

## Электромагнитные процессы в бесконтактных двигателях постоянного тока с двумя индукторами

ГРИДИН В.М.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

*Электромагнитные процессы исследованы для двух бесконтактных двигателей постоянного тока, содержащих трехсекционную якорную обмотку, три силовых транзистора и два цилиндрических индуктора – магнита. У одного двигателя якорная обмотка обычная, барабанная, а числа радиальных полюсов двух индукторов отличаются в три раза. У другого – тороидальная, а числа радиальных полюсов двух индукторов отличаются в два раза. Электромагнитные процессы исследованы для якорной обмотки с учетом распределения результирующей магнитной индукции по окружности воздушного зазора и индуктивности секций якорной обмотки. В результате исследования получены выражения для ЭДС, тока в секциях якорной обмотки, электромагнитной мощности, потребляемой якорной обмоткой, а также уравнения и выражения, позволяющие определять оптимальные значения отношения ЭДС к напряжению питания и угла опережения коммутации. Показано, как полученные результаты следует использовать при проектировании и разработке бесконтактных двигателей постоянного тока.*

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** обычная и тороидальная обмотки, цилиндрические индукторы с различным числом полюсов, электромагнитная и потребляемая мощности, оптимальные коэффициент ЭДС и угол опережения коммутации

Бесконтактные двигатели постоянного тока (БДПТ) [1–3] в отличие от обычных двигателей постоянного тока не имеют скользящих контактов и поэтому работают более надежно, особенно при вибрациях, ускорениях, после ударов, в вакууме и т.п. Благодаря этому преимуществу БДПТ широко используются в системах автоматизации и телемеханики, различных устройствах военного, промышленного, медицинского и бытового назначения при указанных условиях работы [4].

Обычно применяют БДПТ с трехсекционной якорной обмоткой (ЯО), шестью силовыми транзисторами при двухполярной коммутации или с тремя силовыми транзисторами при однополярной коммутации секций ЯО по положению ротора [1, 5, 6]. Индуктор выполняют в виде магнита-звездочки или составным из внутреннего магнитомягкого основания и наружных полюсов-магнитов. В [7] рассмотрены два БДПТ с трехсекционной ЯО, тремя силовыми транзисторами и двумя цилиндрическими индукторами – магнитами с различным числом полюсов. Последние проще, дешевле составного индуктора. БДПТ с тремя силовыми транзисторами применяют при мощности до 50 Вт.

В статье исследуются электромагнитные процессы для рассмотренных в [7] БДПТ. На рис. 1 изображены продольные сечения электромеханической части таких БДПТ с обычной и тороидальной ЯО.

Основной и дополнительный индукторы – цилиндрические магниты с радиальными полюсами, дополнительный индуктор имеет утроенное (рис. 1,а) или удвоенное (рис. 1,б) число полюсов, якорь содержит

магнитопровод и обычную барабанную (рис. 1,а) или тороидальную (рис. 1,б) ЯО. Обычная ЯО – диаметрально сосредоточенная, тороидальная ЯО состоит из катушек, намотанных вокруг магнитопровода якоря.

Рассмотрим вопросы, касающиеся магнитной индукции в воздушном зазоре. На рис. 2 показано упрощенное распределение по окружности воздушного зазора магнитной индукции: от воздействия каждого и обоих индукторов в БДПТ по рис. 1,а. Координата окружности зазора представлена углом  $\alpha$ .

Считаем, что

$$b_1 = B_{m1} \sin \alpha; \quad b_3 = B_{m3} \sin 3\alpha; \quad B_{m3} / B_{m1} = 0,75.$$

Распределение результирующей для ЯО магнитной индукции  $b$  выразим следующим образом:

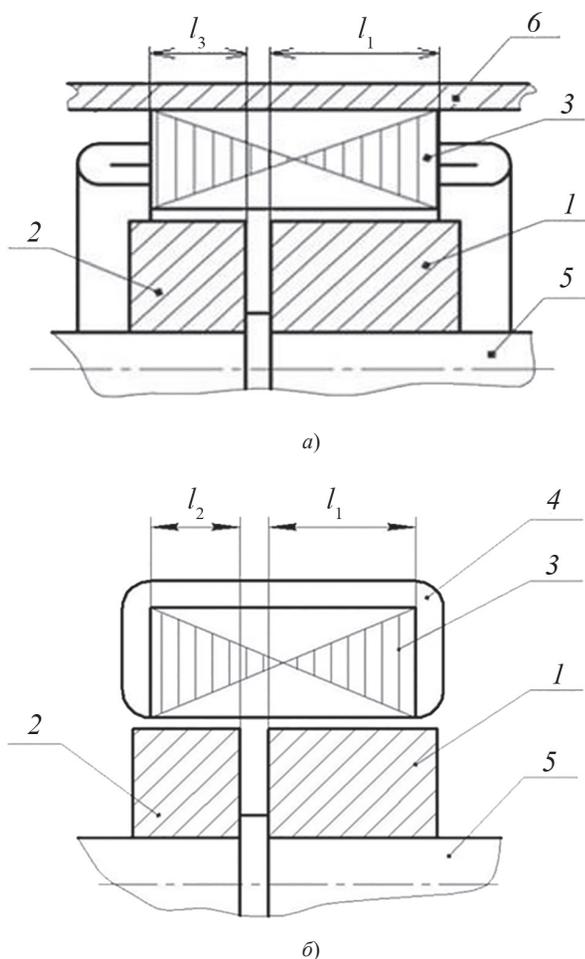
$$b = \frac{l_1 b_1 + l_3 b_3}{l_1 + l_3} = \frac{l_1}{l_1 + l_3} \bar{b} B_{m1},$$

где  $\bar{b}$  – относительная результирующая для ЯО магнитная индукция;  $l_1$  и  $l_3$  – значения активной длины индукторов 1 и 2 (рис. 1,а).

В [7] установлено, что при  $l_1 = 3(l_1 + l_3)/4$ ,  $l_3 = (l_1 + l_3)/4$  распределение результирующей магнитной индукции  $b$  наиболее близко к желаемому трапецеидальному (рис. 2), а пульсация магнитной индукции минимальна, при этом

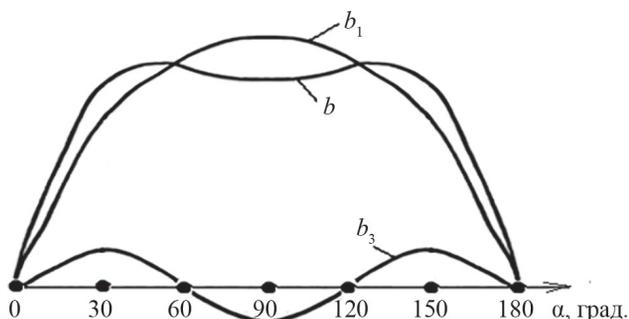
$$\bar{b} = \sin \alpha + 0,25 \sin 3\alpha.$$

На угловом интервале  $\alpha = 30 - 150^\circ$  минимальное значение относительной индукции



**Рис. 1.** Продольное сечение электромеханической части БДПТ с обычной якорной обмоткой (а) и тороидальной ЯО (б): 1 – основной индуктор; 2 – дополнительный индуктор; 3 – яркость; 4 – катушка ЯО; 5 – вал; 6 – корпус

**Fig. 1.** Longitudinal section of the electromechanical part of the BDPT with conventional nuclear power plant (a) and with toroidal nuclear power plant (b): 1 – main inductor; 2 – additional inductor; 3 – armature; 4 – armature coil; 5 – shaft; 6 – housing



**Рис. 2.** Упрощенное распределение по окружности воздушного зазора магнитной индукции:  $b_1$  – от воздействия основного индуктора;  $b_3$  – от воздействия дополнительного индуктора;  $b$  – от воздействия обоих индукторов

**Fig. 2.** Simplified distribution of magnetic induction along the circumference of the air gap:  $b_1$  – from the influence of the main inductor;  $b_3$  – from the influence of the main inductor;  $b$  – from the influence of both inductors

$$\bar{b}_{\min} = \bar{b}(30^\circ) = 0,75,$$

а ее максимальное значение  $\bar{b}_{\max}$  определим из условия:

$$\frac{\partial \bar{b}}{\partial \alpha} = \cos \alpha + 0,75 \cos 3\alpha = \cos \alpha (1,25 - 3 \cos^2 \alpha) = 0.$$

