электронный научно-технический журнал
ИНЖЕНЕРНЫЙ ВЕСТНИК
Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51036. ISSN 2307-0595

Бесконтактные тахогенератор и моментный двигатель постоянного тока с двумя индукторами и однополупериодной коммутацией

11, ноябрь 2015

Гридин В. М.

УДК: 621.313.292

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана
gridin1940@mail.ru

Введение

Бесконтактные двигатели постоянного тока (БДПТ) и тахогенераторы постоянного тока (ТГ) по сравнению с обычными двигателями и тахогенераторами постоянного тока не имеют скользящих контактов и поэтому работают более надежно.

Если БДПТ применяют в качестве моментного, т.е. низкоскоростного двигателя, то его основными характеристиками являются момент на валу и пульсация этого момента. Пульсация момента зависит от числа секций якорной обмотки (ЯО) и типа коммутации секций по положению ротора. Исследованию моментных двигателей посвящен ряд работ, например, [1–3]. Чаще всего применяют БДПТ с трёхсекционной ЯО и двухполупериодной коммутацией секций с помощью шести силовых транзисторов. У такого БДТП пульсация электромагнитного момента составляет не менее (3,5─4) % для различных конструкций индуктора, величины полюсного перекрытия индуктора и исполнений (типов) ЯО из-за синусообразного распределения магнитной индукции по окружности воздушного зазора. Но во многих случаях, например, для гироскопических систем, пульсация не должна превышать (1─2) % [1, 2].

Бесконтактные тахогенераторы постоянного тока, далее ТГ, являются наиболее перспективными благодаря компактности, надежности, линейности выходной характеристики. Они состоят из синхронного генератора (СГ) и полупроводникового выпрямителя его напряжений. Основными характеристиками ТГ являются выходное напряжение и пульсация этого напряжения. Пульсация зависит от чисел секций ЯО СГ и диодов выпрямителя. Исследованию ТГ посвящен ряд работ, например [4─6].

Чаще всего применяют ТГ с трехсекционной ЯО и мостовым выпрямителем из шести диодов. У такого ТГ пульсация выходного напряжения составляет не менее (3,5─4) % из-за синусообразного распределения магнитной индукции по окружности воздуш-

ного зазора. Но во многих случаях пульсация не должна превышать (1─2) % [4, 5]. ТГ могут быть снабжены обычным или активным *RC*- фильтром выпрямленного напряжения. Но такие фильтры не могут эффективно фильтровать (отделять) постоянную составляющую выпрямленного напряжения от переменной составляющей, особенно при малых скоростях вращения вала ТГ. Из-за наличия конденсатора они являются инерционными устройствами.

Здесь рассматриваются моментный БДПТ с трехсекционной ЯО и коммутатором из трех силовых транзисторов и ТГ с трехсекционной ЯО и выпрямителем из трех диодов, имеющие два индуктора, числа полюсов которых отличаются в три или в два раза. На рис.1 показана схема силовой части БДПТ с двумя индукторами И1 и И2.

