

# Исследование электромагнитных процессов в бесконтактных двигателях постоянного тока с несимметричной якорной обмоткой

ГРИДИН В.М.

При исследовании электромагнитных процессов в бесконтактных двигателях постоянного тока (БДПТ) с одно- и двухполупериодной, обычной и расширенной коммутацией считалось, что ЭДС вращения и якорный ток имеют трапецеидальную форму. По полученным в статье выражениям установлено, что БДПТ с несимметричной якорной обмоткой имеют лучшие электромагнитные характеристики, чем традиционные БДПТ с трехсекционной обмоткой, и обеспечивают максимальное значение КПД.

Ключевые слова: бесконтактные двигатели постоянного тока, несимметричная якорная обмотка, электромагнитные процессы

Цель приведенных в статье исследований – получение выражений, характеризующих электромагнитные процессы в бесконтактных двигателях постоянного тока (БДПТ), и определение условий, при которых эти процессы являются оптимальными, т.е. обеспечивают максимальное значение электромагнитного КПД.

Объектом исследований является предложенный автором БДПТ с несимметричной четырехсекционной якорной обмоткой (ЯО), у которого вторая, третья и четвертая секции смещены относительно первой соответственно на  $90^\circ$ ,  $135^\circ$  и  $225^\circ$  [1]. Поскольку двигатель работает с восьмитактной коммутацией, его электромагнитные характери-

*In studies of electromagnetic processes in contactless DC motors with single- and two-pulse usual and extended switching it was usually assumed that the rotation e.m.f. and armature current have a trapezoid shape. An analysis of the expressions obtained in the present study shows that contactless DC motors with an asymmetrical armature winding have electromagnetic characteristics better than those of traditional contactless DC motors with a three-section winding and allow the maximal efficiency to be obtained.*

Key words: contactless DC motors, asymmetrical armature winding, electromagnetic processes

ки должны быть лучше, чем у традиционного БДПТ с трехсекционной ЯО, работающего с шеститактной коммутацией. В [2] и на практике это доказано для моментных (низкоскоростных) БДПТ.

На рис. 1 изображена схема силовой части БДПТ с двухполупериодной коммутацией, подключенного к источнику питания (ИП) со средней точкой, причем если исключить транзисторы  $VT5-VT8$  и диоды  $VD1-VD4$ , то получится схема силовой части БДПТ с однополупериодной коммутацией. Последняя может быть выполнена и по-другому (для работы от ИП без средней точки) аналогично схеме БДПТ с трехсекционной ЯО [3].

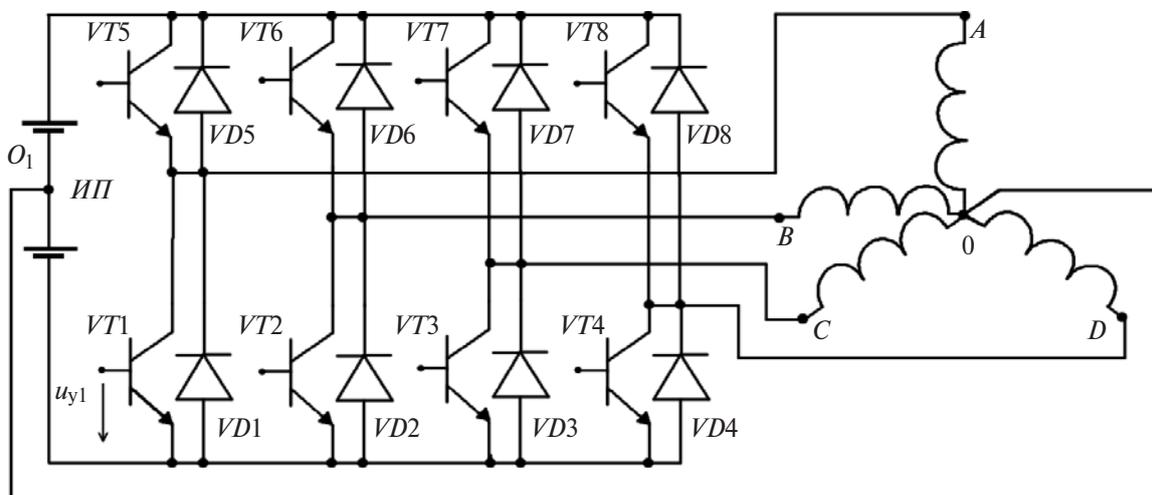


Рис. 1. Схема силовой части бесконтактного двигателя постоянного тока с несимметричной якорной обмоткой:  $AO, BO, CO, DO$  – секции ЯО;  $VT1-VT8$  – транзисторы, коммутрующие секции ЯО;  $VD1-VD8$  – диоды, предохраняющие транзисторы от перенапряжения и пробоя после их запаривания

БДПТ с двухполупериодной коммутацией также может работать от ИП без средней точки, т.е. при отсутствии провода  $OO_1$  (рис. 1), но с меньшими значениями мощности и КПД из-за худшего использования  $ЯО$ . Это обусловлено тем, что на одновременно работающих секциях разные напряжения.

На входы транзисторов поступают дискретные напряжения управления, формируемые по сигналам датчика положения ротора (ДПР). Одно из них  $u_{y1}$  показано на рис. 1. При  $u_{y1} > 0$  транзистор  $VT1$  открыт, и по секции АО протекает ток  $i_1$  или  $i_2$  (в разные интервалы времени) от нижней части ИП. При  $u_{y1} \leq 0$  этот транзистор заперт, и ток в секции  $i_3$ , замыкаясь через диод  $VD5$  на верхнюю часть ИП, спадает до нуля.

