

## БЕСКОНТАКТНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА С КОММУТАЦИЕЙ ОБМОТКИ ДВУМЯ ТРАНЗИСТОРАМИ

В.М. Гридин

gridin1940@mail.ru

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

---

### Аннотация

Рассмотрен бесконтактный двигатель постоянного тока. Найдено распределение результирующей магнитной индукции по окружности воздушного зазора. Определены оптимальные отношения между параметрами индукторов. Установлено, что у рассматриваемого моментного бесконтактного двигателя постоянного тока с двумя индукторами удельный момент примерно в 1,2 раза меньше, чем у двигателя с неравномерно установленными полюсами индуктора, а пульсация электромагнитного момента для любых скоростей вращения вала двигателя значительно меньше. Рассмотрены особенности электромагнитных процессов в маломощном бесконтактном двигателе постоянного тока, получено выражение для электромагнитного момента

### Ключевые слова

*Двухсекционная тороидальная обмотка, индуктор, число полюсов, удельный момент, пульсация момента*

Поступила в редакцию 24.05.2016  
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

---

**Введение.** Бесконтактные двигатели постоянного тока (БДПТ) по сравнению с обычными двигателями работают более надежно, особенно при вибрациях, ускорениях, после ударов, в вакууме и т. п. Общие вопросы по устройству и работе БДПТ изложены в [1, 2]. Электромагнитные процессы в обычных, т. е. скоростных БДПТ, исследованы в [1–5], низкоскоростные (моментные) БДПТ рассмотрены в [6–12].

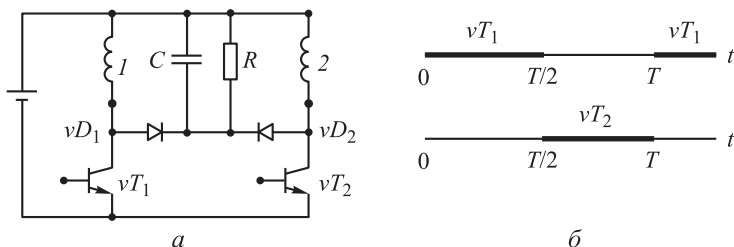
Основными характеристиками БДПТ являются удельный момент (отношение момента к объему электромеханической части двигателя) и пульсация момента. Характеристики тем лучше, чем меньше межкоммутационный угловой интервал  $q$ , т. е. чем больше число  $S$  секций якорной обмотки (ЯО) и число  $T$  транзисторов коммутатора:  $T = S$  или  $2S$ , соответственно  $q = 360^\circ/S$  или  $180^\circ/S$ . Но чем больше число транзисторов, тем сложнее и дороже датчик положения ротора (ДПР) и коммутатор. Поэтому числа  $S$  и  $T$  выбирают с учетом требований к характеристикам, сложности и стоимости БДПТ. Чаще всего выполняют БДПТ с  $S = 3$ ,  $T = 6$ ,  $q = 60^\circ$  и  $S = T = 3$ ,  $q = 120^\circ$ .

Бесконтактный двигатель постоянного тока с двумя секциями ЯО и двумя транзисторами коммутатора ( $S = T = 2$ ,  $q = 180^\circ$ ) имеет простейшие ДПР и коммутатор. Его целесообразно применять при невысоких требованиях к характеристикам двигателя, при малых мощности и стоимости системы двигатель–исполнительный механизм.

Возможные конструкции БДПТ с двухсекционной ЯО и двумя транзисторами приведены в [13, 14]. Наибольший практический интерес представляет конструкция индуктора, приведенная в [14]: он состоит из внутреннего магнито-мягкого основания и наружных полюсов — магнитов. Полюсы установлены на гранях основания неравномерно: электрический угол между одними полюсами меньше  $180^\circ$ , а между другими полюсами больше. Неравномерность установки полюсов обуславливает большие значения пульсации электромагнитного и вращающего моментов, а следовательно, и скорости вращения вала двигателя. У такого моментного БДПТ значение пульсации электромагнитного момента согласно [14] равно 33,3 % и обычно является неприемлемым.