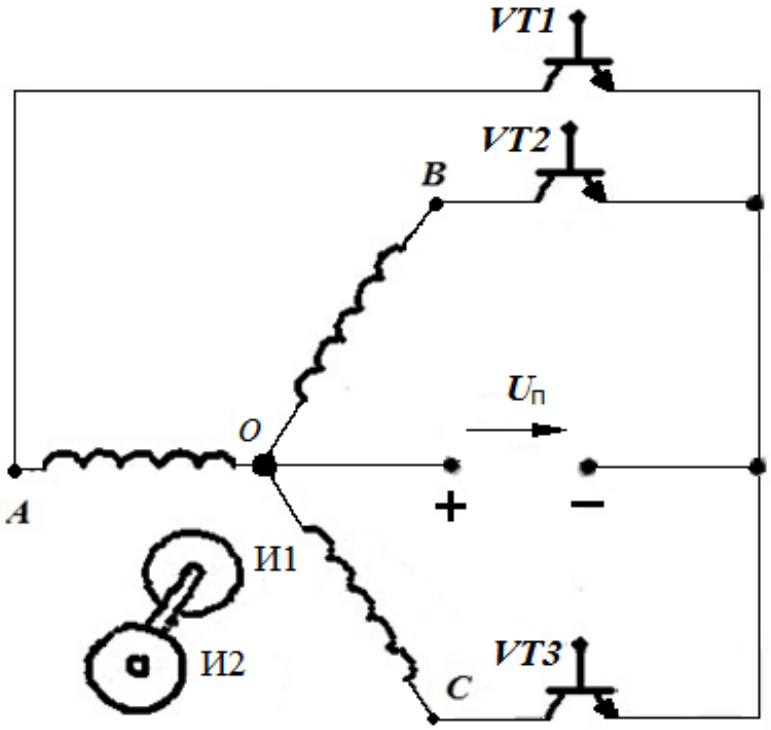
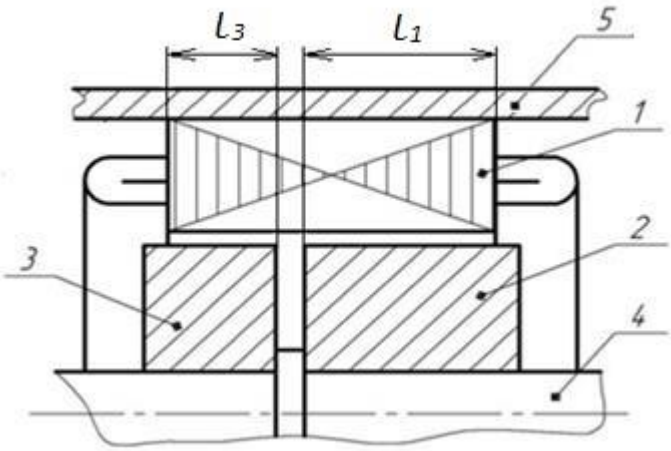


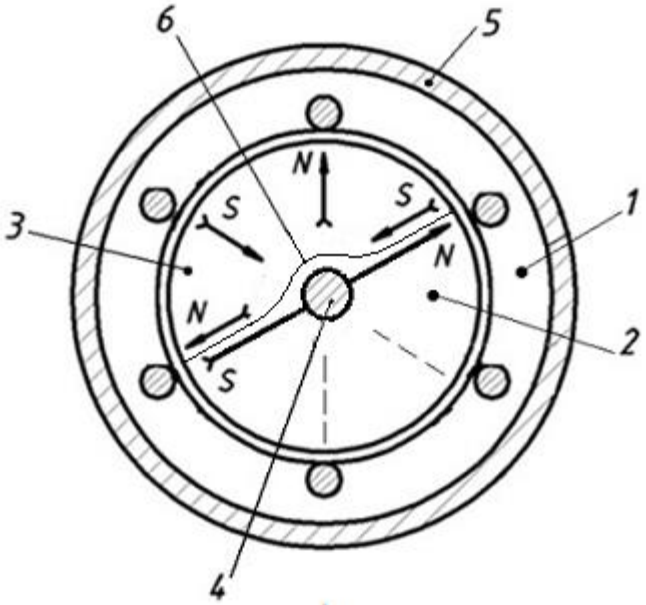
Рис 1. Схема силовой части бесконтактного двигателя постоянного тока

Электрические цепи, исключающие перенапряжение транзисторов, условно не показаны. Они могут быть выполнены, например, в виде стабилитрона и трех диодов, через которые стабилитрон подключают параллельно секциям ЯО. Секции *AO, BO, CO* поочередно при повороте ротора на каждые 120˚ подключаются к источнику питания и отключаются от него транзисторами по сигналам датчика положения ротора. Схему ТГ можно получить путем замены трех транзисторов коммутатора на три диода выпрямителя.

Вначале рассмотрим моментный БДПТ и ТТГ с двумя индукторами, у которых числа полюсов отличаются в три раза. На рис. 2 изображены продольное и поперечное сечения электромеханической части БДПТ и ТГ.



а)



б)

Рис. 2. Продольное сечение (а) и поперечное сечение (б) электромеханической части БДПТ и ТГ:
1 – якорь; 2 – основной индуктор; 3 – дополнительный индуктор; 4 – вал; 5 – корпус; 6 – линия вырыва

Электромеханическая часть БДПТ и ТГ состоит из якоря 1 (магнитопровода с ЯО), основного индуктора 2, дополнительного индуктора 3 с утроенным числом полюсов, вала 4 и корпуса 5. Здесь ЯО – барабанная, диаметральная сосредоточенная, основной индуктор – двухполюсный, а дополнительный индуктор – шестиполюсный. На рис. 2, б как бы удалена часть основного индуктора до линии вырыва 6, что позволяет увидеть часть дополнительного индуктора, расположенного за основным.

