

## КОММУТАЦИЯ ОБМОТОК БЕСКОНТАКТНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ БЕЗДАТЧИКОВОМ УПРАВЛЕНИИ ПО ЭДС-ВРАЩЕНИЯ

В.Н. Енин  
А.В. Степанов

enin@bmstu.ru  
stepanov.bmstu@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Предложен метод бездатчикового управления коммутацией обмоток бесконтактного двигателя постоянного тока по углам поворота ротора, определенным по анализу ЭДС-вращения. Рассмотрен бесконтактный двигатель с постоянными магнитами на роторе и двумя секциями на статоре. Углы поворота ротора, при которых происходит коммутация обмоток, выбраны из условия равенства моментов, создаваемых секциями в углах включения и выключения обмоток. При вращении ротора равенство моментов определено по условию равенства ЭДС-вращения, индуцируемых в обмотках статора. Предложена функция, независимая от скорости вращения ротора и формирующая импульсы при равенстве ЭДС-вращения секций. Эта функция использована для определения моментов коммутации секций. Проведено моделирование конкретного бесконтактного двигателя постоянного тока дискового типа, что подтвердило эффективность предлагаемого метода при бездатчиковом управлении. Пульсации скорости вращения при предлагаемом методе управления бесконтактного двигателя постоянного тока составили ~ 0,01 %

### Ключевые слова

*Бесконтактный двигатель постоянного тока, бездатчиковое управление, углы положения ротора, потокосцепление, ЭДС-вращения*

Поступила в редакцию 19.02.2018  
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

---

**Введение.** Вентильные двигатели, в частности бесконтактный двигатель постоянного тока (БДПТ, Brushless DC Motor, BLDC), благодаря своим очевидным достоинствам нашли широкое применение в приборостроении, научных измерительных приборах, системах управления летательными аппаратами, робототехнике, в системах управления технологическими процессами [1–4]. В то же время электропривод с БДПТ требует наличия датчика положения ротора и силового полупроводникового преобразователя для формирования сигналов управления электронным коммутатором, что усложняет конструкцию и повышает цену электропривода с БДПТ. Синусоидальные сигналы, выработанные датчиком положения ротора, не идеальны и требуют компенсации погрешностей, возникающих вследствие сдвига нуля реального сигнала, фазового сдвига, искажения формы сигнала. Упростить конструкцию позволяют методы бездатчикового управления коммутацией обмотками бесконтактного двигателя [5–11]. Методы бездатчикового управ-

ления основаны на анализе зависимости потокосцепления или ЭДС-вращения секции от угла положения ротора. Анализ этих зависимостей позволяет определить характерные точки на кривой, по которым вырабатываются в реальном масштабе времени сигналы управления коммутацией обмоток двигателя. Однако в случае бездатчикового управления БДПТ возникают следующие проблемы. Сигнал, формируемый на основе потокосцепления, вследствие работы широтно-импульсного модулятора имеет помехи в виде высокочастотной составляющей, кроме того, сигнал содержит также импульсы, возникающие при работе ключей инвертора. На сигнал, сформированный на основе потокосцепления, оказывает влияние скорость вращения ротора. При малой скорости вращения, в том числе при пуске, ЭДС-вращения также мала или равна нулю и возникают трудности с выделением полезного сигнала. При большой скорости вращения существенно увеличивается погрешность определения угла поворота ротора за счет задержки, возникающей в канале обработки измеренных сигналов.

Для управления двухфазным вентильно-индукторным двигателем с самовозбуждением в [5] предлагается алгоритм бездатчикового управления, использующий зависимость потокосцепления от тока секции только в точках согласованного положения ротора (точках устойчивого положения равновесия). В этих точках согласованного положения потокосцепление при соответствующем токе принимает максимальное значение. Потокосцепление рассчитывается интегрированием ЭДС-вращения, вычисляемой по напряжению и току секции. При этом вычисление потокосцепления интегрированием приводит к накоплению погрешности, пропуску точек синхронизации и вследствие этого к ненадежной работе алгоритма. Для устранения этого недостатка введен коэффициент запаса, при котором точка синхронизации всегда оказывается на возрастающем участке зависимости потокосцепления от тока. Этот алгоритм используется в зоне высоких скоростей. В зоне низких скоростей используется другой алгоритм — на основе вычисления индуктивности секции, которая в области рассогласованного положения не зависит от уровня тока. Недостатком этих алгоритмов является ненадежное и недостаточно точное определение углов коммутации двигателя, что может привести к нарушению функционирования двигателя.

В работах [6, 7] управление коммутацией обмоток осуществляется с помощью определения точки прохождения ЭДС-вращения отключенной секции через ноль. Коммутацию необходимо производить через 30 электрических градусов после прохождения противоЭДС отключенной секции через ноль. Для определения момента коммутации в [5] используется аппроксимация зависимости ЭДС-вращения секции от угла поворота ротора, при этом параметры аппроксимации определяются с помощью метода наименьших квадратов. Недостатком метода определения момента коммутации по противоЭДС является зависимость величины ЭДС-вращения от скорости вращения ротора, что приводит к ошибке при определении времени коммутации обмоток.

