

<https://doi.org/10.26160/2474-5901-2024-45-54-58>

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ БЕСКОЛЛЕКТОРНЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ

Якунин Д.А.

Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия

Ключевые слова: электродвигатель, алгоритм управления, момент, скорость вращения, система координат, динамическая нагрузка.

Аннотация. В статье представлен вариант алгоритма управления бесколлекторным электродвигателем в условном электромеханическом устройстве с динамической нагрузкой, оказываемой на вал через передаточную систему привода. Наиболее важными практическими задачами ставятся минимизация пульсаций тока и, как следствие, минимизация пульсации момента на валу управляемой электрической машины.

THE ALGORITHM FOR CONTROLLING A BRUSHLESS ELECTRIC MOTOR

Yakunin D.A.

Southwestern State University, Kursk, Russia

Keywords: electric motor, control algorithm, torque, rotation speed, coordinate system, dynamic load.

Abstract. The article presents a variant of the algorithm for controlling a brushless electric motor in a conventional electromechanical device with a dynamic load exerted on the shaft through a transmission drive system. The most important practical tasks are to minimize current ripples and, as a result, minimize the moment ripple on the shaft of a controlled electric machine.

Упрощённая схема управления электродвигателем приведена на рисунке 1.

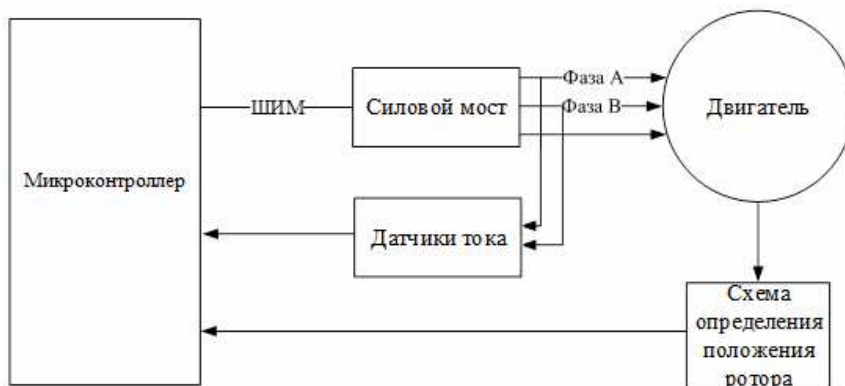


Рис. 1. Упрощенная схема управления электродвигателем

В качестве исполнительной машины выберем модель со встроенной системой определения положения вала, которая состоит из трёх датчиков Холла. Данным аппаратным средством положение вала электродвигателя может быть определено с точностью до ± 60 электрических градусов, в

зависимости от последовательности следования импульсов можно определить направление вращения вала. Вычисляя временные интервалы между сменами значений датчиков Холла можно определить скорость вращения вала электродвигателя. В разрыв фаз А и В поставим датчики тока, определяющие знак и модуль протекающих через статор фазных токов (выходное напряжение датчиков тока, изменяющееся в обе стороны относительно определенной средней точки, подается на АЦП микроконтроллера). [1]

На вал двигателя будет приложена динамически изменяющаяся нагрузка, не подвергающаяся прогнозированию.

Алгоритм прямого управления моментом электродвигателя с пространственно-векторной модуляцией напряжения с замыканием по контурам скорости и тока состоит в следующем.

1) Произвести чтение значений фазных токов I_A (фаза А), I_B (фаза В) из модуля АЦП.

2) Произвести вычисление частоты вращения ω_{fb} и угла φ положения вала двигателя с помощью таймера в режиме захвата.

3) Выполнить преобразование Кларка для перехода в Декартову систему координат согласно системе уравнений

$$\begin{cases} I_\alpha = I_A; \\ I_\beta = \frac{2 \cdot I_B - I_A}{\sqrt{3}}. \end{cases} \quad (1)$$

Этот переход необходим для упрощения вычисления вектора тока (далее I_α – проекция тока I_A на ось α , I_β – проекция тока I_B на ось β).

