

Бесконтактные двигатели постоянного тока с трехсекционной обмоткой и двумя индукторами

ГРИДИН В.М.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Рассмотрены два бесконтактных двигателя постоянного тока с трехсекционной якорной обмоткой и двумя цилиндрическими индукторами-магнитами. У одного из двигателей якорная обмотка обычная, барабанная, а значения чисел радиальных полюсов двух индукторов отличаются в три раза. У другого двигателя якорная обмотка – тороидальная, а значения чисел радиальных полюсов двух индукторов отличаются в два раза. Дано выражение распределения результирующей для якорной обмотки магнитной индукции по окружности воздушного зазора. Определены оптимальные соотношения между параметрами двух индукторов. Получены выражения для отношений электромагнитных моментов рассмотренных двигателей и известного бесконтактного двигателя постоянного тока с обычной трехсекционной якорной обмоткой и составным индуктором из внутренней магнитомягкой втулки и наружных полюсов – магнитов. Сравнимые машины имеют равное число силовых транзисторов и одинаковые габариты электромеханической части, а якорные обмотки потребляют от источника питания одинаковую мощность. Установлено, что электромагнитный момент у рассмотренного двигателя с обычной якорной обмоткой примерно в 1,37 раз больше, чем у известного двигателя с трехсекционной якорной обмоткой, а у рассмотренного двигателя с тороидальной обмоткой его значение меньше примерно в 1,1 раз, т.е. незначительно. Однако у двигателя с тороидальной якорной обмоткой и тремя силовыми транзисторами пульсация электромагнитного момента равна примерно 3%, а у известного двигателя с тремя и шестью силовыми транзисторами ее значения составляют примерно 8 и 4,5%. Рассмотренные двигатели с более простыми цилиндрическими индукторами могут конкурировать с известными бесконтактными двигателями постоянного тока.

К л ю ч е в ы е с л о в а: бесконтактные двигатели постоянного тока, сравнение, обычная и тороидальная обмотки, два цилиндрических индуктора с различным значением числа полюсов, удельный момент

Бесконтактные двигатели постоянного тока (БДПТ) по сравнению с обычными двигателями постоянного тока обладают похожими характеристиками, но не имеют скользящих контактов и поэтому работают более надежно. Это особенно важно при вибрациях, ускорениях, после ударов, при работе в вакууме и т.п. Основными характеристиками БДПТ являются удельный момент (отношение значения момента к объему электромеханической части двигателя) и его пульсация. Возможно меньшая пульсация момента особенно важна для низкоскоростных (моментных) БДПТ, а возможно большее значение удельного момента – для всех таких двигателей.

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. Индуктор выполняют в виде магнита-звездочки или

составным из внутреннего магнитомягкого основания и наружных полюсов-магнитов [1–5]. У моментного известного БДПТ с составным индуктором, шестью и тремя силовыми транзисторами пульсация электромагнитного момента составляет соответственно примерно 4,5 и 8%.

В статье рассматриваются два альтернативных БДПТ, каждый из которых содержит трехсекционную ЯО, обычную или тороидальную, и два цилиндрических индуктора-магнита с различным значением чисел полюсов. Они проще и дешевле составного индуктора. Секции ЯО коммутируются шестью или тремя силовыми транзисторами. Эти двигатели сравниваются с известными БДПТ, содержащими обычную, барабанную трехсекционную ЯО, составной индуктор и такое же, что и рассматриваемые, число силовых транзисторов.

При вращении вала двигателя шесть или три транзистора по сигналам датчика положения ротора через каждые 60 или 120° поочередно подключа-

ют секции ЯО к источнику питания и отключают их от источника. К источнику питания всегда подключена одна секция ЯО или две секции этой обмотки, соединенные последовательно.

Рассмотрим БДПТ с обычной ЯО. На рис. 1 показано продольное и поперечное сечения электро-механической части такого БДПТ.

Якорь состоит из магнитопровода и ЯО. Дополнительный индуктор по сравнению с основным имеет утроенное число радиальных полюсов. ЯО – диаметрально сосредоточенная. Здесь основной индуктор – двухполюсный, а дополнительный индуктор – шестиполюсный. На рис. 1,б как бы удалена часть основного индуктора до линии вырыва б, что позволяет увидеть часть дополнительного индуктора, расположенного за основным.

На рис. 2 показано распределение по окружности воздушного зазора магнитной индукции: от воздействия каждого и обоих индукторов. Координата окружности зазора представлена углом α .