В [8, 9] для определения момента коммутации предлагается использовать  $G$ -функцию (функцию потокосцепления), которая не зависит от скорости вра-

щения ротора и, по сути, представляет собой отношение потокосцеплений секций, вычисленных по напряжению и току секции. Эта функция в моменты прохождения ЭДС-вращения через ноль имеет экстремумы. На основе использования  $G$ -функции в работе [10] разработан адаптивный алгоритм компенсации ошибки коммутации. Высокочастотная составляющая, создаваемая широтно-импульсным модулятором, устраняется фильтром низких частот. Определение моментов коммутации по экстремумам  $G$ -функции усложняется присутствием импульсов, создаваемых диодами коммутатора. Точки экстремума  $G$ -функции определяются путем сравнения с некоторым задаваемым уровнем (пороговым значением), с помощью которого можно программно отфильтровать импульсы, создаваемые диодами коммутатора. Недостатком этого алгоритма является необходимость точного задания порогового значения, что может привести к ошибкам определения моментов коммутации секций двигателя.

В настоящей работе рассматривается алгоритм бездатчикового управления бесконтактным двигателем постоянного тока с постоянными магнитами дискового типа. Алгоритм определения угла коммутации и его коррекции для повышения точности основан на анализе предлагаемой функции  $H(t)$ , построенной с использованием ЭДС-вращения секции. Функция представляет собой отношение ЭДС-вращения одной секции двигателя к ЭДС-вращения второй секции. Эта функция, по сути, является  $G$ -функцией для двухфазного двигателя [7–9]. В предлагаемом алгоритме коммутация обмоток производится по импульсам функции  $H(t)$ . Главное достоинство этой функции — независимость от скорости вращения. Значение функции вычисляется в реальном масштабе времени по измеренному напряжению и току на секциях двигателя.

**Математическая модель БДПТ дискового типа.** Рассматриваемый БДПТ содержит силовой блок, который состоит из ротора, закрепленного на вращающемся валу. Ротор представляет собой немагнитный диск с отверстиями, в которых находятся постоянные магниты. Ротор в рассматриваемой конструкции является индуктором. Статор имеет следующую конструкцию: стальной кожух, являющийся ферромагнитным экраном, и скрепленный с ним немагнитный, непроводящий диск с отверстиями, с обеих сторон которого крепятся катушки обмоток якоря. На статоре расположены катушки секций, а на роторе имеются две пары полюсов. Обмотка якоря состоит из двух секций, каждая из которых имеет по шесть катушек. Каждая соседняя катушка в секции имеет противоположное направление намотки. Катушки расположены по окружности и сдвинуты относительно друг друга на полюсное деление  $\tau$ , угловой сдвиг между катушками одной секции равен  $2\pi/6$  (рад). Секции сдвинуты относительно друг друга на половину полюсного деления, угловой сдвиг  $\pi/6$  (рад). Каждая секция подсоединена к выходным зажимам электронного коммутатора. Двигатель является двухфазным, секции разомкнутого типа питаются от независимого источника постоянного напряжения через коммутатор. Питание обмоток реверсивное. Питание секций обмоток двигателя производится с помощью преобразователя [11] и инвертора для коммутаций секций обмоток БДПТ. Функциональная схе-

ма силового преобразователя [7] приведена на рис. 1. Преобразователь состоит из транзистора  $T_b$  и фильтра с индуктивностью  $L_\phi$  и емкостью  $C_\phi$ . Инвертор, транзисторы ( $T_1$ – $T_8$ ) на межкоммутационных интервалах подают на секции двигателя напряжение нужной полярности.

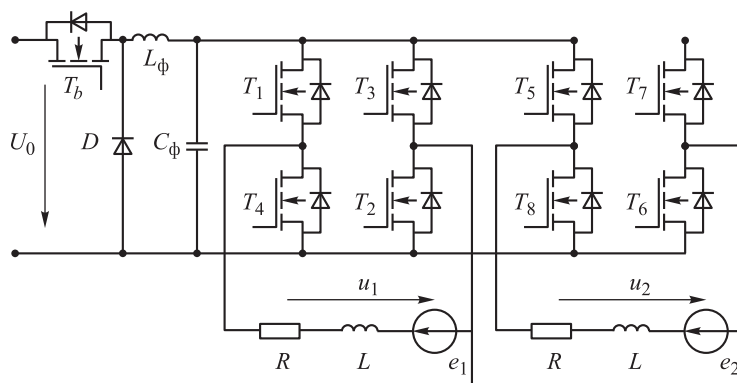


Рис. 1. Схема питания двухсекционного БДПТ

Уравнения электрического равновесия для двух секций БДПТ дискового типа имеют вид

$$u_1(t) = R_{i_1} + L \frac{di_1}{dt} + e_1(t), \quad (1)$$

$$u_2(t) = R_{i_2} + L \frac{di_2}{dt} + e_2(t), \quad (2)$$

где  $u_1(t)$ ,  $u_2(t)$  — напряжения, подаваемые на секции статора двигателя;  $R$  — активное сопротивление обмотки секции;  $L$  — индуктивность обмотки секции;  $i_1(t)$ ,  $i_2(t)$  — токи, протекающие в обмотках секций двигателя;  $e_1(t)$ ,  $e_2(t)$  — противоЭДС, индуцируемые постоянными магнитами ротора. В уравнениях (1), (2) противоЭДС приближенно можно считать синусоидальными, тогда

$$e_1(t) = E_m \sin(3\omega t), \quad (3)$$

$$e_2(t) = -E_m \cos(3\omega t), \quad (4)$$

где  $E_m = 3\omega\psi_m$ ; число пар полюсов  $p = 3$ .