Получим:

$$\alpha = 90^\circ \text{ и } \alpha_m = \arccos \sqrt{1,25/3} = 49,8^\circ;$$

$$\bar{b}_{\max} = \bar{b}(\alpha_m) = \bar{b}(49,8^\circ) = 0,89.$$

Пульсация магнитной индукции

$$\delta = \frac{\bar{b}_{\max} - \bar{b}_{\min}}{\bar{b}_{\max} + \bar{b}_{\min}} = 0,085.$$

Среднее значение относительной индукции  $\bar{b}$  на интервале  $\alpha = 30-150^\circ$ :

$$\bar{b}_{\text{cp}} \approx \frac{\bar{b}_{\min} + \bar{b}_{\max}}{2} = \delta = 0,82.$$

Отсюда отклонение магнитной индукции от ее среднего значения

$$\frac{\bar{b}_{\min} - \bar{b}_{\max}}{2} = \delta \bar{b}_{\text{cp}},$$

Решив уравнение  $\bar{b} = \bar{b}_{\text{cp}} = 0,82$ , получим соответствующие значения угла  $\alpha$  35,5, 69, 111 и 144,5°.

Будем считать упрощенно, но в соответствии с рис. 2, что относительная магнитная индукция  $\bar{b}$  изменяется линейно на интервале  $\alpha = 0-33^\circ$  от нуля до среднего значения  $\bar{b}_{\text{cp}}$ , а на интервале  $\alpha = 33-147^\circ$  (180-33) – по закону, близкому к синусоидальному с амплитудой 0,085  $\bar{b}_{\text{cp}}$  при постоянной составляющей  $\bar{b}_{\text{cp}}$ . В этом случае можно установить, что  $\bar{b} = \bar{b}_{\text{cp}}$  при значениях угла  $\alpha$ , близких к полученным выше, т.е. при 33, 71, 109 и 147°.

На рис. 3 показано распределение по окружности воздушного зазора магнитной индукции: от воздействия каждого и обоих индукторов в БДПТ по рис. 1,б. Считаем:

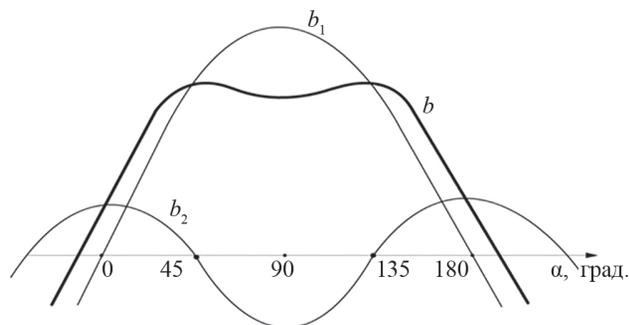
$$b_1 = B m_1 \sin \alpha; b_2 = B m_2 \cos 2\alpha; B m_2 / B m_1 = 0,75.$$

Распределение результирующей для ЯО магнитной индукции  $b$  выразим следующим образом:

$$b = \frac{l_1 b_1 + l_2 b_2}{l_1 + l_2} = \frac{l_1}{l_1 + l_2} \bar{b} B m_1,$$

где  $\bar{b}$  – относительная результирующая для ЯО магнитная индукция;  $l_1$  и  $l_2$  – значения активной длины индукторов 1 и 2 (рис. 1,б).