На рис. 2 изображены осциллограммы двуполярных напряжений на секциях  $ЯО$   $u_A, u_B, u_C, u_D$  со значением  $U$  для двухполупериодной коммутации, причем если исключить все отрицательные напряжения, то получатся осциллограммы напряжений для однополупериодной коммутации. Здесь

$$U = U_{\Pi} - \Delta U_{\text{тр}},$$

где  $U_{\Pi}$  — напряжение каждой половины ИП;  $\Delta U_{\text{тр}}$  — падение напряжения на одном транзисторе:

$$\omega = \Omega p; \quad \Omega = 2\pi n / 60,$$

где  $\Omega$  — угловая скорость вращения вала двигателя;  $n$  — частота вращения его вала;  $p$  — число пар полюсов двигателя.

Осциллограммы изображены для обычной коммутации, при которой угловой размер импульсов напряжений  $\gamma$  строго равен  $3\pi/4$ . При расширенной коммутации этот размер больше  $3\pi/4$  град (см. ниже). Расширенная коммутация позволяет увеличить электромагнитную мощность и мощность на валу, но при этом возможна заметная пульсация небольших значений частоты вращения вала двига-

теля. Как видно из рис. 2, при обычной двухполупериодной коммутации к ИП всегда подключены три секции  $ЯО$  ( $S=3$ ), а при обычной однополупериодной коммутации — одна или две секции  $ЯО$  ( $S=1$  или  $2$ ). Другие варианты коммутации, когда  $\gamma = \pi/2$ , а  $S=2$  и  $\gamma = \pi$ , а  $S=4$ , являются невыгодными [2].

Известно, что для получения максимального значения электромагнитного КПД ЭДС и ток в секциях  $ЯО$  при вращении вала двигателя должны иметь одинаковую форму — близкую к трапециевидальной [4]. Для воображаемой трапеции ЭДС — угловой размер ее нижнего основания должен быть  $\pi$  или  $180^\circ$ . Угловой размер верхнего основания считаем равным угловому размеру  $\alpha$  при обычной коммутации, т.е.  $3\pi/4$  или  $135^\circ$ . При этом на каждую боковую сторону трапеции приходится по  $22,5^\circ$ . При меньшем значении угла  $\alpha$  значения электромагнитной мощности и КПД меньше, а увеличение угла  $\alpha$  трудно достижимо.

Левую боковую сторону трапеции ЭДС для времени  $t = (\vartheta - 2/b)T - \vartheta T$  можно описать выражением

$$e_{\text{вр}} = \left(1 - b\vartheta + \frac{b}{T}t\right)E. \tag{1}$$

Правую боковую сторону трапеции ЭДС можно описать выражением

$$e_c = \left(r - \frac{b}{T}t\right)E, \tag{2}$$

причем, если считать, что  $t = (1 + \vartheta)T - \left(1 + \vartheta + \frac{2}{b}\right)T$ ,

то  $r = 1 + b + b\vartheta$ ; удобнее считать, что  $t = 0 - \frac{2}{b}T$ , тогда

$r = 1$ . Здесь  $E$  — амплитуда ЭДС вращения;  $b = 6(135^\circ/22,5^\circ)$  для БДПТ с несимметричной  $ЯО$  и принятого углового размера  $\alpha = 3\pi/4$ ;  $T = 3\pi/4$ ;  $\omega = 22,5/pn$  — время, за которое ротор-индуктор поворачивается на угол, равный  $3\pi/4$  град;  $\vartheta$  — относительный угол опережения коммутации (см. рис. 3 и пояснения к нему).

На рис. 3 изображены осциллограммы однополярных напряжения  $U$  на секции  $ЯО$ , ЭДС вращения  $e_{\text{вр}}, E, e_c$  и тока  $i_1, i_2, i_3$  на различных интервалах времени.

$$\text{Здесь } \vartheta = \frac{4p\vartheta_d}{3\pi}; \quad \vartheta T = \frac{30\vartheta_d}{\pi n}; \quad \vartheta_d —$$

угол опережения коммутации, т.е. угол смещения ДПР из нейтрального положения против направления вращения вала двигателя с целью увеличения мощности и КПД двигателя;  $\vartheta T$  и  $T_p$  — значения времени нарастания и спада тока.