**Постановка задачи.** Целью настоящей работы является уменьшение пульсаций момента и скорости вращения вала БДПТ с двухсекционной ЯО и двумя транзисторами коммутатора.

На рис. 1 изображены схема силовой части такого БДПТ и диаграмма состояния силовых транзисторов коммутатора.



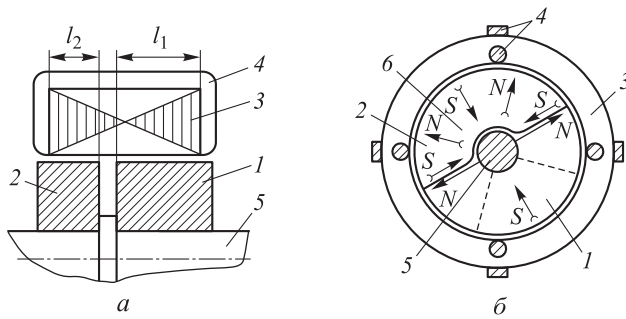
**Рис. 1.** Схема силовой части БДПТ (а) и диаграмма состояния транзисторов (б):  $T$  — период коммутации; — — транзистор открыт (проводит ток)

Электрический угол между секциями 1 и 2 ЯО составляет  $180^\circ$ . Транзисторы подключают секции ЯО к источнику питания поочередно встречно через полупериод коммутации  $T/2$  по сигналам ДПР. Для исключения прерывания тока в секциях ЯО после их отключения от источника питания и соответственно — перенапряжения на транзисторах, применены два диода, конденсатор и резистор [14]. Вместо конденсатора и резистора может быть применен стабилитрон [1, 2].

**Решение поставленной задачи.** Рассмотрим альтернативный БДПТ с тороидальной ЯО и двумя цилиндрическими индукторами, числа полюсов которых отличаются в 2 раза.

На рис. 2 изображены продольное и поперечное сечения активной, т. е. электромеханической части БДПТ.

Электромеханическая часть БДПТ состоит из основного цилиндрического индуктора 1, дополнительного цилиндрического индуктора 2 с удвоенным числом полюсов, якоря 3, содержащего магнитопровод и тороидальную ЯО из катушек 4, и вала 5. Здесь каждая секция ЯО состоит из двух диаметрально противоположных тороидальных катушек 4, уложенных вокруг магнитопровода якоря, основной индуктор — четырехполюсный, а дополнительный индуктор —



**Рис. 2.** Продольное сечение (а) и поперечное сечение (б) электромеханической части БДПТ

восьмиполюсный. На рис. 2, б как бы удалена часть основного индуктора до линии вырыва б, что позволяет увидеть часть дополнительного индуктора, расположенного за основным.

На рис. 3, а показано распределение по окружности воздушного зазора магнитной индукции от воздействия каждого и обоих индукторов. На рис. 3, б, в показаны осциллограммы токов  $i_1$  и  $i_2$  в секциях ЯО при учете и не учете индуктивности секций, наблюдаемые при компьютерном моделировании. Здесь  $\alpha$  — угловая координата зазора,  $\theta$  — угол опережения коммутации, обеспечивающий форсированное нарастание тока в секциях в целях увеличения мощности и КПД БДПТ [1].

Из рис. 3, а видно, что магнитная индукция  $b$  положительна на угловом интервале более  $180^\circ$  и отрицательна на угловом интервале менее  $180^\circ$ , а зависимость  $b(\alpha)$  на первом интервале значительно лучше (т. е. ближе к желаемой трапецеидальной), чем на втором интервале. Поэтому ЯО должна быть тороидальной (см. рис. 2).