На рис. 3 показано распределение по окружности воздушного зазора магнитной индукции: от воздействия основного индуктора b_1, от воздействия дополнительного индуктора b_3 и результирующей для ЯО индукции b от воздействия обоих индукторов.

Координаты окружности зазора представлены углом α.

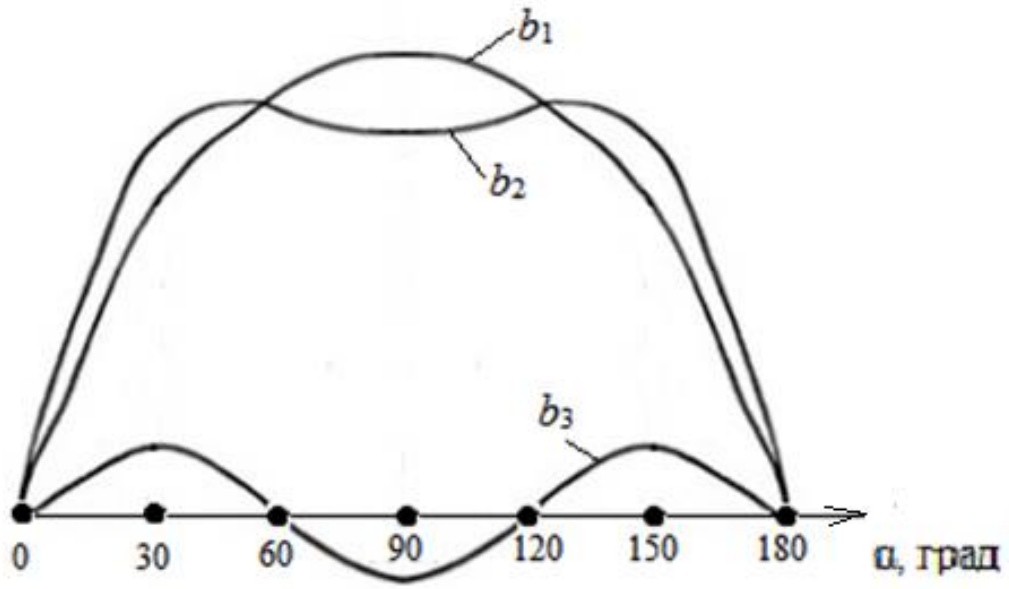


Рис. 3. Распределение по окружности воздушного зазора магнитной индукции: b_1 – от воздействия основного индуктора, b_3 – от воздействия дополнительного индуктора, b – от воздействия обоих индукторов

Для результирующей магнитной индукции b, применив принцип суперпозиции, можно записать следующее выражение:

$$b = \frac{b_1 \cdot l_1 + b_3 \cdot l_3}{l_1 + l_3},$$

где: l_1 и l_3 – длины индукторов 2 и 3 (рис. 2, а),

$b_1 = B_{m1} \cdot (c + sin\,\alpha)$ для углового интервала α=30˚—150˚,

$b_3 = B_{m3} \cdot sin\,3\alpha.$

Значение величины c зависит от конфигурации полюсов основного индуктора, и чем больше это значение c, тем меньше изменяется индукция b_1 при повороте вала БДПТ и ТГ. При c = 0, 0,5, 1,0, 1,5 отношение $b_1(30˚)$ / $b_1(90˚)$, т.е. (c+0,5) / (c+1) равно соответственно 0,5, 0,667, 0,75, 0,8.

Для относительной результирующей магнитной индукции $\overline{b}$ можно записать выражение:

$$\overline{b} = \frac{b \cdot (l_1 + l_3)}{B_{m1} \cdot l_1} = c + sin\,\alpha + K \cdot sin\,3 \cdot \alpha,$$

где

$$K = B_{m3} \cdot l_3 / (B_{m1} \cdot l_1).$$

Считаем оптимальным такое значение коэффициента K, при котором равны значения результирующей магнитной индукции b в начале, середине и в конце интервала $\alpha = 30° - 150°$, т.е.

$$\overline{b}(30°) = \overline{b}(90°) = \overline{b}(150°), \quad c + 0{,}5 + K = c + 1 - K$$