Для индукторов в виде цилиндрических постоянных магнитов с радиальными полюсами распределение магнитной индукции по окружности воздушного зазора близко к синусоидальному:

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

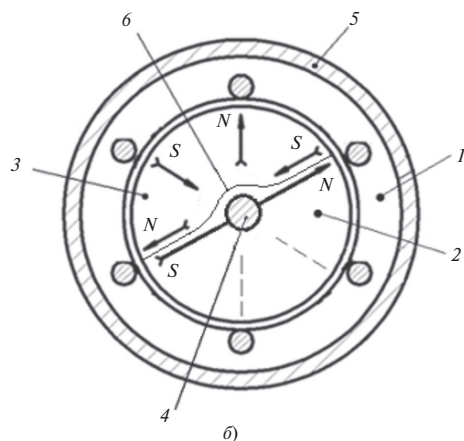
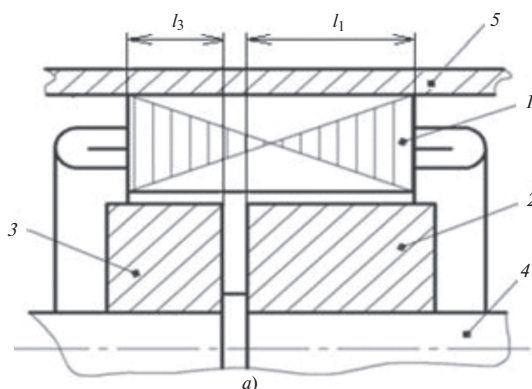


Рис. 1. Продольное (а) и поперечное (б) сечения электро-механической части БДПТ с обычной ЯО: 1 – якорь; 2 – основной индуктор; 3 – дополнительный индуктор; 4 – вал; 5 – корпус; б – линия вырыва

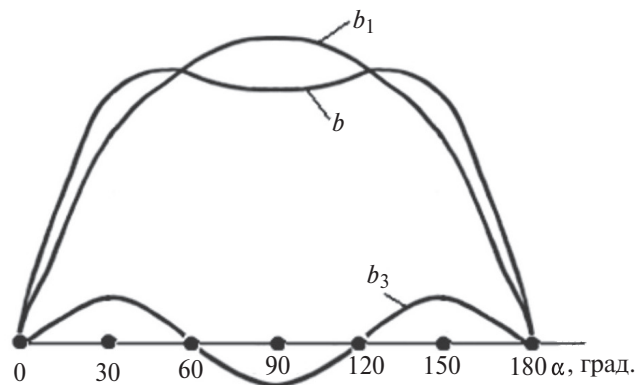


Рис. 2. Распределение по окружности воздушного зазора магнитной индукции: b_1 – от воздействия основного индуктора; b_3 – от воздействия дополнительного индуктора; b – от воздействия обоих индукторов

Так как якорь расположен напротив обоих индукторов, то, используя принцип суперпозиции, выразим распределение результирующей для ЯО магнитной индукции b в виде:

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

где \bar{b} – относительное значение результирующей магнитной индукции; l_1 и l_3 – значения активной длины индукторов 2 и 3 на рис. 1,а:

$$\bar{b} = \sin \alpha + K \sin 3\alpha; \quad K = B_{m3} l_3 / (B_{m1} l_1).$$

Оптимальное значение коэффициента K определим из условия:

$$\bar{b}(30^\circ) = \bar{b}(90^\circ) = \bar{b}(150^\circ),$$

при котором распределение результирующей для ЯО магнитной индукции b от воздействия двух индукторов наиболее близко к желаемому трапециевидальному (рис. 2), а пульсация магнитной индукции минимальна. Получим значение $K=0,25$ и выражение

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

Значение коэффициента K можно задать передвижением по валу дополнительного индуктора (рис. 1,а):

$$\bar{b}(30^\circ) = \bar{b}(90^\circ) = \bar{b}(150^\circ) = 0,75;$$

$$\bar{b}(60^\circ) = \bar{b}(120^\circ) = 0,866.$$

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

$$\bar{b}_{\text{ср}} = \frac{3}{2\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} \bar{b} d\alpha = 0,83.$$

Электромагнитный момент (далее просто момент) пропорционален произведению тока в сек-