Углы включения и отключения секции должны быть расположены на интервале  $[\theta_{ns}, \theta_s]$ , где  $\theta_s$ ,  $\theta_{ns}$  — устойчивое и неустойчивое положения равновесия при включенной секции. При вращении ротор движется от неустойчивого положения равновесия  $\theta_{ns}$  к устойчивому положению  $\theta_s$ . Примем  $\omega = \text{const}$ . Тогда на межкоммутационном интервале включения и выключения секции  $[t_{\text{вкл}}, t_{\text{отк}}]$ ,  $t_{\text{вкл}} = \theta_{\text{вкл}} / (3\omega)$ ,  $t_{\text{отк}} = \theta_{\text{отк}} / (3\omega)$  ток в секции

$$i(t) = \frac{U_0}{R} - i_s(t) + \left( I_{\text{вкл}} - \frac{U_0}{R} + i_s(t_{\text{вкл}}) \right) e^{-(t-t_{\text{вкл}}) / \tau_1},$$

$$i_s(t) = \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \sin(3\omega t + \varphi_{\text{вкл}}),$$

где  $\varphi_{\text{вкл}} = \arctg(\omega L / R)$ ,  $\tau_1 = R / L$ .

На межкоммутационном интервале отключения секции  $[t_{\text{отк}}, t_{\text{вкл}}]$  ток в секции быстро уменьшается и определяется зависимостью

$$i(t) = (I_{\text{отк}} + i_{\text{sof}}(t_{\text{отк}})) e^{-(t-t_{\text{отк}})/\tau_2} - i_{\text{sof}}(t),$$

$$i_{\text{sof}}(t) = \frac{E_m}{\sqrt{R_{\text{отк}}^2 + (\omega L)^2}} \sin(3\omega t + \varphi_{\text{отк}}),$$

где  $\varphi_{\text{отк}} = \arctg(\omega L / R_{\text{отк}})$ ,  $\tau_1 = R_{\text{отк}} / L$ .

Поскольку магнитный поток, создаваемый током катушек статора, очень мал, то поток возбуждения определяется в основном потоком, создаваемым постоянными магнитами. В этом случае реакцию якоря учитывать не будем, не будем также учитывать (в соответствии со сделанными предположениями) взаимоиндукции катушек первой и второй секций. Магнитное сопротивление постоянных магнитов ротора очень велико, вследствие этого индуктивности секций малы. Тогда, пренебрегая трансформаторными ЭДС и индуктивностями секций, токи на интервалах включения секций будут равны

$$i_1 = \frac{\pm U_0 - E_m \sin 3\theta}{R}, \quad (5)$$

$$i_2 = \frac{\pm U_0 - E_m \cos 3\theta}{R}. \quad (6)$$

С учетом уравнений (3)–(6) электромагнитный момент секций на интервалах коммутации секций соответственно равен:

$$M_1 = \frac{E_m}{\omega R} (\pm U_0 \sin 3\theta - E_m \sin^2 3\theta), \quad (7)$$

$$M_2 = \frac{E_m}{\omega R} (\pm U_0 \cos 3\theta - E_m \cos^2 3\theta), \quad (8)$$

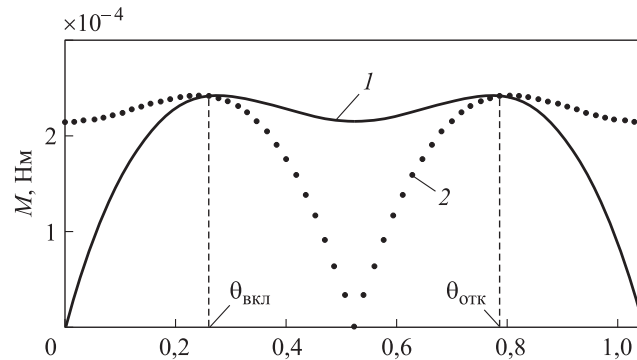
где  $\pm U_0$  — напряжение, подаваемое на коммутируемую секцию.

Электромагнитный момент, развиваемый двигателем, равен сумме электромагнитных моментов секций (7), (8):

$$M_s(\theta) = M_1(\theta) + M_2(\theta) = \frac{1}{\omega} (e_1(\omega t) i_1(\omega t) + e_2(\omega t) i_2(\omega t)).$$

Зависимость электромагнитных моментов первой и второй секций от угла поворота ротора приведена на рис. 2. Зависимость предполагает одновременную работу двух секций, коммутации секций производятся при переходе противоЭДС через ноль.

При одновременной работе секций максимальное и среднее значения электромагнитного момента больше, чем при поочередной работе секций, но при



**Рис. 2.** Зависимость электромагнитных моментов секций БДПТ от угла поворота ротора: 1 — электромагнитный момент первой секции; 2 — электромагнитный момент второй секции

этом существенно увеличиваются пульсации момента до недопустимого значения. Минимальное значение пульсации при коммутации секций с источником постоянного напряжения можно получить при поочередной работе секций. При такой работе секций отключение одной секции и включение другой целесообразно производить при условии равенства моментов, создаваемых первой и второй секциями в момент коммутации:

$$M_1(\theta_{\text{вкл}}) = M_2(\theta_{\text{отк}}), \quad (9)$$

$$M_1(\theta_{\text{отк}}) = M_2(\theta_{\text{вкл}}). \quad (10)$$

Углы коммутации секций при выполнении условий (9), (10) приведены на рис. 2. При постоянном напряжении, подаваемом на секции, и сделанных допущениях при равенстве абсолютных значений ЭДС-вращения индуцируемые в секциях моменты будут равны