Отсюда K=0,25. Такое значение K можно обеспечить, изменяя отношение l_3 / l_1 длин индукторов, т.е. передвигая вдоль вала дополнительный индуктор (рис. 2, а). При K= 0,25 получим:

$$\overline{b} = c + sin\,\alpha + 0{,}25 \cdot sin\,3 \cdot \alpha$$

Минимальное значение относительной индукции на интервале $\alpha = 30° - 150°$:

$$\overline{b}_{min} = \overline{b}(30°) = c + 0{,}75$$

Максимальное значение относительной индукции $\overline{b}_{max}$ определим из условия:

$$\frac{\partial \overline{b}}{\partial \alpha} = \cos\alpha + 0{,}75 \cdot \cos 3 \cdot \alpha = \cos\alpha \cdot (1{,}75 - 3 \cdot sin^2\alpha) = 0$$

Отсюда:

$$\alpha = 90° \quad \text{и} \quad \alpha_m = \arcsin 0{,}764 = 49{,}8°,$$

$$\overline{b}_{max} = \overline{b}(\alpha_m) = \overline{b}(49{,}8°) = c + 0{,}8910$$

Так как электромагнитный момент БДПТ и напряжение ТГ пропорциональны магнитной индукции b, то для пульсации момента БДПТ и напряжения ТГ ε справедливо выражение:

$$\varepsilon = \frac{b_{max} - b_{min}}{b_{max} + b_{min}} \cdot 100 = \frac{\overline{b}_{max} - \overline{b}_{min}}{\overline{b}_{max} + \overline{b}_{min}} \cdot 100 = \frac{14{,}1}{2 \cdot c + 1{,}641}, \%$$

Для обычных БДПТ и ТГ:

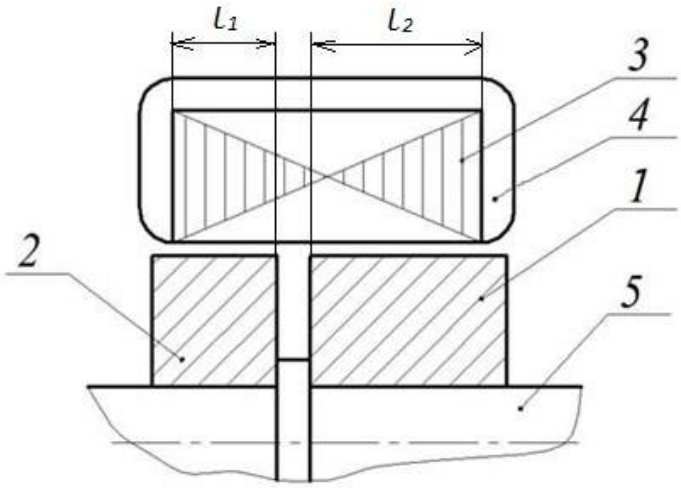
$$K=0, \ \overline{b}=c + \sin\alpha, \ \ \overline{b}_{min}=c + \sin 60^\circ, \ \ \overline{b}_{max}=c + \sin 90^\circ$$

$$\varepsilon = \frac{13{,}4}{2 \cdot c + 1{,}866}$$

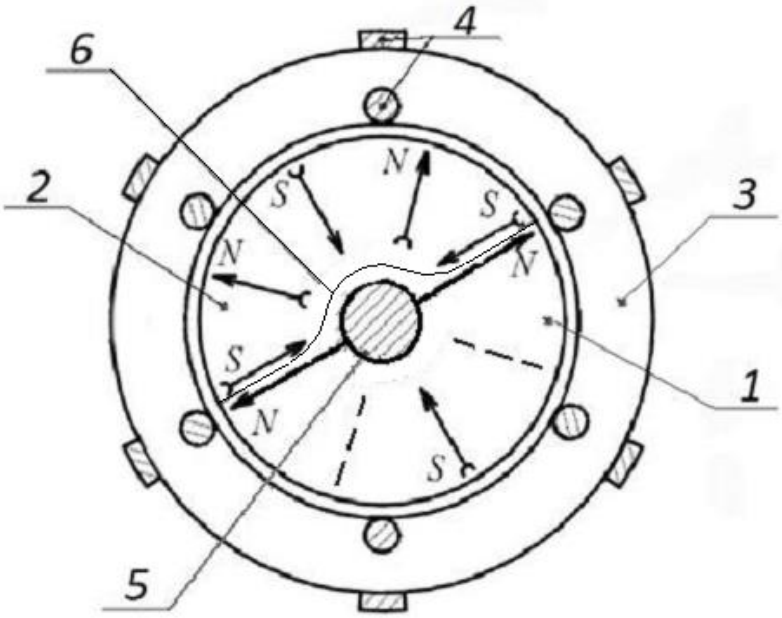
При c = 0,74; ε = 4 %, а при c = 1,3; ε = 3 %.