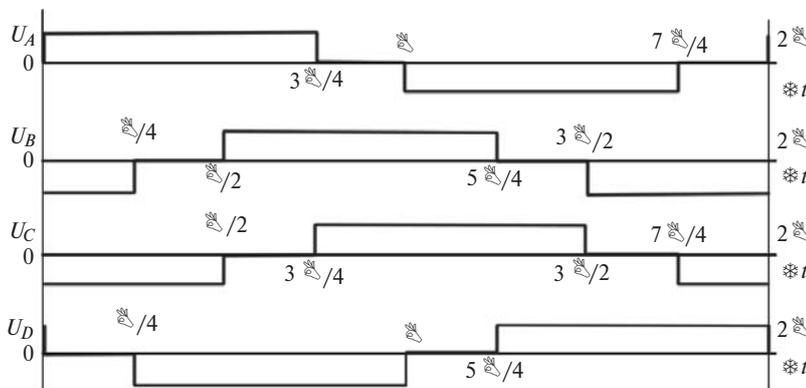


Рис. 2. Осциллограммы напряжений на секциях якорной обмотки

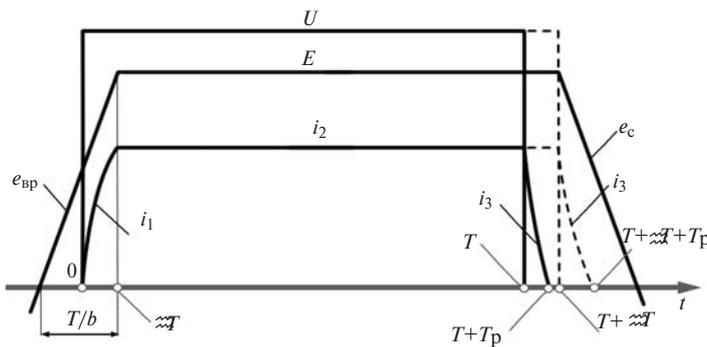


Рис. 3. Осциллограммы напряжения питания, ЭДС и тока в секциях якорной обмотки

Осциллограммы изображены для благоприятного случая: форма тока совпадает с формой ЭДС, что соответствует максимальному значению электромагнитного КПД  $\eta_{ЭМ}$ , т.е. отношения электромагнитной мощности  $P_{ЭМ}$  к мощности  $P_{П}$ , потребляемой ЯО. В этом случае ЭДС и ток за время  $\vartheta T$  достигают установившихся значений и не изменяются до момента отключения секции от ИП. Моменту отключения может соответствовать время  $T$  или  $T + \vartheta T$ , т.е. это обычная или расширенная коммутация. Для обычной коммутации напряжение  $U$  и токи  $i_2, i_3$  изображены только сплошной линией, а для расширенной коммутации при  $t = T - T + \vartheta T$  – прерывистой линией.

Для указанного благоприятного случая с целью получения выражений электромагнитной и потребляемой мощности определим относительные значения токов  $\bar{i}_1, \bar{i}_2, \bar{i}_3$ , т.е. отношения токов  $i_1, i_2, i_3$  к току в секции ЯО при пуске двигателя, равному  $U/R$ , где  $R$  – активное сопротивление секции ЯО.

Введем обозначения:  $\varepsilon = E/U$  – коэффициент ЭДС;  $\tau = L/R$  – электрическая постоянная времени секции ЯО;  $L$  – индуктивность секции ЯО. Взаимной индуктивностью секций пренебрегаем, так как ЯО – диаметрально сосредоточенная, при этом в пазах якоря находятся проводники только одной секции, поэтому магнитная связь между секциями незначительна.

Для первого интервала времени  $t = 0 - \vartheta T$  справедливо уравнение равновесия напряжений в якорной цепи:

$$\bar{i}_1 + \tau \frac{d\bar{i}_1}{dt} + \frac{e_{вр}}{U} = 1.$$

Решив его с учетом (1), получим выражение для тока:

$$\bar{i}_1 = s(1 - e^{-t/\tau}) - b\varepsilon \frac{t}{T}, \tag{3}$$

где

$$s = 1 - \varepsilon + b\varepsilon\vartheta + b\varepsilon/\beta; \beta = T/\tau. \tag{4}$$

При  $t = \vartheta T$

$$\bar{i}_1(\vartheta T) = 1 - \varepsilon = s(1 - e^{-\beta\vartheta}) - b\varepsilon\vartheta. \tag{5}$$

Очевидно, при  $\tau = 0$ , т.е. при  $\beta = \infty$ , произведение  $\vartheta T = 0$ , значит  $\vartheta = 0$ ; при уменьшении  $\beta$  и  $\varepsilon$  относительный угол  $\vartheta$  увеличивается.

Для второго интервала времени  $t = \vartheta T - T$  при обычной коммутации или  $t = \vartheta T - T + \vartheta T$  при расширенной коммутации справедливо выражение:

$$\bar{i}_2 = 1 - \varepsilon. \tag{6}$$

Для третьего интервала времени справедливы уравнения равновесия напряжений:

если  $t = T - T + T_p$ , то

$$\bar{i}_3 + \tau \frac{d\bar{i}_3}{dt} + \varepsilon + 1 = 0; \tag{7}$$

если  $t = \vartheta T + T - \vartheta T + T + T_p$ , то

$$\bar{i}_3 + \tau \frac{d\bar{i}_3}{dt} + \frac{e_c}{U} + 1 = 0. \tag{8}$$

Первое уравнение относится к обычной, а второе к расширенной коммутации. С целью упрощения выражений для тока  $\bar{i}_3$  и времени  $T_p$ , не уменьшая их точности, будем считать, что  $t = 0 - T_p$ .

Решив (7), получим выражение для обычной коммутации:

$$\bar{i}_3 = -1 - \varepsilon + 2e^{-t/\tau}. \tag{9}$$

Из условия  $\bar{i}_3 = 0$  и формулы (9) получим выражение для времени

$$T_p = \tau \ln \frac{2}{1 + \varepsilon} = \tau \ln \left( 1 + \frac{1 - \varepsilon}{1 + \varepsilon} \right) \approx \tau \left[ \frac{1 - \varepsilon}{1 + \varepsilon} - \frac{1}{2} \left( \frac{1 - \varepsilon}{1 + \varepsilon} \right)^2 \right]. \tag{10}$$

Выражение (10) можно упростить, так как реально  $\varepsilon = 0,8 \div 0,95$  и отношение  $\frac{1 - \varepsilon}{1 + \varepsilon}$  мало (0,111 ÷ 0,023).