циях ЯО и суммы магнитных индукций в местах расположения секций, подключенных к источнику питания и обтекаемых неизменным током. Относительное значение момента \bar{m} (отношение к максимальному значению) равно сумме относительных значений магнитной индукции \bar{b} в местах расположения секций, подключенных к источнику питания [5]. Согласно [5] и выражению для \bar{b} минимальное \bar{m}_{\min} и максимальное \bar{m}_{\max} значения относительных моментов БДПТ с шестью транзисторами равны:

$$\bar{m}_{\min} = \bar{b}(30^\circ) + \bar{b}(90^\circ) = 1,5;$$

$$\bar{m}_{\max} = 2\bar{b}(60^\circ) = 1,732.$$

Определим пульсацию момента:

$$\mu = \frac{\bar{m}_{\max} - \bar{m}_{\min}}{\bar{m}_{\max} + \bar{m}_{\min}} 100\%,$$

получим $\mu = 7,18\%$.

Далее рассмотрим БДПТ с тороидальной ЯО. На рис. 3 показаны продольное и поперечное сечения электрохимической части БДПТ.

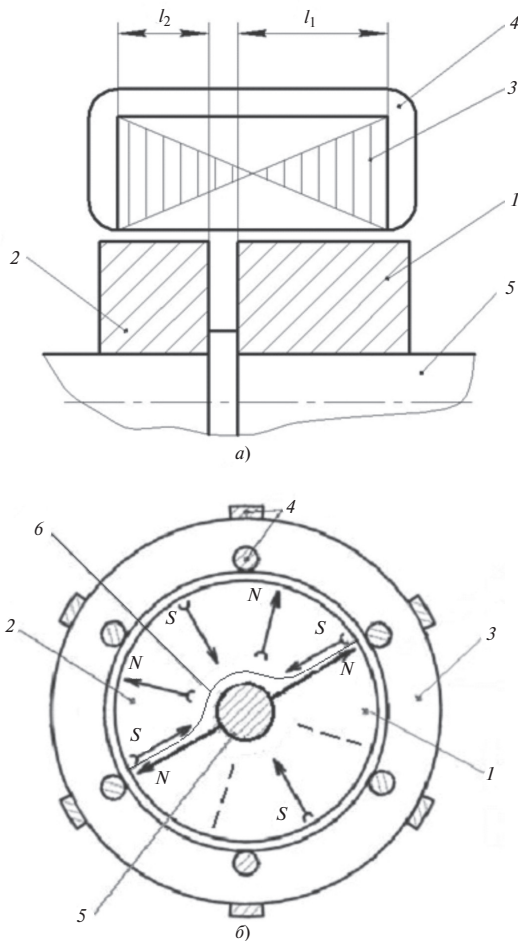


Рис. 3. Продольное (а) и поперечное (б) сечения электрохимической части БДПТ с тороидальной ЯО: 1 – основной индуктор; 2 – дополнительный индуктор; 3 – якорь; 4 – катушка обмотки; 5 – вал; 6 – линия вырыва

Якорь состоит из магнитопровода и ЯО, дополнительный индуктор по сравнению с основным имеет удвоенное число радиальных полюсов [6]. Якорная обмотка выполнена в виде катушек, намотанных вокруг магнитопровода якоря. Основной индуктор – четырёхполюсный, а дополнительный – восьмиполюсный. На рис. 3,б как бы удалена часть основного индуктора до линии вырыва б, что позволяет увидеть часть дополнительного индуктора, расположенного за основным.

На рис. 4 показано распределение по окружности воздушного зазора магнитной индукции от воздействия каждого и обоих индукторов. Координата окружности зазора представлена углом α .

Для индукций b_1 и b_2 можно записать приближенные выражения:

$$b_1 = B_{m1} \sin \alpha; \quad b_2 = B_{m2} \cos 2\alpha,$$

а для результирующей индукции:

$$b = \frac{l_1 b_1 + l_2 b_2}{l_1 + l_2} = \frac{l_1}{l_1 + l_2} \bar{b} B_{m1},$$

где

$\bar{b} = \sin \alpha + K \cos 2\alpha$; $K = B_{m2} l_2 / (B_{m1} l_1)$; l_1 и l_2 – значения активной длины индукторов 1 и 2 (рис. 3,а).

Оптимальное значение коэффициента K определим из условия (см. выше):

$$\bar{b}(30^\circ) = \bar{b}(90^\circ) = \bar{b}(150^\circ),$$

получим значение $K = 1/3$ и выражение

$$\bar{b} = \sin \alpha + 1/3 \cos 2\alpha.$$

Значение коэффициента K можно задать передвижением по валу дополнительного индуктора (рис. 3,а).

