

УДК 621.313.292

В. М. Г р и д и н

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОМЕНТНЫХ БЕСКОНТАКТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Электромагнитные характеристики рассмотрены применительно к бесконтактным двигателям постоянного тока с трехсекционной и несимметричной четырехсекционной якорными обмотками. Получены выражения для электромагнитного момента и его пульсации, учитывающие различные формы распределения магнитной индукции по окружности воздушного зазора, разные способы укладки якорной обмотки в магнитопроводе якоря и число одновременно работающих секций якорной обмотки. Установлено, что двигатели с несимметричной четырехсекционной якорной обмоткой создают больший электромагнитный момент, а пульсация этого момента меньше, чем у двигателей с трехсекционной якорной обмоткой.

E-mail: epe@bmstu.ru

Ключевые слова: бесконтактные двигатели постоянного тока, несимметричная якорная обмотка, пульсация электромагнитного момента.

Бесконтактные двигатели постоянного тока (БДПТ) по сравнению с обычными двигателями постоянного тока не имеют скользящих контактов и поэтому работают более надежно, особенно при вибрациях, ускорениях, после ударов, в вакууме, химически агрессивной, взрывоопасной средах и др.

Характеристики БДПТ зависят от числа секций якорной обмотки, схемы обмотки и коммутации ее секций. Чаще всего применяют БДПТ с трехсекционной якорной обмоткой. С ним может конкурировать предложенный автором БДПТ с несимметричной четырехсекционной якорной обмоткой [1–3].

Из существующих схем коммутации секций обмотки две схемы обеспечивают все возможные варианты соединений секций с источником питания — это схемы с независимой коммутацией секций обмотки. Питание БДПТ, выполненных по первой схеме, осуществляется от источника без средней точки, каждая секция обмотки не связана с другими, соединена с четырьмя ключевыми элементами по мостовой схеме и коммутируется с их помощью по сигналу специального датчика положения ротора (ДПР); БДПТ, выполненные по второй схеме, питаются от источника со средней точкой, все секции обмотки соединены в виде звезды, ее средняя точка соединена со средней точкой источника питания, каждая секция коммутируется с помощью только двух ключевых элементов по сигналам ДПР.

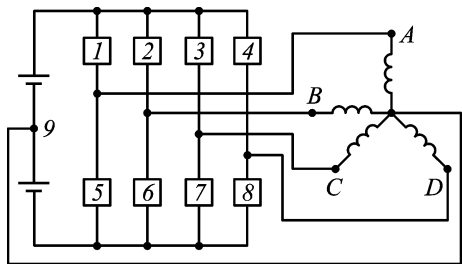


Рис. 1. Схема силовой части двигателя с несимметричной четырехсекционной якорной обмоткой:

I–8 — ключевые элементы; *9* — источник питания; *A, B, C, D* — секции якорной обмотки

На рис. 1 изображена схема силовой части БДПТ с несимметричной четырехсекционной якорной обмоткой. Вторая (*B*), третья (*C*) и четвертая (*D*) секции обмотки смещены относительно первой секции (*A*) соответственно на 90, 135 и 225 электрических градусов (эл. град.). Все секции обмотки соединены в виде звезды. Источник питания *9* выполнен со средней точкой. Диоды обратного тока, шунтирующие ключевые элементы и не допускающие их пробоя, условно не показаны.

Если БДПТ применяется в качестве моментного двигателя, то его основными электромагнитными характеристиками являются электромагнитный момент и его пульсация. Электромагнитный момент должен быть как можно больше при ограниченной мощности потребляемой энергии, а пульсация момента — как можно меньше.

Найдем выражения для среднего значения пульсации электромагнитного момента для двух сопоставляемых БДПТ: с трехсекционной и с несимметричной четырехсекционной якорными обмотками. Оба двигателя имеют одни и те же габаритные размеры и потребляют от источника питания одну и ту же энергию; следовательно, они нагреваются до одной и той же температуры.

Якорная обмотка — диаметральная и может быть уложена в прямые (нескошенные) пазы зубчатого магнитопровода якоря, в пазы, скошенные на одно пазовое деление, или на внутренней цилиндрической поверхности гладкого магнитопровода якоря. В двух последних случаях пульсация вращающего момента на валу БДПТ, обусловленная зубчатым строением якоря, исключена.