4) Выполнить преобразование Парка для перевода координат токов от неподвижных осей α и β , привязанных к статору двигателя, к вращающимся осям d и q , привязанным к валу электродвигателя (используя для этого угол φ положения вала), согласно системе уравнений 2 [2] (далее I_d – проекция тока I_α на ось d , I_q – проекция тока I_β на ось q):

$$\begin{cases} I_d = I_\beta \cdot \sin(\varphi) + I_\alpha \cdot \cos(\varphi); \\ I_q = I_\beta \cdot \cos(\varphi) - I_\alpha \cdot \sin(\varphi). \end{cases} \quad (2)$$

5) Выполнить вычисление ошибки по скорости согласно формуле

$$\varepsilon_\omega = \omega_{ref} - \omega_{fb}; \quad (3)$$

где ω_{ref} – заданная скорость вращения двигателя.

6) Выполнить пропорционально-интегрированное регулирование для уменьшения ошибки ε_ω и для получения значения момента $I_{q(ref)}$.

7) Выполнить вычисление ошибки значения потокосцепления [3] согласно формуле

$$\varepsilon_d = I_{d(ref)} - I_d. \quad (4)$$

8) Выполнить вычисление ошибки значения момента согласно формуле

$$\varepsilon_q = I_{q(ref)} - I_q. \quad (5)$$

9) Выполнить пропорционально-интегрированное регулирование для уменьшения ошибки ε_q и для получения поперечной компоненты напряжения $V_{q(ref)}$.

10) Выполнить пропорционально-интегрированное регулирование для уменьшения ошибки ε_d и для получения продольной компоненты напряжения $V_{d(ref)}$.

11) Выполнить обратное преобразование Парка согласно системе уравнений 6 (далее V_α и V_β – компоненты напряжений в двухфазной системе координат (α, β) , связанной с валом электродвигателя):

$$\begin{cases} V_\alpha = V_d \cdot \cos(\varphi) - V_q \cdot \sin(\varphi); \\ V_\beta = V_d \cdot \sin(\varphi) + I_q \cdot \cos(\varphi). \end{cases} \quad (6)$$

12) Выполнить вычисление значений сигналов напряжений в трехфазной системе координат (x, y, z) X, Y, Z (соответственно для каждой координаты), связанной со статором, согласно системам уравнений

$$\begin{cases} U_\alpha = \sqrt{3} \cdot V_\alpha \cdot T; \\ U_\beta = -V_\beta \cdot T; \end{cases} \quad (7)$$

где T – частота ШИМ;

$$\begin{cases} X = U_\beta; \\ Y = \frac{U_\alpha - U_\beta}{2}; \\ Z = \frac{U_\alpha + U_\beta}{2}. \end{cases} \quad (8)$$

13) Найти значения сектора на основании вычисленных значений X, Y, Z и таблицы 1.

Табл. 1. Определение сектора

	$Y < 0$			$Y \geq 0$		
	$Z < 0$	$Z \geq 0$		$Z < 0$	$Z \geq 0$	
		$X \leq 0$	$X > 0$	$X \leq 0$	$X > 0$	
Сектор	5	4	3	6	1	2

14) Выполнить вычисление периода ШИМ полумостов фаз A, B, C (соответственно t_A, t_B, t_C) согласно найденному значению сектора;

Для секторов 1, 4:

$$\begin{cases} t_A = \frac{T + X - Z}{2}; \\ t_B = t_A + Z; \\ t_C = t_B - X. \end{cases} \quad (9)$$

Для секторов 2, 5:

$$\begin{cases} t_A = \frac{T + Y - Z}{2}; \\ t_B = t_A + Z; \\ t_C = t_B + Y. \end{cases} \quad (10)$$

Для секторов 3, 6:

$$\begin{cases} t_A = \frac{T - X + Z}{2}; \\ t_B = t_C + X; \\ t_C = t_A - Y. \end{cases} \quad (11)$$

15) Задать значения периода ШИМ t_A , t_B , t_C в таймере.

16) Осуществить переход к шагу 1.

Практический результат работы алгоритма представлен на верхнем графике рисунка 2. Система управления с контурами регулирования по току и скорости имеет не периодичный переходной процесс, в котором отсутствуют длительные колебания при выходе на заданную скорость (на рисунке 2 $\omega_{ref} = 500$ об/мин).