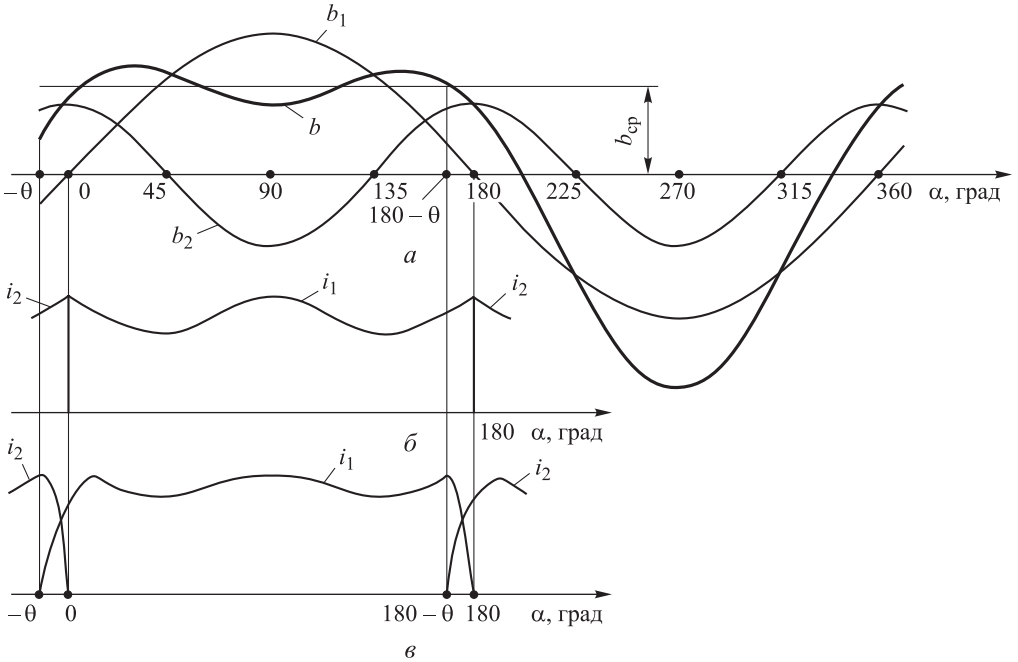
На рис. 4 показаны положения основного индуктора и секций тороидальной ЯО с протекающим по ним током на первом и втором полупериодах коммутации.

Направление тока в катушках секций показано в виде знаков + и •. Здесь числа полюсов основного индуктора  $2p$ , пазов якоря  $z$  и катушек ЯО  $S$  равны шести:  $z = S = 2p = 6$  ( $z = S = 2p = 4$ , см. рис. 2, б). При анализе рис. 4 с учетом рис. 3, а можно установить, что БДПТ создает пусковой момент при всех положениях индуктора благодаря применению тороидальной ЯО и двух индукторов с различными числами полюсов.

Найдем оптимальные отношения между параметрами двух индукторов. Для индукторов в виде цилиндрических постоянных магнитов с радиальными полюсами распределение магнитной индукции по окружности воздушного зазора близко к синусоидальному. Поскольку якорь расположен напротив обоих индукторов, то можно рассматривать распределение результирующей для ЯО магнитной индукции  $b$  в воздушном зазоре и, используя принцип суперпозиции, описывать его следующим выражением:

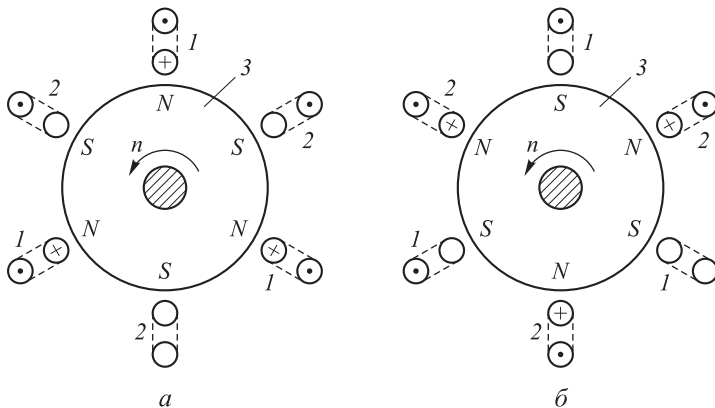
$$b = \frac{l_1 b_1 + l_2 b_2}{l_1 + l_2} = \frac{l_1 B_{m1} \sin \alpha + l_2 B_{m2} \cos 2\alpha}{l_1 + l_2},$$