В [7] установлено, что при  $l_1 = 9(l_1 + l_2)/13$  и  $l_2 = 4(l_1 + l_2)/13$  распределение результирующей магнитной индукции  $b$  наиболее близко к желаемому трапециoidalному (рис. 3), а пульсация магнитной индукции минимальна:



**Рис. 3.** Распределение по окружности воздушного зазора магнитной индукции:  $b_1$  – от воздействия основного индуктора;  $b_2$  – от воздействия дополнительного индуктора;  $b$  – от воздействия обоих индукторов

**Fig. 3.** Distribution of the magnetic induction air gap around the circumference:  $b_1$  – from the influence of the main inductor;  $b_2$  – from the influence of an additional inductor;  $b$  – from the influence of both inductors

$$\bar{b} = \sin \alpha + \frac{1}{3} \cos 2\alpha = \sin \alpha + \frac{1}{3} (1 - 2 \sin^2 \alpha).$$

На угловом интервале  $\alpha = 30\text{--}150^\circ$  минимальное значение относительной индукции

$$\bar{b}_{\min} = \bar{b}(30^\circ) = 0,6667,$$

ее максимальное значение

$$\bar{b}_{\max} = \bar{b}(48,6^\circ) = 0,7073,$$

среднее значение  $\bar{b}_{\text{cp}} = 0,69$ , а пульсация равна 0,029 [7]. Т. е. пульсация индукции  $b$  является незначительной, и поэтому ею пренебрегаем.

Решив уравнение  $\bar{b} = 0$ , получим соответствующие значения угла  $\alpha$ , равные  $-16,5$  и  $196,5^\circ$  (рис. 3).

Решив уравнение  $\bar{b} = \bar{b}_{\text{cp}} = 0,69$ , получим значения угла  $\alpha$ , равные  $36$  и  $144^\circ$ . Будем считать упрощенно, но в соответствии с рис. 3, что результирующая индукция  $b$  на угловом интервале  $-16,5\text{--}33^\circ$  изменяется линейно, а на интервале  $\alpha = 33\text{--}147^\circ$  она не изменяется.

На рис. 4 изображены упрощенные осциллограммы напряжения  $U$  на секции ЯО, ЭДС вращения  $e$  и тока  $i$  в секции ЯО, не учитывающие переменные составляющие ЭДС и тока на угловом интервале, где ЭДС и ток показаны неизменными. Здесь  $T = 20/(pn)$  – период коммутации или время подключения секции к источнику питания;  $n$  – число оборотов ротора в минуту;  $p$  – число пар полюсов двигателя;  $\vartheta = \theta_d/120^\circ$  – относительный угол опережения коммутации;  $\theta_d$  – электрический угол смещения датчика положения ротора (ДПР) из нейтрального положения против направления вращения вала двигателя с целью увеличения мощности и КПД двигателя;  $\vartheta T$  и  $T_c$  – времена нарастания и спада тока;  $E$  и  $(U - E)/r$  – максимальные значения ЭДС и тока;  $r$  – активное сопротивление секции ЯО.

Осциллограммы изображены для благоприятного, оптимального случая: форма тока совпадает с формой

ЭДС, что соответствует максимальному значению электромагнитного КПД, т.е. отношения электромагнитной мощности к мощности, потребляемой ЯО. В этом случае ЭДС и ток за время  $\vartheta T$  достигают установившихся значений и не изменяются до отключения секции от источника питания.

Рассмотрим вопросы, касающиеся ЭДС в секциях ЯО, которая пропорциональна результирующей магнитной индукции  $b$ . Левую боковую сторону такой трапеции ЭДС для первого интервала времени  $t = 0 \div \vartheta T$  (рис. 4) выразим:

$$e = \left(1 - d\vartheta + \frac{d}{T}t\right)E. \tag{1}$$

Для БДПТ (рис. 1,а)  $d = 120^\circ/33^\circ = 3,64$ . Такое значение  $d$  справедливо, так как при нейтральном положении ДПР ( $\theta_d = 0, \vartheta = 0$ ) и  $t = 0$   $e = E$ , а при  $\vartheta = 33^\circ/120^\circ$  и  $t = 0$   $e = 0$ . Для БДПТ (рис. 1,б)  $d = 120^\circ/(33^\circ + 16,5^\circ) = 2,42$ . При  $\theta_d = 0, \vartheta = 0$  и  $t = 0$   $e = E$ , а при  $\vartheta = (33^\circ + 16,5^\circ)/120^\circ$  и  $t = 0$   $e = 0$ .