Решив (8) с учетом (2), получим выражение для расширенной коммутации:

$$\bar{i}_3 = -(1 + \varepsilon) + \frac{b\varepsilon}{\beta} \left( \frac{t}{\tau} - 1 \right) + \left( 2 + \frac{b\varepsilon}{\beta} \right) e^{-t/\tau}. \tag{11}$$

Из условия  $\bar{i}_3 = 0$  и формулы (11) получим уравнение для определения времени

$$\frac{T_p}{\tau} + \left( 1 + \frac{2\beta}{b\varepsilon} \right) e^{-T_p/\tau} - 1 - \frac{1 + \varepsilon}{b\varepsilon} \beta = 0. \tag{12}$$

Выражения (11) и (12) достаточно сложны, поэтому заменим их приближенными формулами:

$$\bar{i}_3 \approx 1 - \varepsilon + \frac{d\bar{i}_3}{dt}(0)t = 1 - \varepsilon - \frac{2}{\tau}t, \quad (13)$$

откуда

$$T_p \approx (1 - \varepsilon)\tau / 2. \quad (14)$$

Предложенная формула для  $\bar{i}_3$  является достаточно точной на начальном участке третьего интервала, где наиболее значительна электромагнитная мощность, пропорциональная произведению  $e_c \bar{i}_3$  (рис. 3).

Найдем выражения для относительных потребляемой  $\bar{P}_{\text{п1}}$  и электромагнитной  $\bar{P}_{\text{эм1}}$  мощностей, т.е. для отношений абсолютных значений мощностей  $P_{\text{п1}}$  и  $P_{\text{эм1}}$  к мощности, потребляемой ЯО при пуске двигателя. Мощности  $\bar{P}_{\text{п1}}$ ,  $P_{\text{п1}}$ ,  $\bar{P}_{\text{эм1}}$ ,  $P_{\text{эм1}}$  будем считать относящимися к одной секции ЯО и току в ней только одного направления, тогда

$$\bar{P}_{\text{п1}} = P_{\text{п1}} R / U^2; \quad \bar{P}_{\text{эм1}} = P_{\text{эм1}} R / U^2. \quad (15)$$

Очевидно (см. рис. 3), для обычной коммутации

$$\bar{P}_{\text{п1}} = \frac{1}{T} \left( \int_0^{\vartheta T} \bar{i}_1 dt + \int_{\vartheta T}^T \bar{i}_2 dt \right); \quad (16)$$

$$\bar{P}_{\text{эм1}} = \frac{1}{T} \left( \int_0^{\vartheta T} \frac{e_{\text{вп}}}{U} \bar{i}_1 dt + \int_{\vartheta T}^T \varepsilon \bar{i}_2 dt + \int_T^{T+T_p} \varepsilon \bar{i}_3 dt \right), \quad (17)$$

а для расширенной коммутации

$$\bar{P}_{\text{п1}} = \frac{1}{T} \left( \int_0^{\vartheta T} \bar{i}_1 dt + \int_{\vartheta T}^{T+\vartheta T} \bar{i}_2 dt \right); \quad (18)$$

$$\bar{P}_{\text{эм1}} = \frac{1}{T} \left( \int_0^{\vartheta T} \frac{e_{\text{вп}}}{U} \bar{i}_1 dt + \int_{\vartheta T}^{T+\vartheta T} \varepsilon \bar{i}_2 dt + \int_{T+\vartheta T}^{T+\vartheta T+T_p} \frac{e_c}{U} \bar{i}_3 dt \right). \quad (19)$$

Из (16)–(19) с учетом (1)–(6) найдем выражения для относительных значений мощностей:

$$\bar{P}_{\text{п1}} = (1 - \varepsilon) \left( 1 + \frac{\vartheta}{2} \pm \frac{\vartheta}{2} - \frac{1}{\beta} \right) + \frac{b}{2} \varepsilon \vartheta^2; \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \bar{P}_{\text{эм1}} = \varepsilon(1 - \varepsilon) \left[ 1 - \frac{\vartheta}{2} \pm \frac{\vartheta}{2} + (1 - b\vartheta) \left( \vartheta - \frac{1}{\vartheta} \right) - \frac{b}{\beta^2} \right] + \\ + b\varepsilon \left( 1 + \frac{b\varepsilon}{\beta} \right) \frac{\vartheta^2}{2} - \frac{(b\varepsilon)^2 \vartheta^3}{3} + \Delta \bar{P}_{\text{эм1}}. \end{aligned} \quad (21)$$

Здесь и ниже  $\Delta \bar{P}_{\text{эм1}}$  — относительная электромагнитная мощность, развиваемая на третьем интервале.

Для обычной коммутации в формулах для  $\bar{P}_{\text{п1}}$  и  $\bar{P}_{\text{эм1}}$  следует брать знак минус, а с учетом (9), (10) получим выражения:

$$\begin{aligned} \Delta \bar{P}_{\text{эм1}} &= \frac{1}{T} \int_0^{T_p} \varepsilon \bar{i}_3 dt = \frac{\varepsilon}{\beta} \left[ 1 - \varepsilon - (1 + \varepsilon) \ln \frac{2}{1 + \varepsilon} \right] \approx \\ &\approx \frac{\varepsilon}{2\beta} \frac{(1 - \varepsilon)^2}{1 + \varepsilon}. \end{aligned} \quad (22)$$

Для расширенной коммутации в формулах для  $\bar{P}_{\text{п1}}$  и  $\bar{P}_{\text{эм1}}$  следует брать знак плюс, а с учетом формул (2), (13), (14) получим выражение:

$$\Delta \bar{P}_{\text{эм1}} = \frac{1}{T} \int_0^{T_p} \frac{e_c}{U} \bar{i}_3 dt \approx \frac{\varepsilon(1 - \varepsilon)^2}{4\beta} \left( 1 - \frac{1 - \varepsilon}{\beta} \right). \quad (23)$$

Формула (21) является сложной, но ее можно упростить, считая приближенно, что на первом интервале ток  $\bar{i}_1$  изменяется линейно:

$$\bar{i}_1 \approx (1 - \varepsilon)t / \vartheta T. \quad (24)$$

Такое допущение оправдано тем, что первый интервал значительно меньше второго, ЭДС, ток и электромагнитная мощность на первом интервале возрастают, а на втором они максимальны как установившиеся, тогда из (1), (6), (17), (19), (24) получим упрощенное выражение:

$$\bar{P}_{\text{эм1}} \approx \varepsilon(1 - \varepsilon) \left( 1 \pm \frac{\vartheta}{2} - \frac{b}{6} \vartheta^2 \right) + \Delta \bar{P}_{\text{эм1}}. \quad (25)$$

При указанном допущении  $\bar{P}_{\text{п1}} \approx (1 - \varepsilon)(1 \pm \vartheta / 2)$ .