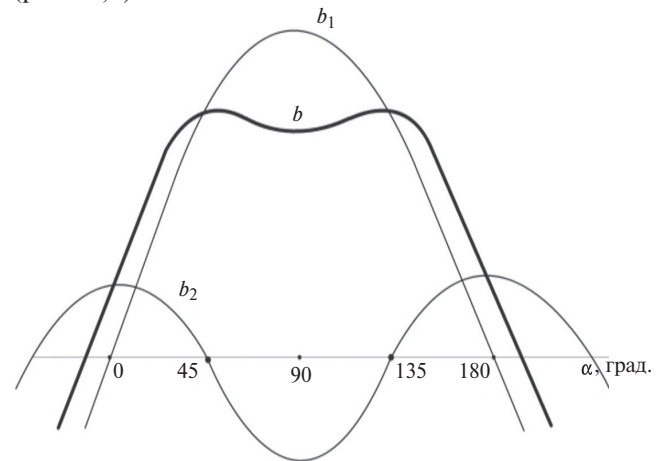


Рис. 4. Распределение по окружности воздушного зазора магнитной индукции: b_1 – от воздействия основного индуктора; b_2 – от воздействия дополнительного индуктора; b – от воздействия обоих индукторов

Минимум относительного значения индукции на интервале $\alpha = 30^\circ \div 150^\circ$:

$$\bar{b}_{\min} = \bar{b}(30^\circ) = \bar{b}(90^\circ) = \bar{b}(150^\circ) = 0,667,$$

а значение определим, решив уравнение

$$\frac{d\bar{b}}{d\alpha} = \cos\alpha - \frac{2}{3}\sin 2\alpha = \cos\alpha \left(1 - \frac{4}{3}\sin\alpha\right) = 0,$$

получим $\alpha = 90^\circ$ и $\alpha_m = \arcsin 0,75 = 48,6^\circ$,

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

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

$$\bar{b}_{\text{ср}} = \frac{3}{2\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} \bar{b} d\alpha = 0,69 \approx \frac{\bar{b}_{\min} + \bar{b}_{\max}}{2} = 0,687.$$

Пульсация магнитной индукции составляет 0,029, т.е. незначительна.

У моментного БДПТ с тороидальной ЯО и тремя транзисторами пульсация электромагнитного момента μ равна пульсации магнитной индукции, т.е. 0,029 или примерно 3%. Двигатель с тороидальной ЯО и шестью транзисторами не имеет преимуществ перед известным БДПТ из-за значительно худшего распределения магнитной индукции по окружности воздушного зазора на интервале $\alpha = 180^\circ \div 360^\circ$ и поэтому не рассматривается.

Определим и оценим приближённо отношения электромагнитных моментов рассматриваемых БДПТ и известного БДПТ с обычной трехсекционной ЯО и составным индуктором при следующих условиях: сравниваемые БДПТ содержат одинаковое число силовых транзисторов и выполнены с одинаковыми габаритами электромеханической части и с одинаковым числом полюсов; по секциям, подключенным к источнику питания, протекает одинаковый потребляемый ток, а ЯО получают от источника питания одинаковую мощность; валы двигателей вращаются с одинаковой частотой.

Будем обозначать параметры и характеристики рассматриваемых БДПТ с индексом «р», а известного БДПТ – с индексом «и».

Определим отношение моментов БДПТ с обычными ЯО, тремя или шестью силовыми транзисторами. В этом случае можно записать выражение:

$$\frac{M_p}{M_i} = \frac{I_{w_p} B_p}{I_{w_i} B_i} = \frac{B_p}{B_i},$$

где I – потребляемый ток; w_p и w_i – число витков в одной секции ЯО, у сравниваемых БДПТ они одинаковы; B_p и B_i – средние значения магнитной индукции.

Найдем примерное значение отношения B_p/B_i . В соответствии с выражением для результирующей индукции b (см. выше) справедливо $B_p = \frac{l_1}{l_1 + l_3} \bar{b}_{\text{ср}} B_{m1}$.

Из выражения для коэффициента K (равного 0,25) при $B_{m3}/B_{m1} = 0,75$ получим $l_3 = l_1/3 = (l_1 + l_3)/4$, $l_1 = 3(l_1 + l_3)/4$.

Отсюда с учетом значения $\bar{b}_{\text{ср}} = 0,83$ получим $B_p = 0,623 B_{m1}$.