На втором интервале времени  $t = \vartheta T \div \vartheta T + 0,95T$  [ $0,95 = (147 - 33)/1200$ ] в БДПТ (рис. 1,а), а ЭДС  $e$  как пропорциональная индукции  $b$  изменяется по закону, близкому к синусоидальному с амплитудой  $0,085E$  при постоянной составляющей  $E$ , т. е. амплитуда переменной составляющей ЭДС в 11,8 раз меньше постоянной составляющей  $E$ . К тому же, индуктивное сопротивление секций ЯО увеличивает их сопротивление и поэтому демпфирует (уменьшает) переменный ток в секциях ЯО. Следовательно, переменные составляющие ЭДС и тока влияют на электромагнитные процессы незначительно и поэтому ими пренебрегаем. А в БДПТ (рис. 1,б) пульсации магнитной индукции составляют всего 0,029 (см. выше), и поэтому переменными составляющими ЭДС и тока также пренебрегаем.

Рассмотрим непосредственно электромагнитные процессы в БДПТ. Для указанного оптимального случая вначале найдем выражения для токов  $\bar{i}_1, \bar{i}_2, \bar{i}_3$ , т. е. для отношений токов  $i_1, i_2, i_3$  на первом, втором и третьем интервалах времени к току в секции ЯО при пуске двигателя, равному  $U/r$ .

Обозначим:  $\varepsilon = E/U$  – коэффициент ЭДС;  $\tau = L/r$  – электрическая постоянная времени секции ЯО;  $L$  – индуктивность секции;  $\beta = T/\tau$  – отношение, учитывающее влияние индуктивности ЯО на время нарастания и спада тока в секциях ЯО. Взаимной индуктивностью секций пренебрегаем, так как ЯО – диаметральной сосредоточенная, при этом в пазах якоря лежат проводники только одной секции, и поэтому магнитная связь между секциями незначительна.

Для первого интервала времени  $t = 0 - \vartheta T$  (рис. 4) справедливо уравнение равновесия напряжений в якорной цепи:

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

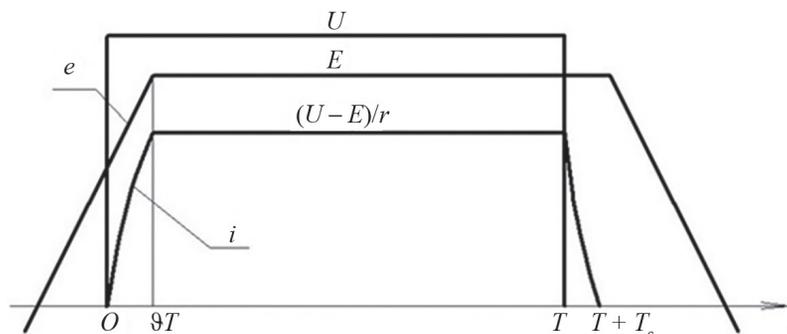


Рис. 4. Упрощенные осциллограммы напряжения  $U$  на секции ЯО, ЭДС вращения  $e$  и тока  $i$  в секции ЯО

Fig. 4. Simplified waveforms of voltage  $U$  on the armature winding section, EMF of rotation  $e$  and current  $i$  in the armature winding section

Решив это уравнение с учетом (1), получим выражение для относительного тока  $\bar{i}_1$ :

$$\bar{i}_1 = s(1 - e^{-t/T}) - d\varepsilon \frac{t}{T}; \quad (2)$$

$$s = 1 - \varepsilon + d\varepsilon\vartheta + d\varepsilon/\beta. \quad (3)$$

При  $t = \vartheta T$  в соответствии с рис. 4 и (2)

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

Отсюда с учётом (3) получим выражение

$$1 - \varepsilon^{\beta\vartheta} + \beta\vartheta + \beta(1 - \varepsilon)/(d\varepsilon) = 0. \quad (4)$$

Так как  $\varepsilon^{\beta\vartheta} \approx 1 + \beta\vartheta + \beta^2\vartheta^2/2$ , то

$$\vartheta \approx \sqrt{\frac{2(1 - \varepsilon)}{d\beta\varepsilon}}. \quad (5)$$

Очевидно, что при  $\tau = 0$ , т. е. при  $\beta = \infty$ ,  $\vartheta = 0$ , и что чем меньше  $\beta$  и  $\varepsilon$ , тем больше относительный угол  $\vartheta$ .

