \Psi_{r\beta} + u_{s\beta} / L_\sigma; \\ p\Psi_{r\alpha} = k_2 R_r i_{s\alpha} - \Psi_{r\alpha} / T_r - \omega_r \Psi_{r\beta}; \\ p\Psi_{r\beta} = k_2 R_r i_{s\beta} - \Psi_{r\beta} / T_r + \omega_r \Psi_{r\alpha}; \\ M = 1,5z_p k_2 (\Psi_{r\alpha} i_{s\beta} - \Psi_{r\beta} i_{s\alpha}), \end{cases} \quad (1)$$

где u, i, Ψ, M — напряжение, ток, потокосцепление и электромагнитный момент; R, L — активное сопротивление и индуктивность; индексы « s, r, m » соответствуют величинам статора, ротора и контура намагничивания; ω_r — электрическая угловая частота вращения ротора; p — оператор дифференцирования; $T_r = L_r / R_r$ — постоянная времени; $\tau_r = \sigma T_r, \tau_s = L_\sigma / R_s$ — постоянные времени роторной и статорной цепей; $k_1 = 1/\tau_s + (1-\sigma)/\tau_r; k_2 = L_m / L_r; k_3 = L_m / (L_s \tau_r); k_4 = k_2 / L_\sigma; L_\sigma = \sigma L_s; \sigma = L_m^2 / (L_s L_r)$ — коэффициент рассеяния АД.

Продифференцировав последнее уравнение системы (1), получим новое уравнение, описывающее динамику изменения электромагнитного момента от воздействия управляющего напряжения:

$$pM = -M / T_0 + k_M U + k_M W_1, \quad (2)$$

где $T_0 = (1/\tau_s + 1/\tau_r)^{-1}; k_M = 1,5z_p k_2 / L_\sigma; U, W_1$ — управляющее и возмущающее воздействия контура регулирования момента,

$$U = \Psi_{r\alpha} u_{s\beta} - \Psi_{r\beta} u_{s\alpha}; \quad (3)$$

$$W_1 = -\omega_r (M_\Psi / k_M + k_2 \Psi_r^2) / k_M;$$

$$M_\Psi = 1,5z_p k_2 (\Psi_{r\alpha} i_{s\alpha} + \Psi_{r\beta} i_{s\beta}). \quad (4)$$

Умножив третье уравнение системы (1) на величину $\Psi_{r\alpha}$, а четвертое — на $\Psi_{r\beta}$, затем сложив их, получим:

$$(T_r / 2) p\Psi_r^2 = -\Psi_r^2 + k_\Psi M_\Psi, \quad (5)$$

где $k_\Psi = 2L_r / 3z_p; \Psi_r^2 = \Psi_{r\alpha}^2 + \Psi_{r\beta}^2$ — квадрат модуля вектора потокосцепления ротора.

Продифференцировав выражение (4) с учетом (1), находим

$$pM_\Psi = -M_\Psi / T_0 + k_M V + k_M W_2, \quad (6)$$

где V, W_2 — управляющее и возмущающее воздействия в контуре регулирования потока,

$$V = u_{s\alpha} \Psi_{r\alpha} + u_{s\beta} \Psi_{r\beta}; \quad (7)$$

$$W_2 = M\omega_r / k_M + k_2 \Psi_r^2 / T_r + k_2 R_r L_\sigma I_s^2.$$

Здесь $I_s^2 = i_{s\alpha}^2 + i_{s\beta}^2$ — квадрат модуля вектора тока статора.

Выведенные дифференциальные уравнения (2), (5) и (6) позволяют предложить структурную схему замкнутых контуров регулирования потокосцепления ротора и момента, представленную на рис. 1. Преобразователь частоты характеризуется чистым запаздыванием на время T_μ , равное периоду ШИМ. Верхним индексом «*» на рисунке обозначены задающие величины.

При стандартной настройке регуляторов по техническому оптимуму можно применить пропорционально-интегральные регуляторы момента и потокосцепления ротора со следующими передаточными функциями:

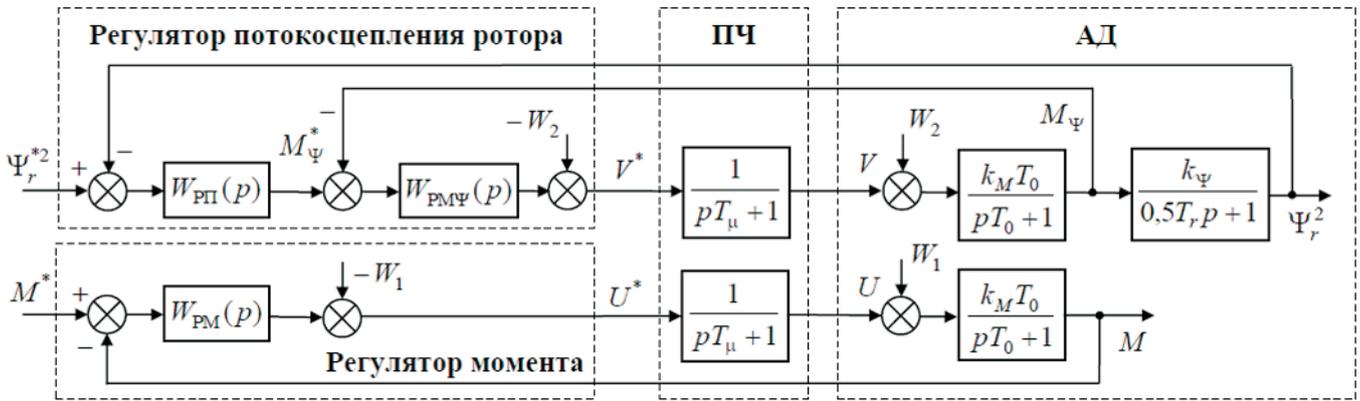


Рис. 1. Структурная схема замкнутых контуров регулирования потокосцепления ротора и момента АД

$$W_{PM}(p) = W_{PM\psi}(p) = K_{PM} + K_{IM} / p;$$

$$W_{p\psi}(p) = K_{p\psi} + K_{I\psi} / p,$$

где $K_{PM} = 1 / (2k_M T_M)$; $K_{IM} = K_{PM} / T_0$;
 $K_{p\psi} = T_r / (8k_\psi T_M)$; $K_{I\psi} = 2K_{p\psi}$.

Предложим систему ПУМ АД с функциональной схемой, показанной на рис. 2. На выходе регуляторов момента и потока формируются управляющие сигналы U^* , V^* , по которым можно определить задающие напряжения u_{sa}^* , u_{sb}^* для ПЧ в виде автономного инвертора напряжения (АИН) с ШИМ при совместном решении уравнений (3) и (7):

$$u_{sa}^* = \frac{V^* \Psi_{ra} - U^* \Psi_{rb}}{\Psi_r^2}; u_{sb}^* = \frac{U^* \Psi_{ra} + V^* \Psi_{rb}}{\Psi_r^2}. \quad (8)$$

Следует отметить, что в предложенной системе ПУМ АД использованы только элементарные вычислительные операции (сложение, вычитание, умножение, деление). Это позволяет использовать дешевые микропроцессы в системе управления приводом.

Имитационное моделирование асинхронного электропривода

Для оценки работоспособности предложенной системы ПУМ проведено моделирование системы асинхронного привода в среде Matlab—Simulink. Модель, построенная на основании функциональной схемы, представленной на рис. 2, включает в себя АД со следующими параметрами: $R_s = 14,85$ мОм, $R_r = 9,29$ мОм, $L_m = 10,46$ мГн, $L_s = 10,78$ мГн, $L_r = 10,81$ мГн, $z_p = 2$, номинальной мощностью 150 кВт, номинальным напряжением 220 В, приведенным к ротору АД моментом инерции 15 кгм², моментом нагрузки принятым равным 40 Нм. АД получает питание от инвертора напряжения с частотой модуляции 5 кГц. При моделировании были использованы стандартные блоки библиотеки приложения SimPowerSystems: АД, инвертора с синусоидальной ШИМ.

На рис. 3 представлены временные диаграммы развиваемого АД момента (M), его заданного значения в системе (M^*), скорости (N), фазного тока статора (i_{sa}) при разных темпах разгона (0...4 с), установившемся движении (4...5 с) и торможении (5...8 с). Модуль вектора пото-