Магнитная индукция между полюсами индуктора и магнитопроводом якоря известного БДПТ обозначена B_i . Согласно [1] ее нужно определять с помощью рабочей диаграммы постоянного магнита после предварительных расчётов напряжённости магнитного поля H_{ad} , создаваемой продольной реакцией якоря, удельных проводимостей g и g_s для полезного потока, потока рассеяния магнита и других характеристик магнитной цепи [1]. Проводимости g и g_s прямо пропорциональны, а напряженность H_{ad} обратно пропорциональна длине $l_{\text{мл}}$ магнитной линии на пару полюсов – магнитов индуктора. Чем меньше длина $l_{\text{мл}}$, тем больше напряженность H_{ad} и, следовательно, меньше магнитная индукция B_i [1]. Ее значение сильно зависит от длины $l_{\text{мл}}$. Поскольку длина $l_{\text{мл}}$ в известном БДПТ с составным индуктором примерно в 2–2,5 раза меньше, чем в основном цилиндрическом индукторе рассматриваемого БДПТ, то приближенно считаем $B_i = B_{m1}/2,2$, тогда

$$\frac{B_p}{B_i} = \frac{M_p}{M_i} = 1,37,$$

т.е. электромагнитный момент у рассмотренного БДПТ примерно в 1,37 раз больше, чем у известного БДПТ.

Определим отношение моментов БДПТ с тороидальной ЯО и двумя индукторами и известного БДПТ. Сравнимые двигатели содержат по три силовых транзистора. У первого БДПТ число пазов на равно трем, а средняя длина витков катушек ЯО меньше, чем у известного БДПТ. У последнего число пазов на пару полюсов равно шести. Можно записать:

$$\frac{M_p}{M_i} = \frac{I_{w_p} B_p}{2 I_{w_i} B_i} = 0,5 \frac{w_p B_p}{w_i B_i}.$$

Найдем выражение для отношения w_p/w_i . Так как значения чисел пазов якоря на пару полюсов индуктора отличаются в два раза, то справедливо записать:

$$w_p g_p = 2 w_i g_i, \quad \frac{g_i}{g_p} = \frac{1}{2} \frac{w_p}{w_i},$$

где g_p и g_i – площади поперечного сечения проводников обмоток.

Для отношения сопротивлений секций ЯО справедливы выражения:

$$\frac{R_p}{R_i} = K_B \frac{w_p g_i}{g_p w_i} = \frac{1}{2} K_B \left(\frac{w_p}{w_i} \right)^2,$$

где K_B – отношение средней длины витков рассматриваемого двигателя к средней длине витков известного БДПТ. Оно тем меньше, чем меньше отношение длины магнитопровода якоря к его диаметру и меньше число полюсов индуктора.

При равенстве мощностей, потребляемых ЯО, справедливо:

$$I^2 R_p = I^2 R_i; \quad R_p / R_i = 1.$$

Из двух выражений для отношения R_p / R_i получим:

$$\frac{w_p}{w_i} = \sqrt{2 / K_B}, \quad \text{при } K_B = 2/3 \quad \frac{w_p}{w_i} = \sqrt{3};$$

$$\frac{M_p}{M_i} = 0,866 \frac{B_p}{B_i}.$$

Найдем примерное значение отношения B_p / B_i . В соответствии с выражением для результирующей индукции b (см. выше) справедлива формула $B_p = \frac{l_1}{l_1 + l_2} \bar{b}_{cp} B_{m1}$. Из выражения для коэффициента K (равного 1/3) при $B_{m2} / B_{m1} = 0,75$ получим $l_2 4l_1 / 9 = 4(l_1 + l_2) / 13$; $l_1 = 9(l_1 + l_2) / 13$. Отсюда с учетом значения $\bar{b}_{cp} = 0,69$ получим $B_p = 0,478 B_{m1}$.

В рассматриваемом БДПТ продольная реакция якоря и напряженность H_{ad} магнитного поля отсутствуют, так как обмотка – тороидальная и все ее проводники с током всегда располагаются напротив только одноименных полюсов индуктора. А в

известном БДПТ напряженность H_{ad} и, следовательно, индукция B_i сильно зависят от длины $l_{мл}$ средней магнитной линии на пару полюсов – магнитов индуктора. Поскольку длина $l_{мл}$ в известном БДПТ с составным индуктором примерно в 2–2,5 раза меньше, чем в основном цилиндрическом индукторе рассматриваемого БДПТ, то приближенно считаем, что $B_i = B_{m1} / 2,2$, тогда $B_p / B_i = 1,06$; $M_p / M_i = 0,91$.