Из (4) и (5) получим уравнение связи между коэффициентом ЭДС  $\varepsilon$  и относительным углом  $\vartheta$ :

$$1 - e^{\beta\vartheta} + \beta\vartheta + \beta(1 - \varepsilon) / (b\varepsilon) = 0. \quad (26)$$

Так как  $e^{\beta\vartheta} \approx 1 + \beta\vartheta + \beta^2\vartheta^2 / 2$ , то  $\vartheta \approx \sqrt{\frac{2(1 - \varepsilon)}{b\beta\varepsilon}}$ .

Для оценки приближенной формулы (25) была рассчитана относительная мощность  $\bar{P}_{\text{эм1}}$  по этой формуле и формуле (21) для  $b=6$ ;  $\beta=0,9$ ;  $\varepsilon=0,8$ . Относительный угол  $\vartheta=0,291$  был рассчитан по (26). Для обычной коммутации получили:  $\bar{P}_{\text{эм1}}=0,1324$  по (25) и  $\bar{P}_{\text{эм1}}=0,1332$  по (21). Различие между двумя значениями  $\bar{P}_{\text{эм1}}$  составило 0,6%. Кроме того, после расчета получили  $\bar{P}_{\text{п1}}=0,1810$  и  $\eta_{\text{эм}}=0,736$ . Для расширенной коммутации  $\bar{P}_{\text{эм1}}=0,1766$  по (25) и  $\bar{P}_{\text{эм1}}=0,1775$  по (21); различие составило 0,5%. Кроме того, после расчета получили  $\bar{P}_{\text{п1}}=0,2392$  и  $\eta_{\text{эм}}=0,742$ . Отношение электромагнитных мощностей для различных коммутаций  $0,1775/0,1332=1,333$ .

Полученные формулы и, в частности, (20)—(26) можно применить и к БДПТ с трехсекционной ЯО, питаемых от ИП со средней точкой. Для параметров и характеристик таких БДПТ введем дополнительный индекс 3:  $T_3 = \frac{2\pi}{3}$ ;  $\omega = \frac{20}{pn}$  — время поворота вала двигателя на угол  $2\pi/3$  град. Оно меньше времени  $T$  для БДПТ с четырехсекционной ЯО (см. выше), относительная их разность составляет:

$$\delta_T = \frac{T - T_3}{T_3} = 0,125.$$

Если угловой размер верхнего основания трапециевидальной ЭДС  $\alpha$  равен  $3\pi/4$  или  $135^\circ$ , то в формулы следует подставлять  $b = 16/3(120^\circ/22,5^\circ)$ .

Если при этом секции ЯО отключаются от ИП через  $t = 1,125T_3$  или  $t = 1,125T_3 + \vartheta T_3$ , когда в момент отключения ЭДС равна  $E$ , то (20) нужно записать так:

$$\bar{P}_{\text{п13}} = (1 - \varepsilon) \left( 1,125 + \frac{\vartheta}{2} \pm \frac{\vartheta}{2} - \frac{1}{\beta} \right) + \frac{8\varepsilon\vartheta^2}{3}.$$

В (21) нужно вместо  $b$  подставить  $16/3$ , а в квадратные скобки ввести дополнительный член  $+0,125$ . Формулу (25) нужно записать так:

$$\bar{P}_{\text{эм13}} \approx \varepsilon(1 - \varepsilon) \left( 1,125 \pm \frac{\vartheta}{2} - \frac{8}{9}\vartheta^2 \right) + \overline{\Delta P}_{\text{эм1}}.$$

В формулах знаки «минус» и «плюс» относятся к значениям времени отключения секций ЯО от ИП, соответственно равным  $t = 1,125T_3$  и  $t = 1,125T_3 + \vartheta T_3$ . Для относительной мощности  $\Delta P_{\text{эм1}}$  в первом случае справедлива формула (22), во втором (23).

Следует отметить, что при указанной коммутации к ИП одновременно подключены 2 или 3 секции ЯО, а это может привести к заметной пульсации при небольшой частоте вращения вала двигателя.

Если угловой размер  $\alpha$  равен, как обычно,  $2\pi/3$  или  $120^\circ$  и при этом на каждую боковую сторону трапеции приходится по  $30^\circ$ , то во все формулы необходимо и достаточно подставлять  $b = 4(120^\circ/30^\circ)$ .