где  $l_1$  и  $l_2$  — длины индукторов 1 и 2 (см. рис. 2, а);  $B_{m1}$  и  $B_{m2}$  — амплитуды магнитных индукций в воздушном зазоре  $b_1$  и  $b_2$ .



**Рис. 3.** Распределение магнитной индукции по окружности воздушного зазора (а) и осциллограммы токов в секциях ЯО при пренебрежении их индуктивностью (б) и при учете индуктивности (в):

$b_1$ ,  $b_2$  и  $b$  — магнитная индукция от воздействия основного индуктора, дополнительного индуктора и от воздействия двух индукторов;  $i_1$  и  $i_2$  — токи в первой и второй секциях ЯО



**Рис. 4.** Положения основного индуктора 3 и секций 1, 2 торoidalной обмотки с протекающим по ним током на первом (а) и втором (б) полупериоде коммутации

Относительная результирующая магнитная индукция  $\bar{b}$ :

$$\bar{b} = \frac{b(l_1 + l_2)}{B_{m1}l_1} = \sin \alpha + K \cos 2\alpha, \quad (1)$$

где

$$K = \frac{l_2 B_{m2}}{l_1 B_{m1}}. \quad (2)$$

Введем понятие пульсации результирующих индукций  $b$  и  $\bar{b}$ :

$$\xi = \frac{(b_{\max} - b_{\min})}{(b_{\max} + b_{\min})} \cdot 100 = \frac{(\bar{b}_{\max} - \bar{b}_{\min})}{(\bar{b}_{\max} + \bar{b}_{\min})} \cdot 100 \%,$$

где  $b_{\max}$  и  $b_{\min}$ ,  $\bar{b}_{\max}$  и  $\bar{b}_{\min}$  — максимальное и минимальное значения индукции  $b$  и относительной индукции  $\bar{b}$  на угловом интервале  $\alpha = 0^\circ \dots 180^\circ$ .

Для моментных, т. е. низкоскоростных БДПТ, пульсация электромагнитного момента (далее — момента) равна пульсации  $\xi$  индукций  $b$  и  $\bar{b}$ , поскольку момент пропорционален произведению магнитной индукции и якорного тока, который можно считать постоянным.

Оптимальное значение коэффициента  $K$  в формуле (1) определим из условия:

$$\bar{b}(0) = \bar{b}(90^\circ) = \bar{b}(180^\circ) = \bar{b}_{\min}.$$

С учетом формулы (1) получим

$$K = 1 - K; \quad K = 0,5; \quad \bar{b}_{\min} = 0,5; \\ \bar{b} = \sin \alpha + 0,5 \cos 2\alpha = \sin \alpha - \sin^2 \alpha + 0,5. \quad (3)$$

Оптимальное значение коэффициента  $K$  можно обеспечить передвижением по валу дополнительного индуктора (см. рис. 2, а).

Для определения максимальной относительной индукции  $\bar{b}_{\max}$  решим уравнение, составленное с учетом формулы (3),

$$\frac{d\bar{b}}{d\alpha} = \cos \alpha - \sin 2\alpha = \cos \alpha (1 - 2 \sin \alpha) = 0.$$

Отсюда  $\alpha = 90^\circ$  и  $\alpha = \alpha_m = \arcsin 0,5 = 30^\circ$ ,  $\bar{b}_{\max} = \bar{b}(\alpha_m) = 0,75$ ,  $\xi = 20 \%$ .