$$|e_1(\theta_{\text{вкл}})| = |e_2(\theta_{\text{отк}})|, \quad (11)$$

$$|e_1(\theta_{\text{отк}})| = |e_2(\theta_{\text{вкл}})|. \quad (12)$$

Тогда, учитывая уравнения (3), (4), углы коммутации секций (отключение одной секции и включение другой) соответственно будут равны  $15^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $75^\circ$ ,  $105^\circ$  и т. д. Индуцируемые в секциях ЭДС-вращения можно вычислить, используя уравнения (1) и (2) по напряжению и току секции:

$$e_1(t) = u_1(t) - Ri_1 - L \frac{di_1}{dt},$$

$$e_2(t) = u_2(t) - Ri_2 - L \frac{di_2}{dt}.$$

**Алгоритм бездатчикового управления двухсекционного БДПТ.** При определении моментов коммутации секций введем функцию, которая формирует импульсы, когда угол поворота ротора равен углу включения или отключения секции:

$$H(t) = \frac{(u_1(t) - R_{i_1} - L'_{i_1})^2 + (u_2(t) - R_{i_2} - L'_{i_2})^2}{(u_1(t) - R_{i_1} - L'_{i_1})^2 - (u_2(t) - R_{i_2} - L'_{i_2})^2},$$

где  $i'_1 = \frac{di_1}{dt}$ ,  $i'_2 = \frac{di_2}{dt}$ . Функция  $H(t)$  не зависит от скорости вращения ротора и может быть использована в широком диапазоне скоростей. Числитель функции  $H(t)$ , с учетом зависимости ЭДС-вращения секций от угла поворота ротора, положителен и близок к константе, а знаменатель при равенстве ЭДС-вращения секций равен нулю и меняет знак. Поэтому при вращении ротора в окрестности угла поворота, в котором ЭДС-вращения секций равны, возникают два импульса противоположной полярности. Поскольку питание секций реверсивное, то при каждой следующей коммутации секции необходимо поменять полярность напряжения, подводимого к секции.

Порядок следования импульсов может быть положительный–отрицательный или отрицательный–положительный и определяется порядком следования моментов включения и выключения секции. Для вычисления угла коммутации, моментов включения или выключения секции задается пороговое значение  $H_n$  функции  $H(t)$ , при превышении которого определяется угол коммутации секции. При вычислении максимальных значений импульсов функции  $H(t)$  эти значения могут существенно отличаться, поэтому пороговое значение должно быть меньше возможного минимального значения импульса. Кроме импульсов, функция  $H(t)$  содержит шум, вызываемый импульсами, создаваемыми работой широтно-импульсного преобразователя (транзистор  $T_b$ ) и переходными процессами. Вследствие этого пороговое значение следует выбирать достаточно большим, чтобы шум не приводил к ошибочному определению моментов коммутации секций двигателя. Рассмотрим алгоритм бездатчикового управления коммутацией секций БДПТ подробнее.

На межкоммутационном интервале включения первой секции открыты транзисторы  $T_1$ – $T_2$ , полярность ЭДС-вращения положительная, напряжение  $u_1(t) = U_0$  положительное. Отключение первой секции и включение второй производится при возникновении импульсов функции  $H(t)$ . На следующем межкоммутационном интервале работает вторая секция, открыты транзисторы  $T_5$ – $T_6$ , полярность ЭДС-вращения второй секции положительная, напряжение, подаваемое на секцию,  $u_2(t) = U_0$ . При отключении второй и включении первой секции порядок следования импульсов функции  $H(t)$  отрицательный, затем положительный. На следующих межкоммутационных интервалах направление тока в секциях меняется на противоположное. В этом случае на интервале включения первой секции открыты транзисторы  $T_3$ – $T_4$ , полярность ЭДС-вращения отрицательная, напряжение  $u_1(t) = -U_0$ . При отключении второй секции и включении первой порядок следования импульсов положительный, затем отрицательный. На следующем межкоммутационном интервале работает вторая секция, открыты транзисторы  $T_7$ – $T_8$ , полярность ЭДС-вращения второй секции отрицательная.

Напряжение, подаваемое на вторую секцию, равно  $u_2(t) = -U_0$ . Отключение второй секции и включение первой производится по импульсам, порядок следования которых отрицательный–положительный. Затем описанная процедура коммутации секций двигателя повторяется. Для рассматриваемого бесконтактного двигателя межкоммутационные интервалы, напряжения секций, знак ЭДС-вращения секций, порядок следования импульсов функции  $H(t)$  приведены в таблице. В последнем столбце таблицы приведен порядок следования импульсов  $H(t)$  при переходе к следующему межкоммутационному интервалу.

**Коммутация секций бесконтактного двигателя**

Межкоммутационные интервалы	Напряжение секций		ЭДС-вращения секций		Порядок следования импульсов $H(t)$
	$u_1(t)$	$u_2(t)$	$e_1(t)$	$e_2(t)$	
15...45°	$U_0$	0	+	- +	+ -
45...75°	0	$U_0$	+ -	+	- +
75...105°	$-U_0$	0	-	+ -	+ -
105...135°	0	$-U_0$	- +	-	- +

Из анализа таблицы следует, что управляющие сигналы для инвертора можно формировать, используя значения напряжений секций и знака импульса функции  $H(t)$ .

При включенной первой секции и положительном напряжении  $U_0$  при поступлении импульса положительной полярности функции  $H(t)$  первая секция отключается, вторая секция подключается к источнику напряжения положительной полярности. Если первая секция подключена к источнику отрицательного напряжения, то при поступлении положительного импульса секция отключается, а вторая секция подключается к источнику напряжения отрицательной полярности.