Полученные выражения для относительных значений электромагнитной и потребляемой мощности позволяют определять оптимальные значения коэффициента ЭДС  $\varepsilon$  и относительного значения угла  $\vartheta$  при известных электромагнитном КПД и характеристике ЯО — отношении  $\beta = T/\tau$ . Оптимальные значения коэффициента ЭДС  $\varepsilon$  и относительного угла  $\vartheta$  нужно определять, решив систему двух уравнений. Первое — уравнение (26), второе

$$\bar{P}_{\text{эм1}} - \bar{P}_{\text{п1}} \eta_{\text{эм}} = 0. \quad (27)$$

В (27) известны выражения для относительных значений мощностей  $\bar{P}_{\text{п1}}$  и  $\bar{P}_{\text{эм1}}$ , значения электромагнитного КПД  $\eta_{\text{эм}}$  и отношения  $\beta$ . Для БДПТ с трехсекционной ЯО нужно вместо (27) применить уравнение  $\bar{P}_{\text{эм13}} - \bar{P}_{\text{п13}} \eta_{\text{эм3}} = 0$ .

На рис. 4 и 5 приведены графические зависимости оптимальных значений относительного угла  $\vartheta$  и коэффициента ЭДС  $\varepsilon$  от  $\beta$  для трех значений электромагнитного КПД  $\eta_{\text{эм}}$  применительно к БДПТ с несимметричной ЯО и обычной коммутацией. Значения  $\varepsilon$  и  $\vartheta$  получены путем решения системы уравнений (26) и (27). Из рисунков видно, что чем больше КПД  $\eta_{\text{эм}}$ , тем больше значение  $\varepsilon$ , но меньше  $\vartheta$  и что при уменьшении  $\beta$  увеличиваются значения  $\varepsilon$  и  $\vartheta$ , а также при  $\beta \rightarrow \infty$  значения  $\vartheta \rightarrow 0$  и  $\varepsilon \rightarrow \eta_{\text{эм}}$ . Зависимости  $\varepsilon(\beta)$  и  $\vartheta(\beta)$  для расширенной коммутации незначительно отличаются от таковых для обычной коммутации и поэтому здесь не приводятся.

На рис. 6 приведены графические зависимости отношения  $K_p$  электромагнитных мощностей при расширенной и обычной коммутации от  $\beta$  для трех значений электромагнитного КПД  $\eta_{\text{эм}}$ . Так как  $K_p > 1$ , то, очевидно, применение расширенной коммутации вместо обычной позволяет увеличить электромагнитную мощность, а следовательно, и мощность на валу двигателя. Значение  $K_p$  тем больше, чем меньше значения  $\beta$  и электромагнитного КПД  $\eta_{\text{эм}}$ .

Следует отметить, что при расширенной двухполупериодной коммутации к ИП одновременно подключены 3 или 4 секции ЯО, а это может при-

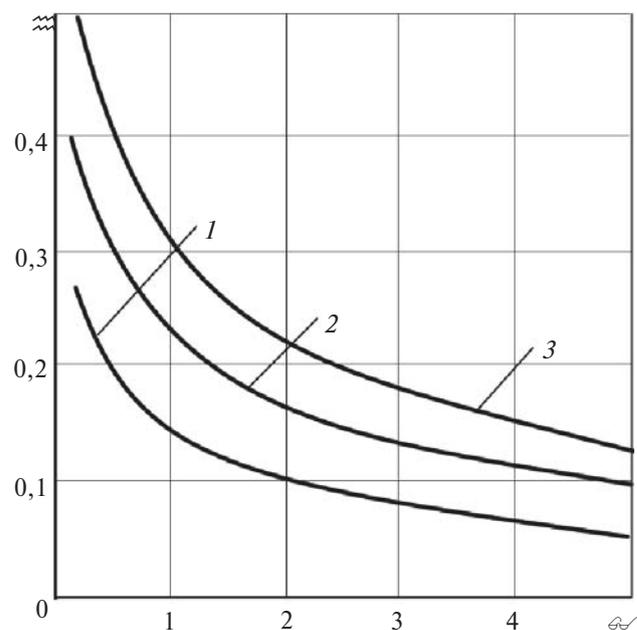
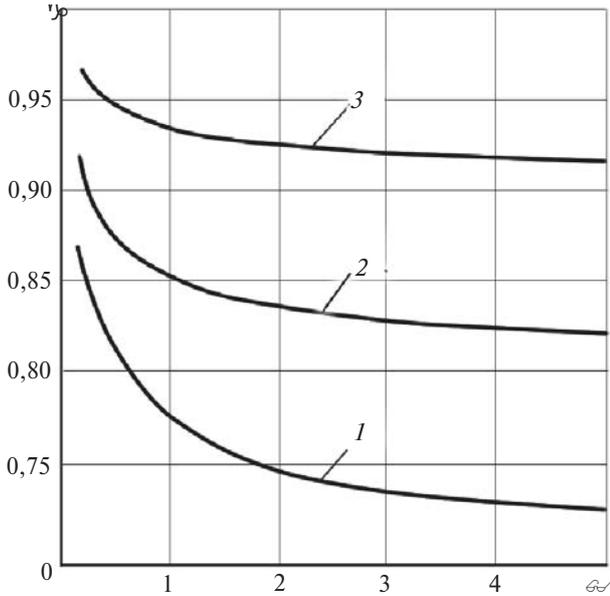


Рис. 4. Оптимальные значения относительного угла  $\vartheta$  для обычной коммутации: 1 —  $\eta_{\text{эм}} = 0,7$ ; 2 —  $\eta_{\text{эм}} = 0,8$ ; 3 —  $\eta_{\text{эм}} = 0,9$



**Рис. 5.** Оптимальные значения коэффициента ЭДС  $\epsilon$  для обычной коммутации: 1 –  $\eta_{\text{ЭМ}} = 0,7$ ; 2 – 0,8; 3 – 0,9

вести к заметной пульсации при небольших значениях частоты вращения вала двигателя.