Магнитная индукция может быть распределена по окружности воздушного зазора в виде, близком к синусоиде или трапеции. Первый случай относится к БДПТ с монолитным индуктором, а также с якорной обмоткой, уложенной на поверхности магнитопровода якоря. Вторым случаем относится к БДПТ с составным индуктором и якорной обмоткой, уложенной в пазы магнитопровода якоря.

Для электромагнитного момента M различных БДПТ справедливо следующее общее выражение:

$$M = L \cdot 2w \frac{D}{2} I \sum_1^S B_i = \mu \nu,$$

где $\nu = DLB_m$; $\mu = bIw$; $b = \sum_1^S b_i$; $b_i = B_i/B_m$; D — диаметр воздушного зазора между магнитопроводом якоря и индуктором; L — длина магнитопровода якоря; w — число витков одной секции якорной обмотки; S — число одновременно работающих, т.е. подключенных к источнику питания, секций обмотки; I — ток, протекающий по одной секции; B_m — максимальное значение (амплитуда) магнитной индукции в воздушном зазоре; B_i — магнитная индукция, относящаяся к i -й работающей секции.

Индукция B_i и коэффициенты b_i зависят от разности α (эл. град.) между угловыми положениями секций обмотки и угловым положением середины полуволны магнитной индукции, т.е. $B_i = B_i(\alpha)$, $b_i = b_i(\alpha)$.

Поскольку моментный БДПТ — низкоскоростной и, следовательно, межкоммутационный интервал много больше времени установления тока в секциях обмотки после коммутации, а ЭДС в секциях много меньше напряжения питания, то можно считать, что токи в секциях после коммутации устанавливаются сразу и не изменяются до следующей коммутации. Поэтому электромагнитный момент изменяется только при изменении магнитной индукции B_i и углового положения вала двигателя.

Для сопоставляемых БДПТ коэффициенты ν — одинаковые, а коэффициенты μ — разные. Поэтому в дальнейшем мы будем искать выражения для коэффициентов μ , относящихся к этим БДПТ.

Среднее значение коэффициента μ запишем как

$$\mu_{\text{ср}} = b_{\text{ср}} I w, \quad (1)$$

выражение для пульсации электромагнитного момента — в виде

$$\varepsilon = \frac{b_{\text{max}} - b_{\text{min}}}{2b_{\text{ср}}}. \quad (2)$$

Найдем соотношение между произведениями Iw для БДПТ с трех- и четырехсекционной якорными обмотками, которые обозначим соответственно $I_3 w_3$ и $I_4 w_4$. Здесь и далее индекс 3 относится к БДПТ с трехсекционной, а индекс 4 — к БДПТ с четырехсекционной обмоткой. Поскольку оба БДПТ выполнены в одних и тех же габаритных размерах, а магнитные потоки должны быть одинаковы, то должны быть равны и площади поперечного сечения всех проводников обмотки, следовательно,

$$6w_3 q_3 = 8w_4 q_4, \quad \frac{q_3}{q_4} = \frac{4}{3} \cdot \frac{w_4}{w_3},$$

где q_3 и q_4 — площади поперечных сечений обмоточных проводов из меди.

Активные сопротивления одной секции обмотки можно представить как

$$R_3 = \rho_{\text{Cu}} \frac{l_w w_3}{q_3}, \quad R_4 = \rho_{\text{Cu}} \frac{l_w w_4}{q_4},$$

где ρ_{Cu} — удельное электрическое сопротивление меди; l_w — длина среднего витка обмотки.

С учетом выражения для q_3/q_4 имеем

$$\frac{R_3}{R_4} = \frac{w_3 q_4}{q_3 w_4} = \frac{3}{4} \left(\frac{w_3}{w_4} \right)^2.$$

Токи, протекающие по одной секции обмотки, определяются формулами

$$I_3 = \frac{U_3}{R_3}, \quad I_4 = \frac{U_4}{R_4},$$

где U_3 и U_4 — напряжения на работающих секциях обмотки.