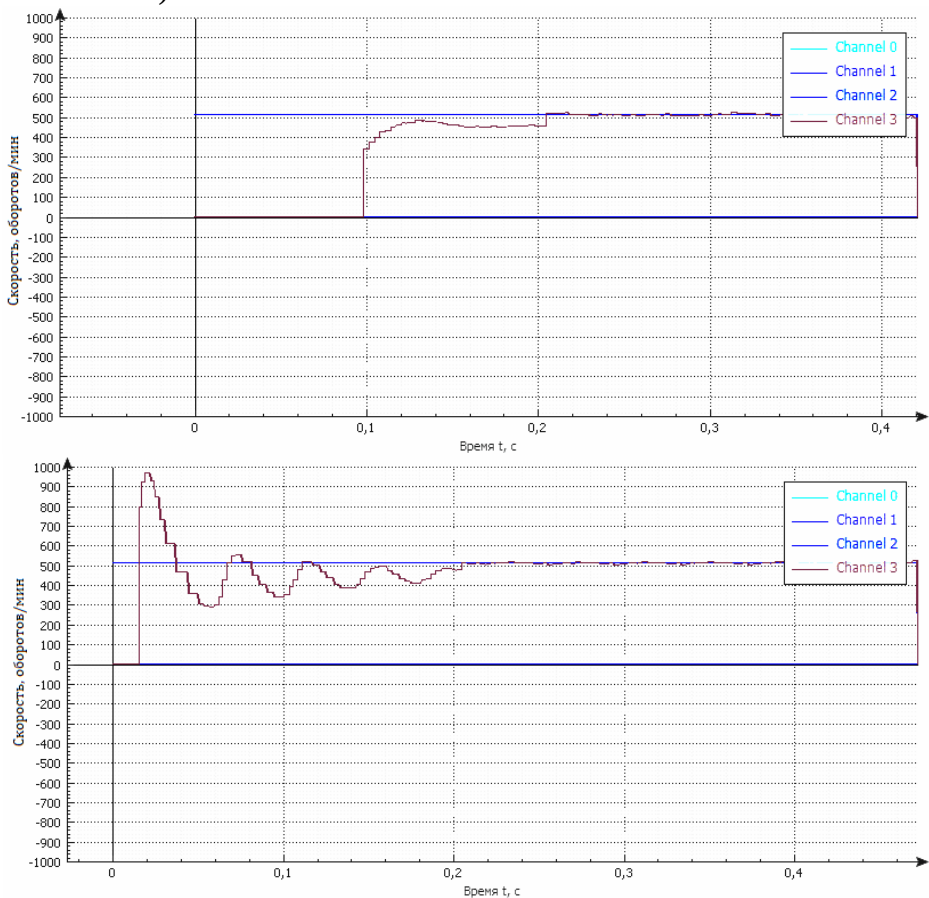


Рис. 2. Графики заданной и текущей скорости нагруженного вала электродвигателя

Для наглядной демонстрации скорости и плавности выхода на заданную скорость системы с 2 контурами управления на нижнем графике рисунка 2 приведен переходный процесс той же системы управления при разомкнутом контуре тока.

Алгоритм прямого управления моментом с пространственно-векторной модуляцией напряжения выступает безальтернативным решением для управления электродвигателем в составе устройств с динамической нагрузкой.

Список литературы

1. Marian P. Kazmierkowski, Leopoldo G. Franquelo, Jose Rodriguez, Marcelo A. Perez, Jose I. Leon. High-Performance Motor Drives // IEEE Industrial Electronics. 2011, no. 5, pp. 6-26. DOI: 10.1109/MIE.2011.942173.
2. Балковой А.П. Прецизионный электропривод с вентильными двигателями. – М.: Изд. дом МЭИ, 2010. – 250 с.
3. Cristian Busca Open loop low speed control for PMSM in high dynamic application. – Aalborg, Denmark: Aalborg universitet, 2010. – 110 p.

References

1. Marian P. Kazmierkowski, Leopoldo G. Franquelo, Jose Rodriguez, Marcelo A. Perez, Jose I. Leon. High-Performance Motor Drives // IEEE Industrial Electronics. 2011, no. 5, pp. 6-26. DOI: 10.1109/MIE.2011.942173.
2. Balkovoy A.P. Precision electric drive with valve motors. – M.: Publ. house of MEI, 2010. – 250 p.
3. Cristian Busca Open loop low speed control for PMSM in high dynamic application. – Aalborg, Denmark: Aalborg universitet, 2010. – 110 p.

Якунин Дмитрий Алексеевич – аспирант	Yakunin Dmitry Alekseevich – postgraduate student
yakunin99@bk.ru	

Received 18.12.2024