С целью упрощения (2) считаем; что ток  $\bar{i}_1$  изменяется линейно:

$$\bar{i}_1 = (1 - \varepsilon) \frac{t}{\vartheta T}. \quad (6)$$

Такое допущение оправдано тем, что первый интервал значительно меньше второго, ЭДС и ток на первом интервале возрастают, а на втором интервале они максимальные как установившиеся.

На втором интервале времени  $t = \vartheta T - T$  (рис. 4) для относительного тока справедливо выражение

$$\bar{i}_2 = 1 - \varepsilon. \quad (7)$$

Для третьего интервала времени (рис. 4)  $t = T \div T + T_c$  с целью упрощения выражений считаем, что за время  $T_c$  относительный ток спадает от  $1 - \varepsilon$  до нуля линейно. Время  $T_c$  спада тока до нуля зависит от вида электрических цепей, предохраняющих транзисторы от перенапряжения, и от времени нарастания тока  $\vartheta T$ . Оно тем больше, чем больше  $\vartheta T$ :

$$T_c = \gamma\vartheta T,$$

где  $\gamma \approx 0,3 \div 0,7$ .

Тогда

$$\bar{i}_3 = (1 - \varepsilon) \left( 1 - \frac{t - T}{\gamma\vartheta T} \right). \quad (8)$$

Найдем выражения для относительных мощностей  $\bar{P}_{\text{ЭМ}}$  и  $\bar{P}_{\text{П}}$ , т.е. для отношений абсолютных электромагнитной мощности  $P_{\text{ЭМ}}$  и мощности, потребляемой ЯО, к мощности, потребляемой ЯО при пуске двигателя:

$$\bar{P}_{\text{П}} = P_{\text{П}} r / U^2; \quad \bar{P}_{\text{ЭМ}} = P_{\text{ЭМ}} r / U^2.$$

Согласно рис. 4:

$$\bar{P}_{\text{П}} = \frac{1}{T} \left( \int_0^{\vartheta T} \bar{i}_1 dt + \int_{\vartheta T}^T \bar{i}_2 dt \right); \quad (9)$$

$$\bar{P}_{\text{ЭМ}} = \frac{1}{T} \left( \int_0^{\vartheta T} \frac{e}{U} \bar{i}_1 dt + \int_{\vartheta T}^T \varepsilon \bar{i}_2 dt + \int_T^{T+T_c} \varepsilon \bar{i}_3 dt \right). \quad (10)$$

Из (9) и (10) с учетом (1), (6) – (8) получим конечные выражения:

$$\bar{P}_{\text{П}} \approx (1 - \varepsilon) \left( 1 - \frac{\vartheta}{2} \right); \quad (11)$$

$$\bar{P}_{\text{ЭМ}} \approx \varepsilon(1 - \varepsilon) \left( 1 - \frac{\vartheta}{2} - \frac{d}{6} \vartheta^2 + \frac{\gamma\vartheta}{2} \right). \quad (12)$$

Полученные выражения для относительных электромагнитной и потребляемой мощностей позволяют определять оптимальные значения коэффициента ЭДС  $\varepsilon$  и относительного угла при известных значениях электромагнитного КПД  $\eta_{\text{ЭМ}}$  и отношения  $\beta$ . Значение  $\eta_{\text{ЭМ}}$  больше значения КПД двигателя  $\eta_{\text{д}}$ , так как  $\eta_{\text{ЭМ}}$  учитывает только омические потери в ЯО. Значение  $\beta$  согласно [1] тем меньше, чем больше значения мощности, скорости вращения вала и габаритов БДПТ. Для мощности двигателя примерно до (40–60) Вт  $\beta \geq 1$ . Оптимальные значения  $\varepsilon$  и  $\vartheta$  можно определить наиболее точно путем решения системы двух уравнений. Первое уравнение – (4), а второе –

$$\eta_{ЭМ} = \bar{P}_{ЭМ} / \bar{P}_{П} = \varepsilon \left[ 1 + \left( \frac{\gamma \vartheta}{2} - \frac{d}{6} \vartheta^2 \right) / \left( 1 - \frac{\vartheta}{2} \right) \right]. \quad (13)$$