С учетом выражения для R_3/R_4 имеем

$$I_3 w_3^2 = \frac{4}{3} \frac{U_3}{U_4} I_4 w_4^2.$$

Потребляемые мощности P_3 и P_4 должны быть равны, т.е. запишем

$$P_3 = S_3 U_3 I_3 = S_4 U_4 I_4 = P_4,$$

следовательно,

$$I_3 = \frac{S_4 U_4}{S_3 U_3} I_4.$$

Возможны два случая: $U_3 = U_4$ и $q_3 = q_4$. Второй случай относится к миниатюрным БДПТ, для которых обмоточный провод выбирают по механической прочности.

Если $U_3 = U_4$, то

$$I_3 = \frac{S_4}{S_3} I_4, \quad I_3 w_3^2 = \frac{4}{3} I_4 w_4^2.$$

Перемножая левые и правые части двух последних выражений, получаем искомое выражение

$$I_3 w_3 = 2 \sqrt{\frac{S_4}{3S_3}} I_4 w_4.$$

Если $q_3 = q_4 = q$, то

$$6w_3 q = 8w_4 q, \quad w_3 = \frac{4}{3} w_4,$$

$$\frac{R_3}{R_4} = \frac{w_3 q}{w_4 q} = \frac{4}{3}, \quad P_3 = S_3 \frac{U_3^2}{R_3} = S_4 \frac{U_4^2}{R_4} = P_4,$$

$$U_3^2 = \frac{S_4 R_3}{S_3 R_4} U_4^2, \quad U_3 = 2\sqrt{\frac{S_4}{3S_3}} U_4, \quad I_3 = \frac{I_4}{2} \sqrt{\frac{3S_4}{S_3}}.$$

Перемножая левые и правые части последнего выражения и выражения для w_3 , получаем

$$I_3 w_3 = 2\sqrt{\frac{S_4}{3S_3}} I_4 w_4.$$

Таким образом, соотношения между произведениями $I_3 w_3$ и $I_4 w_4$ для случаев $U_3 = U_4$ и $q_3 = q_4$ одинаковы. Запишем следующее выражение:

$$I_3 w_3 = K I_4 w_4, \quad (3)$$

где $K = 2\sqrt{\frac{S_4}{3S_3}}$.

Далее приведены значения коэффициента K для различных сочетаний чисел S_3 и S_4 . Числитель каждой дроби означает число одновременно работающих секций якорной обмотки для БДПТ с трехсекционной обмоткой S_3 , а знаменатель — то же для БДПТ с четырехсекционной обмоткой, т. е. S_4 : для отношений пульсаций S_3/S_4 , равных 1/1, 1/2, 2/2, 2/3, 3/3 и 3/4, коэффициент K составляет 1,155; 1,633; 1,155; 1,414; 1,155 и 1,333 соответственно.

Для коэффициента b_{cp} в формуле (1) справедливы следующие общие выражения.

Если якорная обмотка уложена в прямые пазы магнитопровода якоря, то

$$b_{cp} = \frac{2}{\Delta\alpha} \sum_1^S \int_{\alpha_{ci}}^{\alpha_{ki}} b_i(\alpha) d\alpha, \quad (4)$$

где α_{ci} и α_{ki} — значения угла α в середине и в конце межкоммутационного интервала (МКИ), равного $\Delta\alpha$, причем $\Delta\alpha = 2(\alpha_{ki} - \alpha_{ci})$:

$\Delta\alpha_3 = \pi/3 = 60$ эл. град. — для трехсекционных БДПТ;

$\Delta\alpha_4 = \pi/4 = 45$ эл. град. — для четырехсекционных БДПТ.

Если якорная обмотка уложена в пазы, скошенные на одно пазовое деление, или на поверхности магнитопровода якоря, а распределение магнитной индукции вдоль окружности воздушного зазора — синусоидальное, то

$$b_{cp} = \frac{2\rho}{\Delta\alpha} \sum_1^S \int_{\alpha_{ci}}^{\alpha_{ki}} b_i(\alpha) d\alpha, \quad (5)$$

где $\rho = \sin \frac{\gamma_c}{2} / \frac{\gamma_c}{2}$ — коэффициент скоса пазов [4], γ_c — угол скоса пазов.