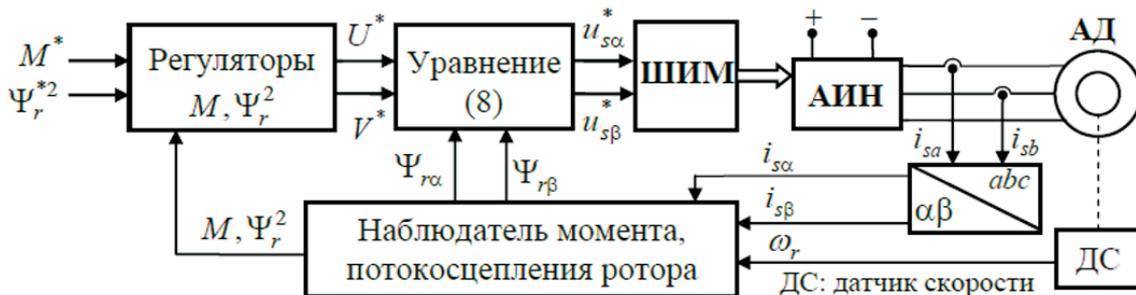


Рис. 2. Функциональная схема системы прямого управления моментом АД

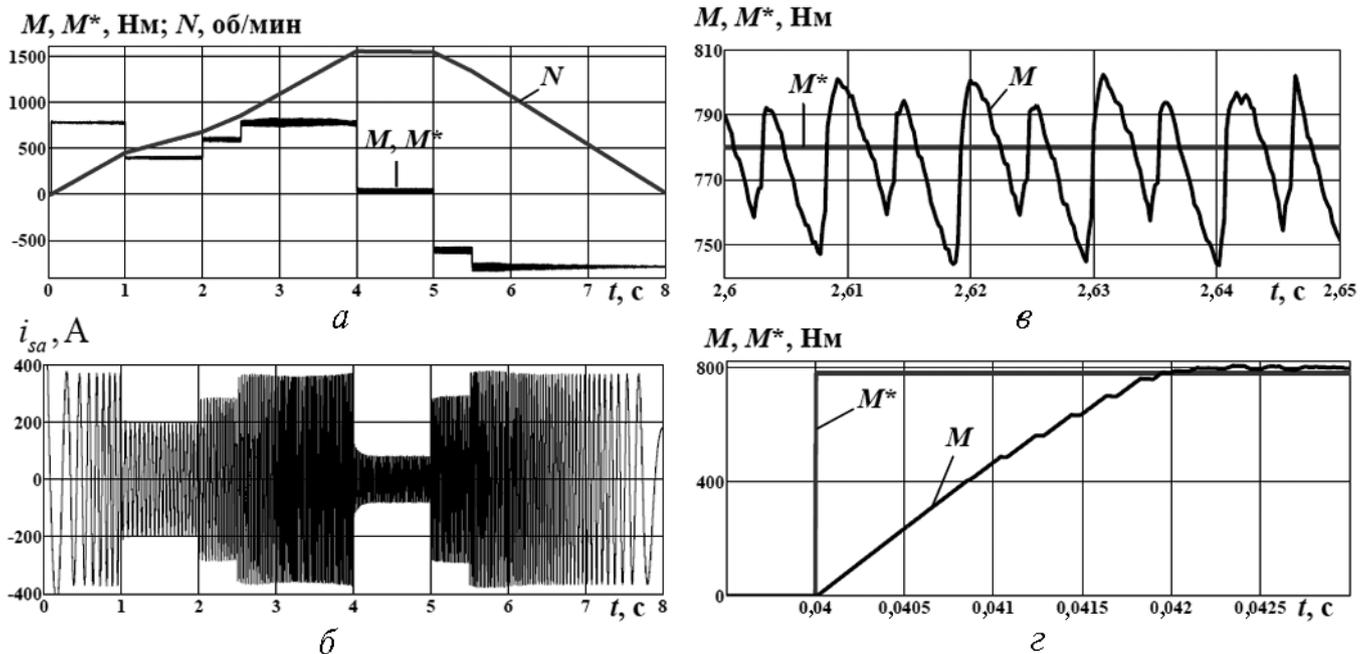


Рис. 3. Временные диаграммы:

a — момента и скорости вращения ротора; $б$ — фазного тока статора; $в, г$ — текущих и заданных значений момента при разгоне, установившемся движении и торможении электропривода

косцепления ротора поддерживается постоянным на номинальном уровне.

Как следует из полученных результатов моделирования, несмотря на простоту исполнения, предложенная система ПУМ АД гарантирует устойчивость системы управления, высокую динамику ЭП, высокую точность слежения за заданием момента при его малых пульсациях.

Выводы

1. В неподвижной системе координат, связанной со статором, разработана система ПУМ АД с непосредственным регулированием момента и потокосцепления ротора. Это позволяет упростить структуру системы управления ЭП за счет исключения операций преобразования координат, что дает возможность применить дешевые микропроцессы.

2. Предложенная система ПУМ АД обеспечивает высокие качества ЭП (высокое быстродействие, малые пульсации момента), что важно в различных практических применениях, например, в тяговых приводах электромобилей, гибридных автомобилей.

Литература

1. I. Takahashi, T. Noguchi. A new quick-response and high efficiency control strategy of an induction motor // IEEE Trans. Ind. Applications, Vol. 22. N. 5. 1986. P. 820—827.
2. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Барац Е.И. Адаптивная система прямого управления моментом асинхронного двигателя // Электротехника. № 11. 2001. С. 35—39.
3. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М. Изд. центр «Академия», 2007. 272 с.

Статья поступила в редакцию 26.05.2011 г.