Видим, что у рассмотренного БДПТ электромагнитный момент примерно в 1,1 раз, т.е. незначительно, меньше, чем у известного БДПТ, но зато и пульсация электромагнитного момента меньше, чем у известного БДПТ.

В заключение следует сделать вывод о том, что рассмотренные в статье БДПТ с более простыми цилиндрическими индукторами вполне могут конкурировать с известным БДПТ.

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. Овчинников И.Е., Лебедев Н.И. Бесконтактные двигатели постоянного тока. Л.: Наука, 1979, 270 с.
3. Осин И.Л., Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств: Учебное пос. для вузов. М.: Изд-во МЭИ, 2003, 424 с.
4. Гридин В.М. Бесконтактный моментный двигатель постоянного тока с двухсекционной обмоткой. – Электро, 2016, № 3, с. 39–42.
5. Гридин В.М. Характеристики моментных бесконтактных двигателей постоянного тока с симметричной и несимметричной обмотками. – Электроника и электрооборудование транспорта, 2017, № 2, с. 28–31.
6. Гридин В.М. Бесконтактный двигатель постоянного тока с коммутацией обмотки двумя транзисторами. – Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение, 2017, № 2, с. 54–63.

[09.07.2020]

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



Brushless DC Motors with a Three-Section Winding and Two Inductors

GRIDIN Vladimir M. (Moscow State Technical University named N.E Bauman, Moscow, Russia) – Associate Professor of Electrical and Electronics Industry Dept., Cand. Sci. (Eng.)

Two brushless DC motors (BLDC) with a three-section armature winding and two cylindrical inductors-magnets are considered. One motor has an ordinary drum-type armature winding, and numbers of radial poles in its two inductors differ from each other by a factor of three. The other motor has a

toroidal armature winding, and the numbers of radial poles in its two inductors differ from each other by a factor of two. An expression for the distribution of the resulting armature winding magnetic induction over the air gap circumference is given. The optimal relationships between the parameters of two inductors are determined. Expressions are obtained for the ratios of the electromagnetic torques of the considered motors and for the known BLDC motor with a conventional three-section armature winding and a composite inductor consisting of an inner magnetically soft bushing and external poles formed by magnets. The compared machines have the same number of power transistors and are made with the same dimensions of their electromechanical parts, and their armature windings consume the same power from the power source. It has been found that the electromagnetic torque in the considered motor with the ordinary armature winding is approximately a factor of 1.37 greater than in the known motor with a three-section armature winding, whereas in the motor with a toroidal armature winding it is smaller by about a factor of 1.1, i.e., insignificantly. However, the electromagnetic torque pulsation in the motor with a toroidal winding and three power transistors is approximately 3%, whereas in the known motor with three and six power transistors its values are approximately equal to 8 and 4.5%, respectively. The considered motors with simpler cylindrical inductors can compete with the known BLDC motors.

Key words: brushless DC motors, comparison, ordinary and toroidal windings, two cylindrical inductors with different number of poles, specific torque

REFERENCES

1. Balagurov V.A., Gridin V.M., Lozenko V.K. *Beskontaktnyye dvigateli postoyannogo toka s postoyannymi magnitami* (Permanent magnet direct current contactless motors). M.: Energiya, 1975, 128 p.
2. Ovchinnikov I.Ye., Lebedev N.I. *Beskontaktnyye dvigateli postoyannogo toka* (Beskontaktnyye dvigateli postoyannogo toka). L.: Nauka, 1979, 270 p.
3. Osin I.L., Yuferov F.M. *Elektricheskiye mashiny avtomaticheskikh ustroystv: Uchebnoye pos. dlya vuzov* (Electrical machines of automatic devices: a textbook for universities). M.: Izd-vo MEI, 2003, 424 p.
4. Gridin V.M. *Elektro – in Russ. (Electro)*, 2016, No. 3, pp. 39–42.
5. Gridin V.M. *Elektronika i elektrooborudovaniye transporta – in Russ. (Electronics and Electrical Equipment of Transport)*, 2017, No. 2, pp. 28 – 31.
6. Gridin V.M. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana – in Russ. (Bulletin of Moscow State Technical University named N.E. Bauman)*, 2017, No. 2, pp. 54–63.

[09.07.2020]