Тогда можно записать

$$\gamma_{C3} = \pi/3, \quad \rho_3 = 3/\pi = 0,9549 \text{ — для трехсекционных БДПТ};$$

$$\gamma_{C4} = \pi/4, \quad \rho_4 = \frac{8}{\pi} \sin \frac{\pi}{8} = 0,9745 \text{ — для четырехсекционных БДПТ}.$$

Если якорная обмотка уложена в пазы, скошенные на одно пазовое деление, или на поверхности магнитопровода якоря, а распределение магнитной индукции по окружности воздушного зазора — трапецидальное, то

$$b_{\text{cp}} \approx \frac{b_{\text{max}} + b_{\text{min}}}{2}. \quad (6)$$

Исходя из формул (1) и (3), получаем соотношение между электромагнитными моментами M_3 и M_4 БДПТ с трех- и четырехсекционными якорными обмотками:

$$\frac{M_3}{M_4} = \frac{\mu_{\text{cp}3}}{\mu_{\text{cp}4}} = \frac{b_{\text{cp}3}K}{b_{\text{cp}4}}. \quad (7)$$

Значения коэффициентов b_{max} , b_{min} , $b_{\text{cp}3}$ и $b_{\text{cp}4}$ можно определить, используя рис. 2–5 и формулы (4)–(6).

На рис. 2, а и 3, а показано распределение магнитной индукции по окружности воздушного зазора в виде синусоиды 1 и трапеции 2 с

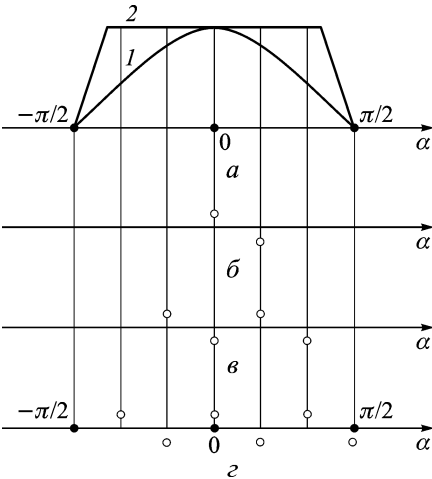


Рис. 2. Распределение магнитной индукции по окружности воздушного зазора и положения секций в виде точек трехсекционной якорной обмотки, уложенных в прямые пазы магнитопровода якоря;

a — распределение магнитной индукции: 1 — в виде синусоиды, 2 — в виде трапеции; *б* — положения одной секции; *в* — положения двух секций; *г* — положения трех секций

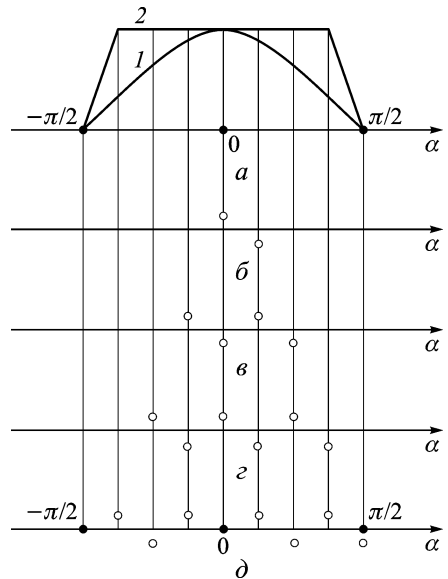


Рис. 3. Распределение магнитной индукции несимметричной четырехсекционной якорной обмотки (*a...г*, 1 и 2 — см. рис. 2) и положения четырех секций (*д*)

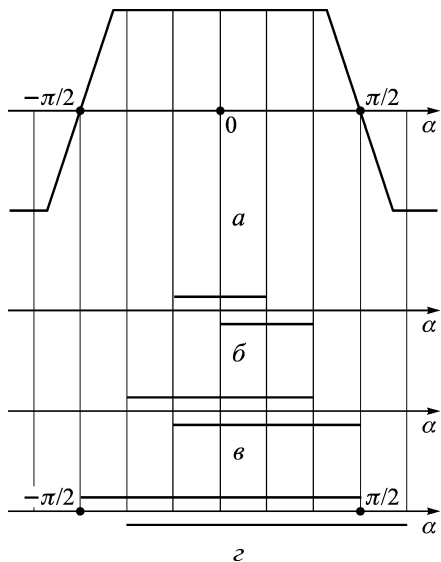


Рис. 4. Распределение магнитной индукции и положения секций по окружности воздушного зазора и положения секций в виде отрезков трехсекционной якорной обмотки, уложенных в скошенные пазы или на поверхности магнитопровода якоря:

a — распределение магнитной индукции в виде трапеции; *б* — положения одной секции; *в* — положения двух секций; *г* — положения трех секций