Среднее значение относительной результирующей магнитной индукции

$$\bar{b}_{\text{cp}} \approx (\bar{b}_{\min} + \bar{b}_{\max}) / 2 = 0,625 \approx \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \bar{b} d\alpha = 0,637.$$

Оценим отношение  $\mu$  моментов рассматриваемого моментного БДПТ с двумя цилиндрическими индукторами и известного БДПТ, у которого полюсы ин-

дуктора установлены неравномерно. Оба БДПТ выполнены с одними и теми же числами полюсов, габаритными размерами электромеханической части и числами витков ЯО из одного и того же обмоточного провода. По ЯО протекает один и тот же якорный ток. Отношение  $\mu$  можно выразить следующим образом:

$$\mu \approx 0,5B_{cp} / (0,7B_{cp.и}).$$

Здесь коэффициент 0,5 учитывает худшее использование тороидальной ЯО по сравнению с барабанной ЯО, коэффициент 0,7 учитывает худшее использование магнитного потока при неравномерной установке полюсов индуктора,  $B_{cp}$  и  $B_{cp.и}$  — средние значения магнитной индукции на полюсном делении у рассматриваемого и известного БДПТ.

Согласно (1) и (2), запишем

$$\frac{B_{cp}}{B_{m1}} = \frac{l_1}{l_1 + l_2} \bar{b}_{cp} = \frac{\bar{b}_{cp}}{1 + \frac{K}{B_{m2} / B_{m1}}}$$

при  $K = 0,5$ ,  $\bar{b}_{cp} = 0,625$ ,  $B_{m2} / B_{m1} = 0,75$  имеем  $B_{cp} / B_{m1} = 0,375$ ;  $B_{cp.и} = k_{п}B_{и}$ , где  $B_{и}$  — магнитная индукция в воздушном зазоре известного БДПТ,  $k_{п} \approx 0,65$  — средний коэффициент полюсного перекрытия индуктора. Магнитную индукцию  $B_{и}$  необходимо определять с помощью рабочей диаграммы постоянного магнита после предварительных расчетов напряженности магнитного поля  $H_{ад}$ , создаваемой продольной реакцией якоря, удельных проводимостей  $g$ ,  $g_s$  для полезного потока, потока рассеяния магнита и других характеристик магнитной цепи [1]. Напряженность  $H_{ад}$  обратно пропорциональна, а проводимости  $g$  и  $g_s$  прямо пропорциональны длине средней магнитной линии на пару полюсов индуктора  $l_{мл}$ . Поэтому индукция  $B_{и}$  сильно зависит от длины  $l_{мл}$ . Поскольку длина  $l_{мл}$  в известном БДПТ примерно в 2–2,5 раза меньше, чем в основном индукторе рассмотренного БДПТ, то приближенно считаем, что  $B_{и} / B_{m1} \approx 0,5$ . Тогда  $B_{cp} / B_{cp.и} = 1,154$ ,  $\mu \approx (0,5 \cdot 1,154) / 0,7 = 0,825 \approx 1/1,2$ , т. е. у рассматриваемого БДПТ удельный момент примерно в 1,2 раза меньше, чем у известного. Зато пульсация момента для любых скоростей вращения вала двигателя значительно меньше (показано далее).

Рассмотрим особенности электромагнитных процессов в обычном скоростном БДПТ. Упрощенно, но в соответствии с рис. 3, а, представим относительную индукцию  $\bar{b}$  как сумму постоянной и переменной составляющих:

$$\bar{b} \approx \bar{b}_{cp} + 0,2\bar{b}_{cp} \sin \beta; \tag{4}$$

здесь  $0,2\bar{b}_{cp} = (\bar{b}_{max} - \bar{b}_{min}) / 2$ ;  $\beta = 3,31(\alpha - 8,4^\circ)$ ;  $3,31 = 180^\circ : [(171,6^\circ - 8,4^\circ) / 3]$ ;  $8,4^\circ$  и  $171,6^\circ$  — значения угла  $\alpha$ , для которых  $\bar{b} = \bar{b}_{cp}$  (1).