Согласно (5)

$$\varepsilon = \varepsilon(\vartheta) \approx 1 / (1 + d\beta\vartheta^2/2). \quad (14)$$

Преобразовав (13) с учетом (14), получим кубическое уравнение с одним неизвестным  $\vartheta$ :

$$c\vartheta^3 - q\vartheta^2 + g\vartheta + v = 0, \quad (15)$$

где  $c = \eta_{ЭМ}\beta$ ;  $q = 2\eta_{ЭМ}\beta + 0,667$ ;  $g = 2(\eta_{ЭМ} + \gamma - 1)/d$ ;  $v = 4(1 - \eta_{ЭМ})/d$ .

Для БДПТ (рис. 1, а и б) соответственно  $d = 3,64$  и  $d = 2,42$ , а  $\gamma \approx 0,5$  (см. выше). Пренебрегая малым членом с  $\vartheta^3$ , получим квадратное уравнение

$$q\vartheta^2 - g\vartheta - v = 0,$$

решение которого:

$$\vartheta = \frac{g + \sqrt{g^2 + 4qv}}{2q}. \quad (16)$$

Определив из (15) или (16) значение  $\vartheta$ , найдем  $\varepsilon$  по (14). Пренебрегая двумя малыми членами с  $\vartheta^3$  и  $g\vartheta$  в (15), получим простое выражение для  $\vartheta$  в явном виде:

$$\vartheta = \sqrt{v/q} = \sqrt{1,1(1 - \eta_{ЭМ}) / (2\beta + 0,667)}. \quad (17)$$

Из (17) и (14) видно, что чем больше электромагнитный КПД  $\eta_{ЭМ}$ , тем меньше  $\vartheta$ , но больше  $\varepsilon$  и что при уменьшении  $\beta$  увеличиваются  $\vartheta$  и  $\varepsilon$ . В таблице приведены результаты расчетов значений  $\varepsilon$  и  $\vartheta$  для БДПТ (рис. 1, а), подтверждающие указанные выводы.

$\beta$	$\eta_{ЭМ}$	$\varepsilon$	$\vartheta$
2	0,75	0,762	0,293
2	0,85	0,843	0,226
1	0,85	0,853	0,308
10	0,85	0,841	0,102

Результаты исследования электромагнитных процессов можно и нужно использовать для оптимального

проектирования и разработки БДПТ. При проектировании известны номинальные значения напряжения питания, мощности, скорости вращения вала двигателя и КПД  $\eta_{д}$  [8, 9]. Необходимо предварительно определить значения отношения  $\beta$ , например, как указано в [1], и электромагнитного КПД  $\eta_{ЭМ}$  по формуле:

$$\eta_{ЭМ} = (1,07 \div 1,15) \eta_{д}.$$

Зная  $\beta$  и  $\eta_{ЭМ}$ , нужно определить оптимальные значения  $\varepsilon$  и  $\vartheta$ , как указано выше, а по ним – относительные мощности  $\bar{P}_{П}$ ,  $\bar{P}_{ЭМ}$ , мощности  $P_{П}$ ,  $P_{ЭМ}$ , остальные характеристики и параметры двигателя.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балагуров В.А., Гридин В.М., Лозенко В.К. Бесконтактные двигатели постоянного тока с постоянными магнитами. М.: Энергия, 1975, 128 с.
2. Адвольткин Н.П. и др. Управляемые бесконтактные двигатели постоянного тока. М.: Энергоатомиздат, 1984, 160 с.
3. Brushed DC electric motor [Электрон. ресурс], URL: <https://en.engineering-solutions.ru/motorcontrol/brushdcmotok> (дата обращения 10.09.2021).
4. Permanent Magnet DC Motors [Электрон. ресурс], URL: [https://90130\\_GR-Katalog\\_korrigiert.pdf](https://90130_GR-Katalog_korrigiert.pdf) (дата обращения 10.09.2021).
5. Овчинников И.Е., Лебедев Н.И. Бесконтактные двигатели постоянного тока. Л.: Наука, 1979, 270 с.
6. Осин И.Л., Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств: Учебное пособие для вузов. М.: Изд-во МЭИ, 2003, 424 с.
7. Гридин В.М. Бесконтактные двигатели постоянного тока с трехсекционной обмоткой и двумя индукторами. – Электричество, 2021, № 1, с. 55–60.
8. ГОСТ 16264.0-2018. Машины электрические малой мощности. Двигатели. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2019, 26 с.
9. ГОСТ 16264.4-2018. Двигатели постоянного тока бесконтактные. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2019.