При работе второй секции, если коммутируемое напряжение положительное, то по отрицательному импульсу  $H(t)$  вторая секция отключается, а первая секция подключается к источнику отрицательной полярности. Если вторая секция подключена к источнику отрицательной полярности, то при поступлении импульса функции  $H(t)$  отрицательной полярности секция отключается, а первая секция подключается к источнику напряжения положительной полярности.

Отрицательный и положительный импульсы функции  $H(t)$ , возникающие в окрестности равенства противоЭДС секций, приведены на рис. 3.

Вычисление функции  $H(t)$  производится после оцифровки аналоговых сигналов напряжений и токов секций, в дискретные моменты времени. В аналоговых сигналах присутствует высокочастотный шум, создаваемый широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) и импульсами, возникающими при работе ключей инвертора, что усложняет определение моментов коммутации с использованием функции  $H(t)$ . Функция  $H(t)$  вычисляется микропроцессором. Точность вычисления функции  $H(t)$  и соответственно импульсов, по которым



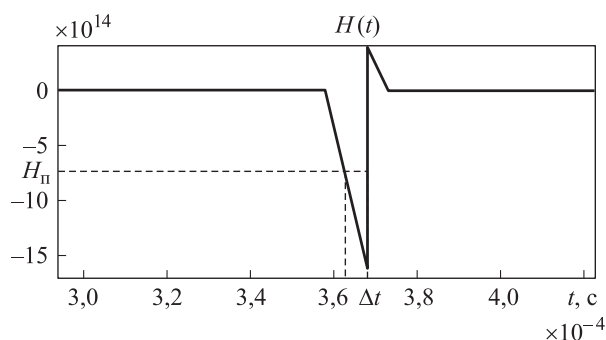


Рис. 3. Отрицательный и положительный импульсы функции  $H(t)$

определяются моменты коммутации, зависит от частоты дискретизации сигнала. Выбор частоты дискретизации  $f_s$  входного сигнала осуществляется по максимально возможной скорости вращения ротора  $\omega$ . Частота дискретизации определяет интервал дискретизации  $\Delta t_d$ , с которой производится выборка аналогового сигнала. Если интервал дискретизации слишком велик, то это может привести к тому, что импульсы функции  $H(t)$  не будут выделены и коммутация обмоток не будет выполнена. Точность определения момента коммутации также зависит от значения порога  $H_{\text{п}}$ , неправильный выбор порога может также привести к нарушению синхронной работы двигателя.

Схема [7], приведенная на рис. 1, позволяет существенно снизить влияние этих факторов. Фильтр  $L_{\text{ф}}$ ,  $C_{\text{ф}}$  снижает высокочастотный шум, а частота работы ключей инвертора синхронизирована с частотой вращения ротора двигателя. Увеличение порога  $H_{\text{п}}$  для формирования сигнала коммутации секций повышает точность определения момента коммутации, но при слишком большом пороге может приводить к пропуску точки синхронизации и нарушению устойчивой работы двигателя. Ширину импульса  $\Delta t$  для заданного порога определения момента коммутации  $H_{\text{п}}$  функции  $H(t)$  находят из условий

$$\frac{1}{H(t_0)} = 0, \quad \frac{1}{H(t_0 - \Delta t)} = \frac{1}{H_{\text{п}}},$$

где  $t_0$  — момент времени, при котором выполняются условия (11), (12);  $\Delta t$  — ширина импульса при  $H(t) = H_{\text{п}}$ . Учитывая, что приближенно противоЭДС определяются уравнениями (3) и (4), получаем

$$\sin^2(3\omega(t_0 - \Delta t)) - \cos^2(3\omega(t_0 - \Delta t)) = \frac{1}{H_{\text{п}}},$$

$$\sin^2(3\omega(t_0)) - \cos^2(3\omega(t_0)) = 0.$$

Решая эти уравнения, находим

$$\Delta t = \frac{1}{3\omega} \arccos \sqrt{\frac{H_{\text{п}}}{1 + H_{\text{п}}}}.$$

Интервал дискретизации для надежного определения момента коммутации должен быть выбран из условия  $\Delta t_d \ll \Delta t$ , например  $\Delta t_d = \Delta t / 5$ . Тогда частота дискретизации  $f_s = 1 / \Delta t_d$ .

При угловой скорости вращения ротора  $\omega$  и пороге  $H_{п}$  ошибка в определении угла коммутации секции будет равна  $\Delta\theta = 3\omega\Delta t$ .

Для порогового значения  $H_{п} = 1000$  и частоты вращения ротора  $n = 1000$  об/мин получаем

$$\Delta t = \frac{1}{3 \cdot 104,7} \arccos\left(\frac{1000}{1+1000}\right) = 0,000426 \text{ с.}$$

Ошибка определения угла коммутации секции соответственно равна

$$\Delta\theta = 3 \frac{2\pi \cdot 1000}{60} 0,000426 = 0,1338 \text{ рад.}$$

На рис. 4 приведена зависимость ошибки угла коммутации секции от порогового значения  $H_{п}$  функции  $H(t)$ .