Введем следующие обозначения:  $U$  — напряжение на секции ЯО, равное разности напряжения источника питания и падения напряжения на транзисторе;  $E = \varepsilon U$  — э.д.с. вращения в секциях ЯО, пропорциональная  $b_{cp}$ ;  $R$  — активное сопротивление секций ЯО;  $\Omega$  — угловая скорость вращения вала двигателя. Для э.д.с. вращения  $e$  в соответствии с формулой (4) можно записать следующим образом:

$$e = \varepsilon U + 0,2 \varepsilon U \sin \beta.$$

Для БДПТ небольшой мощности, примерно до 10...15 Вт, можно пренебречь индуктивностью секций ЯО, считать  $\theta = 0$  и поэтому записать следующее выражение для тока в секции ЯО:

$$i = \frac{U - e}{R} = \frac{U}{R} (1 - \varepsilon - 0,2 \varepsilon \sin \beta).$$

Для момента  $m$  справедливо выражение

$$m = \frac{ei}{\Omega} = \frac{U^2 \varepsilon}{R \Omega} (1 + 0,2 \sin \beta) (1 - \varepsilon - 0,2 \varepsilon \sin \beta) = \frac{U}{R} c \gamma,$$

где  $c = E/\Omega = U\varepsilon/\Omega = \text{const}$ ;  $\gamma = 1 - \varepsilon + 0,2(1 - 2\varepsilon) \sin \beta - 0,04\varepsilon \sin^2 \beta$ , при  $\varepsilon = 0,5$  имеем  $\gamma = 0,5 - 0,02 \sin^2 \beta$ ;  $\gamma_{\min} = 0,48$ ;  $\gamma_{\max} = 0,5$ .

Следовательно, пульсация момента равна

$$\frac{(\gamma_{\max} - \gamma_{\min})}{(\gamma_{\max} + \gamma_{\min})} \cdot 100\% = \frac{(0,5 - 0,48)}{(0,5 + 0,48)} \cdot 100\% = 2,04\%,$$

т. е. весьма незначительна. Отметим, что при малой скорости ( $\Omega \rightarrow 0, \varepsilon \rightarrow 0$ )  $\gamma \rightarrow 1 + 0,2 \sin \beta$ ,  $\gamma_{\min} = 0,8$ ,  $\gamma_{\max} = 1,2$ . Следовательно, пульсация момента равна 20 %, что совпадает с ранее полученным значением для моментного БДПТ и подтверждает справедливость допущения (4). У известного моментного БДПТ пульсация согласно [15] равна 33,3 %, т. е. в 1,7 раз больше.

Для БДПТ мощностью более 10...15 Вт индуктивность  $L$  секций ЯО заметно влияет на электромагнитные процессы. Поэтому приходится подключать ЯО к источнику питания с опережением  $\theta$  для обеспечения форсированного нарастания тока в секциях ЯО в целях увеличения мощности и КПД. Это следует из рис. 3, б для  $L = 0$  и рис. 3, в для  $L \neq 0$ . Индуктивность сглаживает пульсацию якорного тока, а пульсация э.д.с. такая же, как и при  $L = 0$ , поэтому пульсация момента при  $L \neq 0$  больше, чем при  $L = 0$ .

**Заключение.** Рассмотрен альтернативный БДПТ с тороидальной ЯО и двумя цилиндрическими индукторами. Найдено распределение результирующей для ЯО магнитной индукции по окружности воздушного зазора. Определены оптимальные отношения между параметрами индукторов. Установлено, что у рассмотренного моментного БДПТ с двумя индукторами удельный момент

примерно в 1,2 раза меньше, чем у известного моментного БДПТ с неравномерно установленными полюсами индуктора, а пульсация электромагнитного момента для любых скоростей вращения вала двигателя значительно меньше.