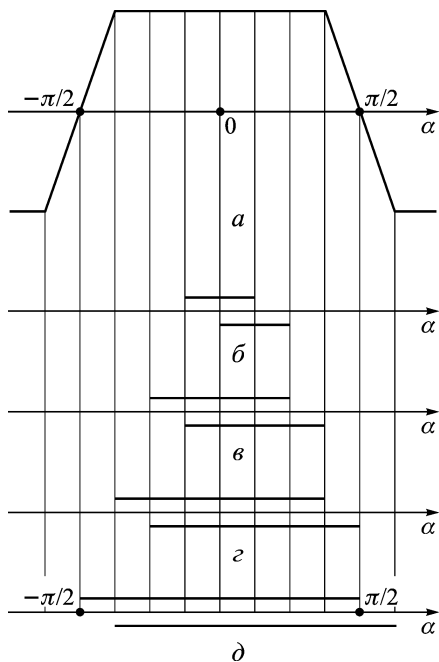


Рис. 5. Распределение магнитной индукции несимметричной четырехсекционной якорной обмотки:

a...*г* — см. рис. 4; *д* — положения четырех секций

угловым размером верхнего основания, равным 135 эл. град. Здесь α — угол, отсчитываемый от середины полуволны магнитной индукции и определяющий длину дуги на окружности воздушного зазора. На рис. 2, *б*, *в*, *г* изображены положения одной, двух, трех секций трехсекционной обмотки, а на рис. 3, *б*, *в*, *г*, *д* — положения одной, двух, трех, четырех секций четырехсекционной обмотки, уложенных в прямые пазы магнитопровода якоря: в момент времени t_c , соответствующий середине МКИ, — над осью α и в момент t_k окончания МКИ — под осью α .

На рис. 4, *a* и 5, *a* показано распределение магнитной индукции по окружности воздушного зазора в виде трапеции. На рис. 4, *б*, *в*, *г* изображены положения одной, двух и трех секций трехсекционной обмотки, а на рис. 5, *б*, *в*, *г*, *д* — положения одной, двух, трех, четырех секций четырехсекционной обмотки, уложенных в скошенные пазы или на поверхности магнитопровода якоря. Положения секций над осью α соответствуют моменту времени t_c , а положение под осью α — моменту времени t_k .

Для рис. 2–5 при положении секций над осью α можно записать

$$b = b_{\max} = \sum_1^S b'_i, \quad (8)$$

а при положении секций под осью α –

$$b = b_{\min} = \sum_1^S b''_i, \quad (9)$$

где b'_i и b''_i – магнитные индукции, относящиеся к i -й работающей секции в моменты времени t_c и t_k .

Покажем, как можно определить значения коэффициентов b_{\max} , b_{\min} , $b_{\text{ср3}}$, $b_{\text{ср4}}$, M_3/M_4 и пульсаций ε_3 , ε_4 , используя формулы (4)–(9), соотношения K и S_3/S_4 и рис. 2–5 для $S_3 = 2$ и $S_4 = 3$.

Используя рис. 3, a , z , для синусоидального распределения магнитной индукции можно записать такие выражения:

$$b_{\max} = \cos\left(-\frac{\pi}{4}\right) + \cos 0 + \cos \frac{\pi}{4} = 2,414,$$

$$b_{\min} = \cos\left(-\frac{\pi}{8}\right) + \cos \frac{\pi}{8} + \cos \frac{3\pi}{8} = 2,23,$$

$$b_{\text{ср4}} = \frac{8}{\pi} \left[\int_{-\pi/4}^{-\pi/8} (\cos \alpha) d\alpha + \int_0^{\pi/8} (\cos \alpha) d\alpha + \int_{\pi/4}^{3\pi/8} (\cos \alpha) d\alpha \right] = 2,353,$$

$$\varepsilon_4 = \frac{2,414 - 2,23}{2 \cdot 2,353} = 0,039,$$

а используя рис. 2, a и $в$, – следующие выражения:

$$b_{\max} = \cos\left(-\frac{\pi}{6}\right) + \cos \frac{\pi}{6} = 1,732, \quad b_{\min} = \cos 0 + \cos \frac{\pi}{3} = 1,5,$$