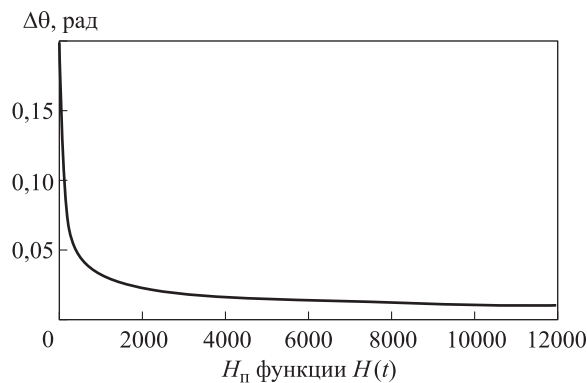


Рис. 4. Зависимость ошибки угла коммутации от порогового значения  $H_{п}$

Предлагаемый алгоритм бесконтактного управления коммутацией обмоток двухсекционного БДПТ исследовался при помощи расширения Simulink пакета MATLAB. Частота вращения ротора была равной 1000 об/мин. Результаты моделирования: вид функции  $H(t)$ , токи в обмотках двигателя  $i_1(t)$ ,  $i_2(t)$ , электромагнитный момент и угловая скорость вращения ротора приведены на рис. 5.

Проведенное моделирование БДПТ подтверждает устойчивое функционирование предлагаемого метода бездатчикового управления коммутацией обмоток секций двигателя. Для заданного режима работы получены следующие характеристики: пульсации момента составляли  $\sim 18\%$ , пульсации скорости при минимальном моменте инерции составили  $\sim 0,01\%$ . Результаты получены для установившегося режима при постоянном моменте сопротивления без системы управления стабилизацией момента. Ошибка определения угла коммутации секций составляла  $\sim 0,4^\circ$ .

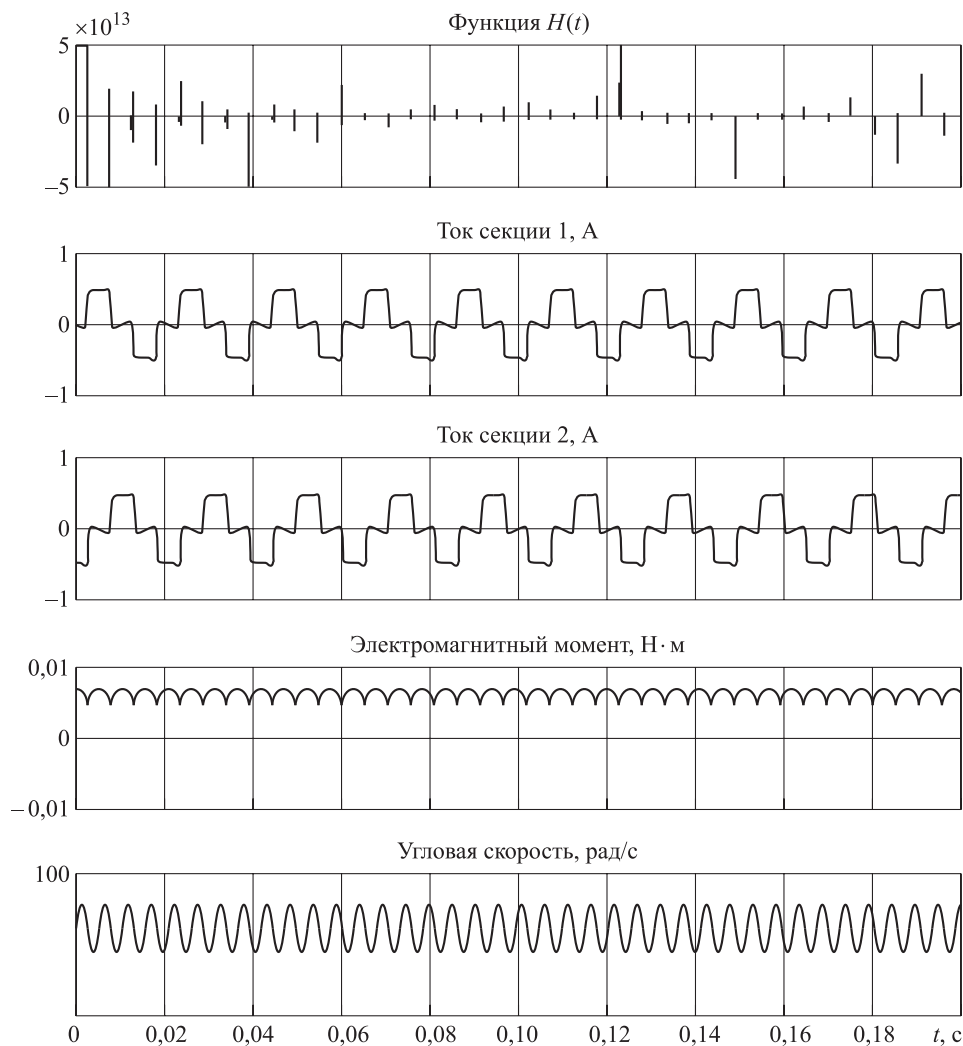
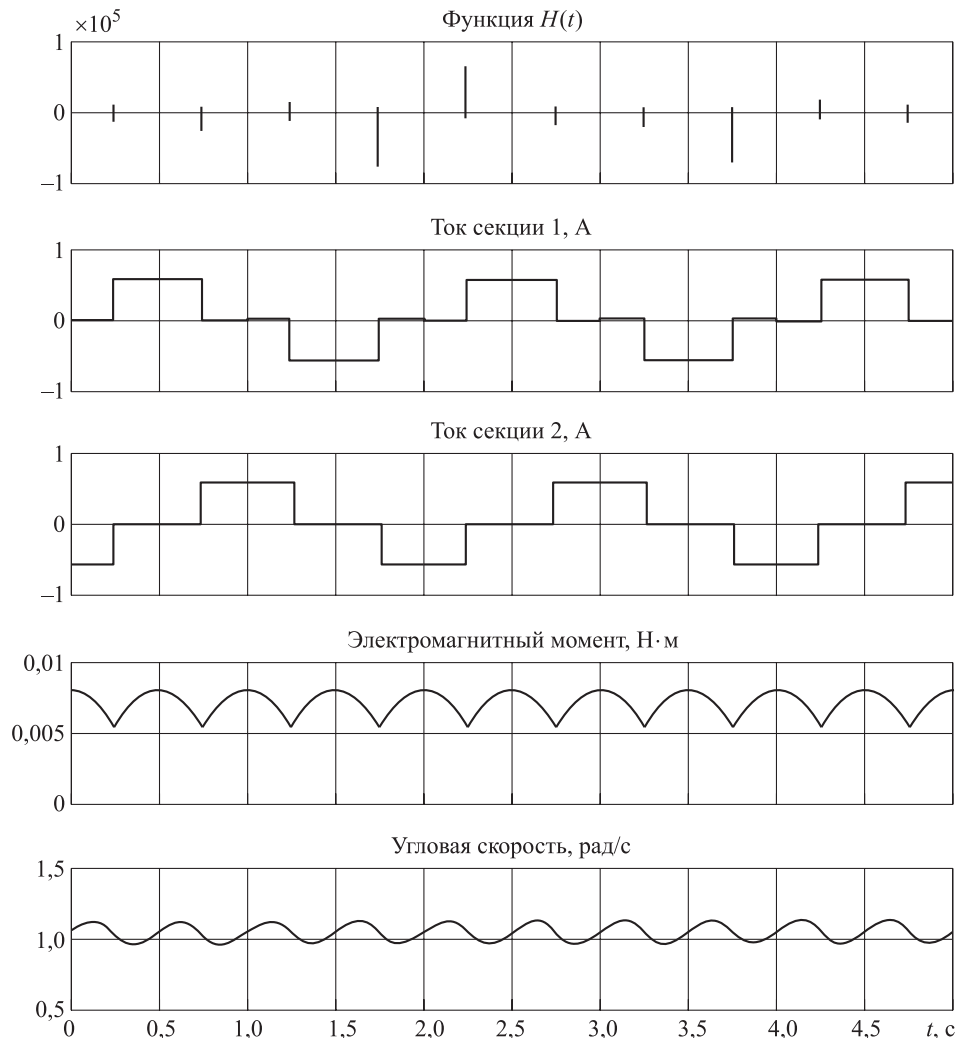