Рассмотрены особенности электромагнитных процессов в маломощном БДПТ (до 10...15 Вт), получено выражение для электромагнитного момента. Установлено, что пульсация момента зависит от отношения  $\varepsilon$  э.д.с. вращения к напряжению питания. В частности, у рассмотренного моментного БДПТ ( $\varepsilon \approx 0$ ) пульсация равна 20 %, а у известного БДПТ она равна 33 %, т. е. в 1,7 раз больше. Также установлено, что у рассмотренного скоростного БДПТ при  $\varepsilon \approx 0,5$  пульсация равна примерно 2 %, т. е. весьма незначительна.

Рассмотренный БДПТ является конкурентоспособным по отношению к известному и может найти применение там, где целесообразно применять БДПТ с коммутацией обмотки двумя транзисторами.

## ЛИТЕРАТУРА

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. Гридин В.М. Электромагнитные соотношения в магнитоэлектрическом бесконтактном двигателе постоянного тока с учетом реакции якоря // Тезисы докл. Второй всесоюзной науч.-техн. конф. по бесконтактным машинам постоянного тока. М.: МАИ, 1975. 157 с.
4. Гридин В.М. Моделирование и оптимизация электромагнитных процессов для маломощных бесконтактных двигателей постоянного тока // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2007. № 3. С. 48–61.
5. Гридин В.М. Исследование электромагнитных процессов в бесконтактных двигателях постоянного тока с несимметричной якорной обмоткой // Электричество. 2012. № 10. С. 43–49.
6. Столов Л.И., Зыков Б.Н. Моментные двигатели с постоянными магнитами. М.: Энергия, 1977. 321 с.
7. Столов Л.И., Афанасьев А.Ю. Моментные двигатели постоянного тока. М.: Энергоатомиздат, 1989. 223 с.
8. Баранов М.В., Бродовский В.Н., Зимин А.В., Каржавов Б.Н. Электрические следящие приводы с моментным управлением исполнительными двигателями. М.: Из-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 240 с.
9. Гридин В.М. Электромагнитные характеристики моментных бесконтактных двигателей постоянного тока // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. № 2. С. 75–86.
10. Гридин В.М. Бесконтактные тахогенератор и моментный двигатель постоянного тока с двумя индукторами и однополупериодной коммутацией // Инженерный вестник. 2015. № 11. С. 582–590. URL: <http://engsi.ru/doc/826588.html>
11. Гридин В.М. Бесконтактный моментный двигатель постоянного тока с двухсекционной обмоткой // Электричество. 2016. № 3. С. 39–42.



12. *Гридин В.М.* Способы уменьшения пульсации момента и выходного напряжения бесконтактных моментных двигателей и тахогенераторов постоянного тока // *Электричество*. 2016. № 4. С. 56–61.
13. *Кенио Т., Нагамори С.* Двигатели постоянного тока с постоянными магнитами / пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1991. 229 с.
14. *Осин И.Л., Юферов Ф.М.* Электрические машины автоматических устройств. М.: Изд-во МЭИ, 2003. 424 с.

**Гридин Владимир Михайлович** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Электротехника и промышленная электроника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

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

Гридин В.М. Бесконтактный двигатель постоянного тока с коммутацией обмотки двумя транзисторами // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*. 2017. № 4. С. 54–63. DOI: 10.18698/0236-3933-2017-4-54-63

**NON-CONTACTING DC CURRENT MOTOR WITH COIL SWITCHING BY TWO TRANSISTORS**

**M.V. Gridin**

gridin1940@mail.ru

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

**Abstract**

The purpose of this article was to study the non-contacting DC motor. Within the research we found the distribution of the resultant magnetic induction along the circumference of the air gap. Moreover, we determined optimal relationships between the parameters of inductors. Findings of the research show that in the instantaneous non-contacting DC motor with two inductors, the specific moment is approximately 1,2 times smaller than in the engine with unevenly installed inductor poles, and the pulsation of the electromagnetic moment for any engine shaft rotation speed is much smaller. We considered the features of electromagnetic processes in a low-power non-contacting DC motor and obtained an expression for the electromagnetic moment. As a result, we found out that the torque pulsation depends on the ratio  $\epsilon$ , the EMF of rotation to the supply voltage. In particular, for the instantaneous engine under consideration ( $\epsilon \approx 0$ ), pulsation is 20 %, and for the known engine — 33 %, i.e., 1,7 times greater; the observed high-speed non-contacting DC motor at  $\epsilon \approx 0,5$ , has the torque pulsation which is approximately 2 %, i.e., very insignificant