$$b_{\text{ср3}} = \frac{6}{\pi} \left[\int_{-\pi/6}^0 (\cos \alpha) d\alpha + \int_{\pi/6}^{\pi/3} (\cos \alpha) d\alpha \right] = 1,654,$$

$$\varepsilon_3 = \frac{1,732 - 1,5}{2 \cdot 1,654} = 0,070,$$

$$M_3/M_4 = \frac{b_{\text{ср3}} K}{b_{\text{ср4}}} = 1,654 \cdot 1,414/2,353 = 0,994.$$

Полученные значения $b_{\text{ср3}}$, $b_{\text{ср4}}$, M_3/M_4 , ε_3 , ε_4 относятся к БДПТ с якорными обмотками, уложенными в прямые пазы магнитопровода якоря. Для БДПТ с обмотками, уложенными в скошенные пазы или на поверхности якоря, нужно полученные значения $b_{\text{ср3}}$ и $b_{\text{ср4}}$ умножить на коэффициенты скоса пазов ρ_3 и ρ_4 .

Для трапециoidalного распределения магнитной индукции из рис. 3, *a*, *z* следует, что

$$b_{\max} = b_{\min} = b_{\text{ср}4} = 3, \quad \varepsilon_4 = 0.$$

Используя данные рис. 2, *a* и *в*, получаем:

$$b_{\max} = b_{\min} = b_{\text{ср}3} = 2, \quad \varepsilon_3 = 0, \quad M_3/M_4 = \frac{2 \cdot 1,414}{3} = 0,940.$$

$$b_{\max} = 6/2 = 3, \quad b_{\min} = 5,5/2 = 2,75,$$

$$b_{\text{ср}4} \approx (3 + 2,75)/2 = 2,875, \quad \varepsilon_4 = \frac{3 - 2,75}{2 \cdot 2,875} = 0,043$$

— для рис. 5, *a* и *z*;

$$b_{\max} = 4/2, \quad b_{\min} = (3,25 + 0,75/2)/2 = 1,812,$$

$$b_{\text{ср}3} \approx (2 + 1,812)/2 = 1,906, \quad \varepsilon_3 = \frac{2 - 1,812}{2 \cdot 1,906} = 0,049,$$

$$M_3/M_4 = \frac{1,906 \cdot 1,414}{2,875} = 0,940$$

— для рис. 4, *a*, *в*.

Аналогично можно определить значения коэффициентов b_{\max} , b_{\min} , $b_{\text{ср}3}$, $b_{\text{ср}4}$, отношения моментов M_3/M_4 и пульсаций $\varepsilon_3/\varepsilon_4$ для других случаев.

В табл. 1 приведены результаты расчетов коэффициентов $b_{\text{ср}3}$, $b_{\text{ср}4}$ и пульсаций ε_3 , ε_4 . Здесь и далее способ 1 укладки обмотки означает укладку обмотки в прямые пазы магнитопровода якоря, а способ 2 — укладку обмотки в скошенные пазы или на поверхности магнитопровода якоря.

В табл. 2 приведены значения отношения M_3/M_4 для различных сочетаний чисел S_3 и S_4 .

На рис. 6, *a* показаны отношения электромагнитных моментов M_3/M_4 , а на рис. 6, *б* — отношения пульсаций $\varepsilon_3/\varepsilon_4$ этого момента для БДПТ с трех- и четырехсекционной якорными обмотками в зависимости от чисел одновременно работающих секций S_3 и S_4 в первом и втором двигателях, формы распределения магнитной индукции по окружности воздушного зазора и способа укладки обмотки; рис. 6, *a*, *б* построены по данным табл. 1 и 2 для трех случаев: $S_3 = 1$, а $S_4 = 2$; $S_3 = 2$, а $S_4 = 3$; $S_3 = 3$, а $S_4 = 4$.

Определим (докажем) оптимальные значения чисел одновременно работающих секций обмотки $S_{3\text{опт}}$ и $S_{4\text{опт}}$.