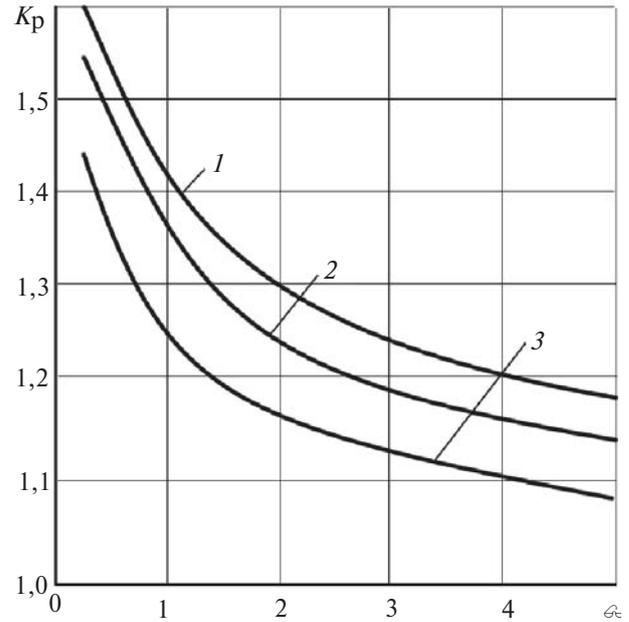
Результаты исследования электромагнитных процессов можно и нужно использовать для оптимального проектирования БДПТ. При проектировании известны номинальные значения напряжения питания  $U_{\text{П}}$ , мощности на валу  $P_2$ , частоты вращения вала двигателя  $n$ , КПД  $\eta_{\text{д}}$  и других параметров двигателя. В процессе проектирования необходимо предварительно определить значения отношения  $\beta$  и электромагнитного КПД  $\eta_{\text{ЭМ}}$ , как, например, указано в [3]. Так как КПД  $\eta_{\text{ЭМ}}$  учитывает только омические потери в  $\text{ЯО}$ , то его значение больше значения КПД двигателя  $\eta_{\text{ЭМ}} = (1,07 \div 1,20)\eta_{\text{д}}$ . Значение отношения  $\beta$  тем меньше, чем больше значения мощности  $P_2$ , частоты вращения вала и габариты двигателя [3]. Зная  $\beta$  и  $\eta_{\text{ЭМ}}$ , нужно определить оптимальные значения  $\epsilon$  и  $\vartheta$  по рис. 4, 5 или путем решения системы (26) и (27), а по ним – параметры  $\text{ЯО}$ , ток якоря, мощности двигателя. Значения потребляемой и электромагнитных мощностей  $P_{\text{П}}$  и  $P_{\text{ЭМ}}$  можно рассчитать в соответствии с рис. 2 и выражениями (15) по формулам:

для двухполупериодной коммутации

$$P_{\text{ЭМ}} = 3 \frac{U^2}{R} \bar{P}_{\text{ЭМ}1}; \quad P_{\text{П}} = 3 \frac{U^2}{R} \bar{P}_{\text{П}1};$$

для однополупериодной коммутации мощности  $P_{\text{ЭМ}}$  и  $P_{\text{П}}$  в два раза меньше.

Сравним электромагнитные характеристики двух БДПТ: традиционного с трехсекционной  $\text{ЯО}$  и с несимметричной четырехсекционной  $\text{ЯО}$ . Считаем, что у сравниваемых БДПТ электромеханиче-



**Рис. 6.** Отношение  $K_{\text{р}}$  значений электромагнитной мощности при расширенной и обычной коммутации: 1 –  $\eta_{\text{ЭМ}} = 0,7$ ; 2 – 0,8; 3 – 0,9

ская часть выполнена в одних и тех же габаритах, числа витков секций  $\text{ЯО}$   $w$  и значения частоты вращения вала  $n$  одинаковы. Следовательно, у обоих двигателей должны быть равны значения ЭДС, коэффициента ЭДС  $\epsilon$ , индуктивности секций  $L$  и площади  $Q$  поперечного сечения всех проводников  $\text{ЯО}$ :

$$Q = 6wq_3p = 8wqp,$$

где  $q_3, q$  – площади поперечного сечения обмоточных проводов по меди трех- и четырехсекционного БДПТ.

Следовательно,  $q_3 = \frac{4}{3}q; \quad R_3 = \frac{3}{4}R; \quad \frac{U^2}{R_3} = \frac{4}{3} \frac{U^2}{R};$

$$\tau_3 = \frac{L}{R_3} = \frac{4}{3}\tau; \quad \text{кроме того,} \quad T_3 = \frac{20}{pn} = \frac{8}{9}T;$$

$$\beta_3 = \frac{T_3}{\tau_3} = \frac{8}{9} \frac{3T}{4\tau} = \frac{2}{3}\beta.$$

Для трехсекционного БДПТ с двухполупериодной коммутацией электромагнитную и потребляемую мощности можно выразить следующим образом:

для двухполупериодной коммутации

$$P_{\text{ЭМ}3} = 2 \frac{U^2}{R_3} \bar{P}_{\text{ЭМ}13} = \frac{8}{3} \frac{U^2}{R} \bar{P}_{\text{ЭМ}13} = \frac{8}{9} \frac{\bar{P}_{\text{ЭМ}13}}{\bar{P}_{\text{ЭМ}1}} P_{\text{ЭМ}};$$

$$P_{\text{П}3} = \frac{8}{9} \frac{\bar{P}_{\text{П}13}}{\bar{P}_{\text{П}1}} P_{\text{П}};$$

при однополупериодной коммутации мощности  $P_{\text{ЭМ}3}$  и  $P_{\text{П}3}$  в два раза меньше.