**Keywords**

*Two-section toroidal coil, inductor, number of poles, specific torque, torque pulsation*

## REFERENCES

- [1] Balagurov V.A., Gridin V.M., Lozenko V.K. *Beskontaktnye dvigateli postoyannogo toka s postoyannymi magnitami* [Brushless DC motors with permanent magnets]. Moscow, Energiya Publ., 1975. 128 p.
- [2] Ovchinnikov I.E., Lebedev N.I. *Beskontaktnye dvigateli postoyannogo toka* [Brushless DC motors]. Leningrad, Nauka Publ., 1979. 270 p.
- [3] Gridin V.M. [Magneto-electric correlations in magneto-electric brushless DC motortaking into account armature reaction]. *Tezisy dokl. Vtoroy vsesoyuznoy nauch.-tekhn. konf. po beskontaktnym mashinam postoyannogo toka* [Theses II USSR sci.-tech. conf. on brushless DC motors]. Moscow, MAI Publ., 1975. 157 p. (in Russ.).
- [4] Gridin V.M. Simulation and optimization of electromagnetic processes for low-power non-contact motors of direct current. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2007, no. 3, pp. 48–61 (in Russ.).
- [5] Gridin V.M. Research on magneto-electric processes in brushless DC motors with non-symmetric armature winding. *Elektrichestvo*, 2012, no. 10, pp. 43–49 (in Russ.).
- [6] Stolov L.I., Zykov B.N. *Momentnyye dvigateli s postoyannymi magnitami* [Torque motors with permanent magnets]. Moscow, Energiya Publ., 1977. 321 p.
- [7] Stolov L.I., Afanas'ev A.Yu. *Momentnyye dvigateli postoyannogo toka* [Torque DC motors]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 223 p.
- [8] Baranov M.V., Brodovskiy V.N., Zimin A.V., Karzhavov B.N. *Elektricheskie sledyashchie privody s momentnym upravleniem ispolnitelnymi dvigatelyami* [Electricalservo drives with instantaneous control byactuating motors]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2006. 240 p.
- [9] Gridin V.M. Electromagnetic characteristics of moment contactless motors of direct current. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2011, no. 2, pp. 75–86 (in Russ.).
- [10] Gridin V.M. Electromagnetic characteristics of moment contactless motors of direct current. *Inzhenernyy vestnik* [Engineering Bulletin], 2015, no. 11, pp. 582–590 (in Russ.). Available at: <http://engsi.ru/doc/826588.html>
- [11] Gridin V.M. Brushless torque DC motor with two-section winding. *Elektrichestvo*, 2016, no. 3, pp. 39–42 (in Russ.).
- [12] Gridin V.M. Methods for lowering torque pulsation and input voltage of brushless torque motors and DC tachogenerators. *Elektrichestvo*, 2016, no. 4, pp. 56–61 (in Russ.).
- [13] Kenjo T., Nagamori S. *Permanent-magnet and brushless DC motors*. 1985. (Russ. ed.: *Dvigateli postoyannogo toka s postoyannymi magnitami*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 229 p.).
- [14] Osin I.L., Yuferov F.M. *Elektricheskie mashiny avtomaticheskikh ustroystv* [Electrical machines of automatic devices]. Moscow, MEI Publ., 2003. 424 p.

**Gridin V.M.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor of Electrical Engineering and Industrial Electronics Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Bauman-skaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

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

Gridin M.V. Non-Contacting DC Current Motor with Coil Switching by Two Transistors. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2017, no. 4, pp. 54–63.

DOI: 10.18698/0236-3933-2017-4-54-63