Рис. 5. Результаты моделирования БДПТ при бездатчиковом управлении коммутацией обмоток

Также проведены исследования работы БДПТ при существенном понижении угловой скорости вращения ротора (до 10 об/мин). Предлагаемый алгоритм обеспечил устойчивую коммутацию обмоток двигателя БДПТ. Результаты моделирования приведены на рис. 6.

**Заключение.** Предложен новый алгоритм бездатчикового управления коммутацией секций БДПТ. Алгоритм бездатчикового управления на основе введенной  $H(t)$  функции, построенной с использованием противоЭДС секций двигателя, позволяет определить углы ротора, при которых необходимо производить коммутацию секций. Функция  $H(t)$  не зависит от скорости вращения ротора, что позволяет применять ее в широком диапазоне скоростей ротора. Углы коммутации определяются с помощью порогового значения  $H_n$  функции  $H(t)$ , которое следует выбирать, исходя из требуемой точности определения угла



**Рис. 6.** Результаты моделирования коммутации обмоток БДПТ при малой скорости вращения  $n = 10$  об/мин

коммутации. В соответствии с выбранным порогом получена оценка для требуемого интервала дискретизации, при которой для соответствующей скорости вращения не происходит пропуск точек синхронизации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аракелян А.К., Афанасьев А.А. Вентильные электрические машины и регулируемый электропривод. Кн. 1: Вентильные электрические машины. М.: Энергоатомиздат, 1997. 509 с.
2. Цаценкин В.К. Безредукторный автоматизированный электропривод с вентильными двигателями. М.: Изд-во МЭИ, 1991. 240 с.
3. Овчинников И.Е. Теория вентильных электрических двигателей. Л.: Наука, 1985. 336 с.

4. *Гридин В.М.* Бесконтактный двигатель постоянного тока с коммутацией обмотки двумя транзисторами // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2017. № 4. С. 54–63. DOI: 10.18698/0236-3933-2017-4-54-63
5. *Алямкин Д.И.* Алгоритмы бездатчикового управления двухфазным вентильно-индукторным двигателем // Электричество. 2011. № 8. С. 49–55.
6. *Guo R.Ch., Cheng Zh.M., Li J.D.* Research on position sensorless control system of high-speed brushless DC motor // 9th Int. Conf. on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics. 2017. P. 62–65. DOI: 10.1109/IHMISC.2017.21
7. *Li H., Zheng Sh., Ren H.* Self-correction of commutation point for high-speed sensorless BLDC motor with low inductance and nonideal back EMF // IEEE Transactions on Power Electronics. 2017. Vol. 32. No. 1. P. 642–651. DOI: 10.1109/TPEL.2016.2524632
8. *Jung D.H., Ha I.J.* Low-cost sensorless control of brushless DC motors using a frequency-independent phase shifter // IEEE Transaction on Power Electronics, 2000. Vol. 15. No. 4. P. 296–302. DOI: 10.1109/63.849045
9. *Chlandy R., Kosh C.* Flatness-based tracking of an electromechanical variable valve timing actuator with disturbance observer feedforward compensation // IEEE Transaction on Control System Technology. 2008. Vol. 16. No. 4. P. 652–663. DOI: 10.1109/TCST.2007.912121
10. *Adaptive* commutation error compensation strategy based on a flux linkage function for sensorless brushless DC motor drives in a wide speed range / Sh. Chen, X. Zxou, G. Bai, K. Wang, L. Zhu // IEEE Transaction on Power Electronics. 2018. Vol. 33. No. 5. P. 3752–3764. DOI: 10.1109/TPEL.2017.2765355
11. *Fang J., Li H., Han B.* Torque ripple reduction in BLDC torque motor with nonideal back EMF // IEEE Transactions on Power Electronics. 2012. Vol. 27. No. 11. P. 4630–4637. DOI: 10.1109/TPEL.2011.2176143