[10.09.2021]



Автор: **Гридин Владимир Михайлович** – кандидат техн. наук, доцент кафедры «Электротехника и промышленная электроника» Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (национального исследовательского университета), Москва, Россия.

# Electromagnetic Processes in Two-Inductor Brushless DC Motors

**GRIDIN Vladimir M.** (*Moscow State Technical University named N.E. Bauman (National Research University), Moscow, Russia*) – *Docent of the Electrical Engineering and Industrial Electronics Dept., Cand. Sci. (Eng.).*

*The electromagnetic processes that take place in two brushless direct current (BLDC) motors containing a three-section armature winding, three power transistors and two cylindrical magnet type inductors are studied. One of these motors has a conventional drum armature winding and two inductors with the numbers of their radial poles differing from each other by a factor of three. The other motor has a toroidal armature winding and two inductors with the numbers of their radial poles differing from each other by a factor of two. The electromagnetic processes were studied for the armature winding with taking into account the distribution of the resultant magnetic induction over the air gap circumference and the inductance of the armature winding sections. Expressions for the EMF and current in the armature winding sections, electromagnetic power, the power consumed by the armature winding, as well as equations and expressions using which it is possible to determine the optimal value of the EMF to power supply voltage ratio and the lead angle have been obtained. It is shown how the obtained results should be used in the design and development of BLDC motors.*

**Key words:** *conventional and toroidal windings, cylindrical inductors with different number of poles, electromagnetic and consumed power, optimal EMF coefficient and lead angle*

## REFERENCES

1. **Balagurov V.A., Gridin V.M., Lozenko V.K.** *Beskontaktnye dvigateli postoyannogo toka s postoyannymi magnitami* (Contactless DC Motors with Permanent Magnets). M.: Energiya, 1975, 128 p.
2. **Advotkin N.P., et al.** *Upravlyaemye beskontaktnye dvigateli postoyannogo toka* (Controlled Contactless DC Motors). M.: Energoatomizdat, 1984, 160 p.
3. **Brushed** DC electric motor [Electron. resource], URL: <https://en.engineering-solutions.ru/motorcontrol/brushdcmotok> (Date of appeal 10.09.2021).
4. **Permanent** Magnet DC Motors [Electron. resource], URL: [https://90130\\_GR-Katalog\\_korrigiert.pdf](https://90130_GR-Katalog_korrigiert.pdf) (Date of appeal 10.09.2021).
5. **Ovchinnikov I.E., Lebedev N.I.** *Beskontaktnye dvigateli postoyannogo toka* (Contactless DC Motors). L.: Nauka, 1979, 270 p.
6. **Osin I.L., Yufarov F.M.** *Elektricheskie mashiny avtomaticheskikh ustroystv* (Electric Machines of Automatic Devices). M.: Izd-vo MEI, 2003, 424 p.
7. **Gridin V.M.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2021, No. 1, pp. 55–60.
8. **GOST 16264.0-2018.** *Mashiny elektricheskie maloy moshchnosti. Dvigateli. Obshchie tekhnicheskie usloviya* (Low-Power Electric Machines. Engines. General technical conditions). M.: Standartinform, 2019, 26 p.
9. **GOST 16264.4-2018.** *Dvigateli postoyannogo toka beskontaktnye. Obshchie tekhnicheskie usloviya* (DC Motors are Contactless. General Technical Conditions). M.: Standartinform, 2019.

[10.09.2021]