Как видно из табл. 1, при переходе от $S_3 = 1$ к $S_3 = 2$ коэффициент $b_{\text{ср}3}$ увеличивается в 1,73–2 раза (в зависимости от особенностей выполнения БДПТ) при увеличении потребляемой мощности P_3 в 2

Особенности выполнения БДПТ		Характеристики БДПТ	Значение характеристик БДПТ для числа S одновременно работающих секций обмотки			
Форма распределения индукции	Способ укладки обмотки		1	2	3	4
Синусоидальная	1, 2	$b_{ср3}$	0,955	1,654	1,910	–
		$b_{ср4}$	0,975	1,801	2,353	2,547
		ε_3	0,070	0,070	0,070	–
		ε_4	0,039	0,039	0,039	0,039
Трапецидальная	1	$b_{ср3}$	1	2	2,5	–
		$b_{ср4}$	1	2	3,0	3,5
		ε_3	0	0	0,200	–
		ε_4	0	0	0	0,143
	2	$b_{ср3}$	1	1,906	2,313	–
		$b_{ср4}$	1	2	2,875	3,25
		ε_3	0	0,049	0,135	–
		ε_4	0	0	0,043	0,077

Таблица 2

Особенности выполнения БДПТ		Значения отношения M_3/M_4 для сочетаний S_3/S_4					
Форма распределения индукции	Способ укладки обмотки	1/1	1/2	2/2	2/3	3/3	3/4
Синусоидальная	1,2	1,132	0,866	1,061	0,994	0,938	1,000
Трапецидальная	1	1,155	0,817	1,155	0,940	0,963	0,950
Трапецидальная	2	1,155	0,817	1,101	0,940	0,929	0,950

раза, а пульсация ε_3 увеличивается только при трапецидальном распределении индукции и втором способе укладки обмотки от нуля до 0,049. При переходе от $S_3 = 2$ к $S_3 = 3$ коэффициент $b_{ср3}$ увеличивается только в 1,16–1,25 раза при увеличении мощности P_3 в 1,5 раза, а пульсация ε_3 при трапецидальном распределении индукции становится неприемлемой (0,200 и 0,135).

Следовательно, для синусоидального распределения индукции, а также для трапецидального распределения и первого способа укладки обмотки $S_{3opt} = 2$. Для трапецидального распределения индукции и второго способа укладки обмотки $S_{3opt} = 1$.

Как видно из табл. 1, при $S_4 = 1$ коэффициент $b_{ср4}$ относительно мал и поэтому неприемлем. При переходе от $S_4 = 2$ к $S_4 = 3$ коэффициент $b_{ср4}$ увеличивается в 1,31–1,5 раза при увеличении потребляе-

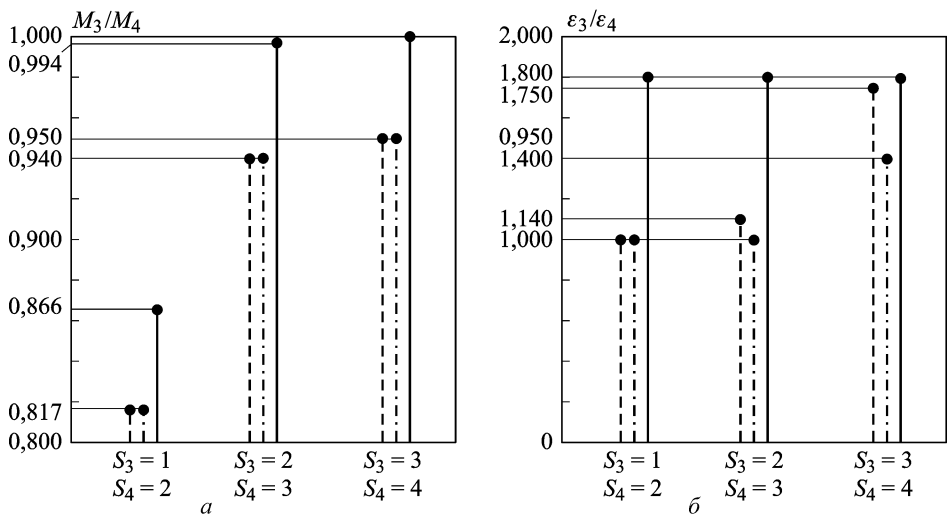


Рис. 6. Отношения электромагнитных моментов M_3/M_4 (а) и его пульсаций $\varepsilon_3/\varepsilon_4$ (б) БДПТ с трех- и четырехсекционной якорными обмотками в зависимости от чисел одновременно работающих секций S_3 и S_4 в первом и втором БДПТ:

— для синусоидального распределения магнитной индукции по окружности воздушного зазора; - · - · - для трапецидального распределения индукции и укладки якорной обмотки в прямые пазы магнитопровода, --- для трапецидального распределения индукции и укладки обмотки в скошенные пазы или на поверхности магнитопровода якоря

мой мощности P_4 в 1,5 раза, а пульсация ε_4 увеличивается только при трапецидальном распределении индукции и втором способе укладки обмотки от нуля до 0,043. При переходе от $S_4 = 3$ к $S_4 = 4$ коэффициент $b_{ср4}$ увеличивается в 1,08–1,17 раза при увеличении мощности P_4 в 1,33 раза, а пульсация ε_4 при трапецидальном распределении индукции становится неприемлемой, т.е. 0,143 и 0,077.

Следовательно, для синусоидального распределения индукции, а также для трапецидального распределения и первого способа укладки обмотки $S_{4opt} = 3$. Для трапецидального распределения индукции и второго способа укладки обмотки $S_{4opt} = 2$.

Следует отметить, что для первого способа укладки обмотки вращающий момент на валу пульсирует из-за зубчатого строения магнитопровода якоря при нескошенности его зубцов и пазов (даже если теоретически $\varepsilon = 0$). Поэтому нужно сравнивать характеристики обоих БДПТ для двух случаев: $S_3 = 1$ и $S_4 = 2$ при трапецидальном распределении индукции и втором способе укладки обмотки; $S_3 = 2$ и $S_4 = 3$ при синусоидальном распределении индукции.

Как следует из табл. 1 и 2, в первом случае $M_3/M_4 = 0,817$, $\varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 0$, а во втором случае $M_3/M_4 = 0,994$, $\varepsilon_3/\varepsilon_4 = 1,8$.

Выводы. Бесконтактный двигатель постоянного тока с несимметричной четырехсекционной якорной обмоткой создает большой

электромагнитный момент, а пульсация этого момента меньше, чем у БДПТ с трехсекционной якорной обмоткой. Поэтому БДПТ с несимметричной четырехсекционной якорной обмоткой может быть рекомендован для применения в качестве моментного электродвигателя.

Этот вывод подтверждается практикой применения моментных БДПТ. В одном из научно-производственных объединений были разработаны, испытаны и внедрены при участии автора статьи такие малогабаритные моментные электродвигатели. Двигатель с несимметричной четырехсекционной якорной обмоткой ДБ-042, как и БДПТ с трехсекционной обмоткой, был выполнен с наружным диаметром 32 мм, длиной 9 мм, составным четырехполюсным индуктором, гладким кольцевым магнитопроводом якоря и якорной обмоткой, уложенной на внутренней поверхности этого магнитопровода. Немагнитный зазор между полюсами индуктора и магнитопроводом якоря равен 2,5 мм. При испытаниях электродвигателей пульсация момента составляла примерно 8% у БДПТ с трехсекционной обмоткой и 4,5% у БДПТ с несимметричной четырехсекционной обмоткой. Таким образом, теория и практика показывают преимущество БДПТ с несимметричной четырехсекционной якорной обмоткой по сравнению с БДПТ с трехсекционной обмоткой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.С. № 127084 от 15.07.1986 г. Вентильный электродвигатель.
2. Г р и д и н В. М. Бесконтактный двигатель постоянного тока с несимметричной четырехсекционной обмоткой // Сб. тр. Ракетно-космическая техника. Сер. 10. – 1991. – Вып. 2.
3. Б а р а н о в М. В., Б р о д о в с к и й В. Н., З и м и н А. В., К а р ж а - в о в Б. Н. Электрические следящие приводы с моментными управлением исполнительными двигателями. – М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 240 с.
4. В о л ь д е к А. И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.

Статья поступила в редакцию 3.06.2010

Владимир Михайлович Гридин родился в 1940 г., окончил Московский энергетический институт в 1963 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Электротехника и промышленная электроника” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 45 научных работ в области электроники.

V.M. Gridin (b. 1940) graduated from the Moscow Energy Institute in 1963. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Electrical Engineering and Industrial Electronics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 45 publications in the field of electronics.