**Енин Виталий Николаевич** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Электротехника и промышленная электроника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Степанов Анатолий Владимирович** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Электротехника и промышленная электроника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Енин В.Н., Степанов А.В. Коммутация обмоток бесконтактного двигателя постоянного тока при бездатчиковом управлении по ЭДС-вращения // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2018. № 6. С. 87–101.  
DOI: 10.18698/0236-3933-2018-6-87-101

**THE COMMUTATION OF BLDC MOTORS IN SENSORLESS CONTROL  
VIA EMF OF ROTATION**

**V.N. Enin**  
**A.V. Stepanov**

enin@bmstu.ru  
stepanov.bmstu@gmail.com

**Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**

**Abstract**

The article presents the sensorless method of commutation control of BLDC motors based on measurements of rotor's rotation angle determined via analysis of EMF of rotation. A BLDC with magnets on the rotor and two sections on the stator was chosen as the object of the experiment. The rotation angles of the rotor in which commutation occurs are selected from the condition of equality of moment's generated sections in the corners on and off the windings. The moments equality, that occurs during the rotor spinning, was determined according to the condition of equality of rotation EMF emerging in stator windings. The function that does not depend on the rotor's angular velocity was developed. This function produces impulses in case the EMF of sections rotation are equal. The function is used in order to determine moments of sections commutation. The simulation of a specific plug-disc type BLDC was carried out and the results confirmed the effectiveness of the proposed method for sensorless control of low-power BLDC motors. The speed ripple registered for this method reached ~0,01%

**Keywords**

*Brushless DC motor, sensorless control, angles of rotor position, flux linkage, rotation EMF*

Received 19.02.2018

© BMSTU, 2018

**REFERENCES**

- [1] Arakelyan A.K., Afanas'ev A.A. Ventil'nye elektricheskie mashiny i reguliruemyy elektroprivod. Kn. 1: Ventil'nye elektricheskie mashiny [Gate electrical machines and adjustable electric drive. Vol. 1. Valve electric machines]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1997. 509 p.
- [2] Tsatsenkin V.K. Bezreduktornyy avtomatizirovannyy elektroprivod s ventil'nymi dvigatelyami [Gearless automated electric drive with brushless motors]. Moscow, MEI Publ., 1991. 240 p.
- [3] Ovchinnikov I.E. Teoriya ventil'nykh elektricheskikh dvigateley [Theory of valve electric motors]. Leningrad, Nauka Publ., 1985. 336 p.
- [4] Gridin V.M. Non-contacting DC current motor with coil switching by two transistors. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2017, no. 4, pp. 54–63. DOI: 10.18698/0236-3933-2017-4-54-63
- [5] Alyamkin D.I. Algorithms of sensorless control on two-phase valve-inductor engine. *Elektrichestvo*, 2011, no. 8, pp. 49–55.
- [6] Guo R.Ch., Cheng Zh.M., Li J.D. Research on position sensorless control system of high-speed brushless DC motor. *9th Int. Conf. on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics*, 2017, pp. 62–65. DOI: 10.1109/IHMSC.2017.21
- [7] Li H., Zheng Sh., Ren H. Self-correction of commutation point for high-speed sensorless BLDC motor with low inductance and nonideal back EMF. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, vol. 32, no. 1, pp. 642–651. DOI: 10.1109/TPEL.2016.2524632
- [8] Jung D.H., Ha I.J. Low-cost sensorless control of brushless DC motors using a frequency-independent phase shifter. *IEEE Transaction on Power Electronics*, 2000, vol. 15, no. 4, pp. 296–302. DOI: 10.1109/63.849045

[9] Chlandy R., Kosh S. Flatness-based tracking of an electromechanical variable valve timing actuator with disturbance observer feedforward compensation. *IEEE Transaction on Control System Technology*, 2008, vol. 16, no. 4, pp. 652–663. DOI: 10.1109/TCST.2007.912121

[10] Adaptive commutation error compensation strategy based on a flux linkage function for sensorless brushless DC motor drives in a wide speed range / Sh. Chen, X. Zxou, G. Bai, K. Wang, L. Zhu. *IEEE Transaction on Power Electronics*, 2018, vol. 33, no. 5, pp. 3752–3764. DOI: 10.1109/TPEL.2017.2765355

[11] Fang J., Li N., Han B. Torque ripple reduction in BLDC torque motor with nonideal back EMF. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, vol. 27, no. 11, pp. 4630–4637. DOI: 10.1109/TPEL.2011.2176143

**Enin V.N.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Electrical Engineering and Industrial Electronics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Stepanov A.V.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Electrical Engineering and Industrial Electronics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Enin V.N., Stepanov A.V. The Commutation of BLDC Motors in Sensorless Control Via EMF of Rotation. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2018, no. 6, pp. 87–101 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3933-2018-6-87-101