Для  $b = \frac{16}{3}$ ;  $\beta_3 = \frac{2}{3}\beta = 0,6$ ;  $\varepsilon = 0,8$  и коммутации с отключением секций через время  $t = 1,125T_3$  были рассчитаны относительные значения мощностей  $\bar{P}_{\text{эм}13}$ ,  $\bar{P}_{\text{п}13}$  и КПД  $\eta_{\text{эм}3}$ . Получили:  $\vartheta = 0,38$ ;  $\bar{P}_{\text{эм}13} = 0,1428$ ;  $\bar{P}_{\text{п}13} = 0,2001$ ;  $\eta_{\text{эм}3} = 0,714$ . Следовательно,  $\frac{\eta_{\text{эм}}}{\eta_{\text{эм}3}} = \frac{0,736}{0,714} = 1,034$ ;  $\frac{P_{\text{эм}}}{P_{\text{эм}3}} = \frac{9}{8} \frac{\bar{P}_{\text{эм}1}}{\bar{P}_{\text{эм}13}} = 1,049$ ;

здесь значения  $\eta_{\text{эм}}$  и  $\bar{P}_{\text{эм}1}$  взяты для обычной коммутации (см. выше). Так как омические потери в *ЯО* и, следовательно, ее нагрев для двух БДПТ различны, то должно быть справедливо:

$$\frac{P_{\text{эм}}}{P_{\text{эм}3}} \approx \frac{1 - \eta_{\text{эм}3}}{\eta_{\text{эм}3}} \cdot \frac{1 - \eta_{\text{эм}}}{\eta_{\text{эм}}} = 1,117.$$

Также были рассчитаны относительные значения мощностей  $\bar{P}_{\text{эм}13}$ ,  $\bar{P}_{\text{п}13}$  и КПД  $\eta_{\text{эм}3}$  для  $b = 4$ ;  $\beta_3 = 0,6$ ;  $\varepsilon = 0,8$  при обычной коммутации. Получили:  $\vartheta = 0,437$ ;  $\bar{P}_{\text{эм}13} = 0,1185$ ;  $\bar{P}_{\text{п}13} = 0,1715$ ;  $\eta_{\text{эм}} = 0,691$ . Следовательно,  $\frac{\eta_{\text{эм}}}{\eta_{\text{эм}3}} = \frac{0,736}{0,691} = 1,065$ ;

$$\frac{P_{\text{эм}}}{P_{\text{эм}3}} = \frac{9}{8} \frac{\bar{P}_{\text{эм}1}}{\bar{P}_{\text{эм}13}} = 1,265.$$

При одинаковых омических потерях в *ЯО* и ее нагреве должно быть справедливо:

$$\frac{P_{\text{эм}}}{P_{\text{эм}3}} \approx \frac{1 - \eta_{\text{эм}3}}{\eta_{\text{эм}3}} \cdot \frac{1 - \eta_{\text{эм}}}{\eta_{\text{эм}}} = 1,247.$$

Так как  $P_{\text{эм}} > P_{\text{эм}3}$ , а  $\eta_{\text{эм}} > \eta_{\text{эм}3}$ , то  $P_2 > P_{23}$  и  $\eta_{\text{д}} > \eta_{\text{д}3}$ .

Результаты расчета показывают, что БДПТ с несимметричной *ЯО* превосходит традиционный

БДПТ с трехсекционной *ЯО*, выполненный в тех же габаритах, по мощности на валу и КПД. Это превосходство тем больше, чем меньше отношение  $\beta$ , т.е. чем больше мощность на валу, частота вращения вала и габариты двигателя. Кроме того, у БДПТ с несимметричной *ЯО* и двухполупериодной коммутацией пульсация частоты вращения вала меньше благодаря большему числу тактов коммутации, что особенно важно при небольших значениях частоты вращения вала. При этом его коммутатор несколько сложнее, поэтому БДПТ с несимметричной *ЯО* может найти применение наряду с другими БДПТ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. № 1270846 от 15.07.1986. Вентильный электродвигатель/В.М. Гридин.
2. Гридин В.М. Электромагнитные характеристики моментных бесконтактных двигателей постоянного тока. — М.: Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, серия «Машиностроение», 2011, № 2.
3. Балагуров В.А., Гридин В.М., Лозенко В.К. Бесконтактные двигатели постоянного тока с постоянными магнитами. — М.: Энергия, 1975.
4. Кенио Т., Нагамори С. Двигатели постоянного тока с постоянными магнитами. — М.: Энергоатомиздат, 1980.

[27.10.11]

*Автор: Гридин Владимир Михайлович окончил в 1963 г. электромеханический факультет Московского энергетического института (МЭИ). В 1979 г. защитил в МЭИ кандидатскую диссертацию «Исследование и расчет трехфазных бесконтактных двигателей постоянного тока с однополупериодной коммутацией». Доцент кафедры «Электротехника и промышленная электроника» Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана.*

\* \* \*

#### Внимание предприятий, организаций, НИИ, вузов России и зарубежных фирм!

Журнал «Электричество» предоставляет свои страницы для

- РЕКЛАМЫ ИЗДЕЛИЙ отечественных предприятий и зарубежных фирм в области энергетики, электротехники, электроники, автоматики
- ПУБЛИКАЦИИ ОБЪЯВЛЕНИЙ о научных симпозиумах, конференциях, совещаниях, семинарах
- ДРУГОЙ ИНФОРМАЦИИ, соответствующей тематике журнала

Сообщаем, что журнал поступает к зарубежным подписчикам; полные тексты статей размещены на сайте [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru)

Напоминаем наш адрес: 101000 Москва, Главпочтамт, а/я 648.

Тел./факс (7-495)362-7485