Для рассматриваемых БДПТ и ТГ при c = 0,74; ε = 4,5 %, а при c = 1,3; ε = 3,3 %. Т.е. значение пульсации примерно такие же, как и у обычных БДПТ и ТГ.

Теперь рассмотрим моментный БДПТ и ТГ с двумя индукторами, числа полюсов которых отличаются в два раза. На рис. 4 изображены продольное и поперечное сечения электромеханической части БДПТ и ТГ.



а)



б)

Рис. 4. Продольное сечение (*а*) и поперечное сечение (*б*) электромеханической части БДПТ и ТГ:
1 – основной индуктор; 2 – дополнительный индуктор;
3 – якорь; 4 – катушка обмотки; 5 – вал; 6 – линия вырыва

Электромеханическая часть БДПТ и ТГ состоит из основного индуктора 1, дополнительного индуктора 2 с удвоенным числом полюсов, якоря 3, содержащего магнитопровод и тороидальную ЯО, и вала 5. Каждая секция ЯО состоит из двух диаметрально противоположных катушек 4. Основной индуктор – четырёхполюсный, а дополнительный индуктор – восьмиполюсный. На рис. 4, б как бы удалена часть основного индуктора до линии вырыва 6, что позволяет увидеть часть дополнительного индуктора, расположенного за основным.

На рис. 5 показано распределение по окружности воздушного зазора магнитной индукции: от воздействия основного индуктора b_1, от воздействия дополнительного индуктора b_2 и результирующей для ЯО индукции b от воздействия обоих индукторов. Координата окружности зазора представлена углом α.

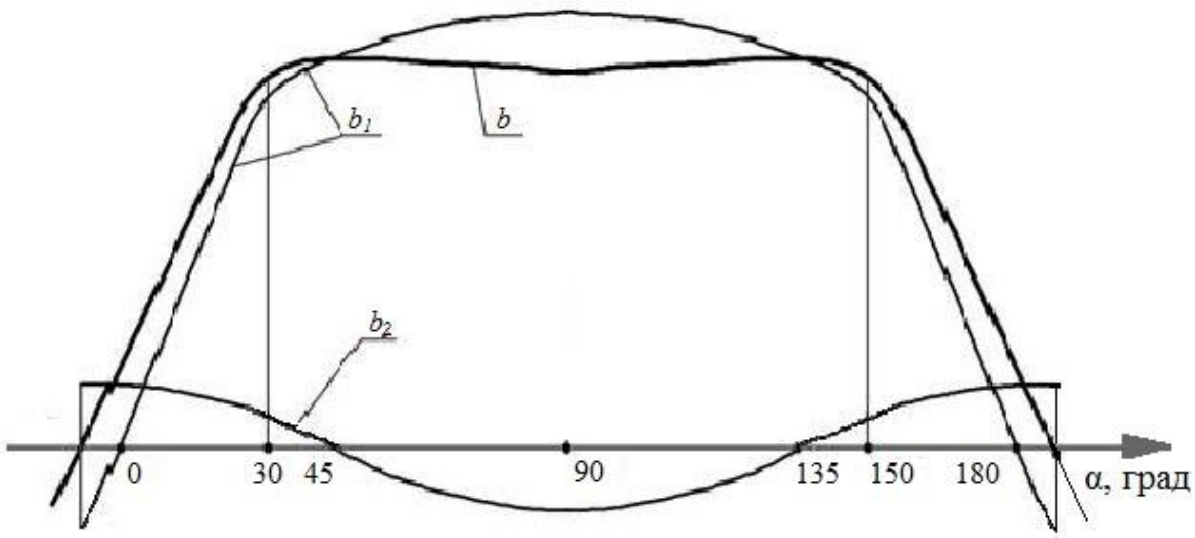


Рис. 5. Распределение по окружности воздушного зазора магнитной индукции: b_1 – от воздействия основного индуктора; b_2 – от воздействия дополнительного индуктора; b – от воздействия обоих индукторов

Для результирующей магнитной индукции b согласно принципу суперпозиции, можно записать следующее выражение:

$$b = \frac{l_1 \cdot b_1 + l_2 \cdot b_2}{l_1 + l_2},$$

где l_1 и l_2 – длины индукторов 1 и 2 (рис. 2, а),

$b_1 = B_{m1} \cdot (c + \sin\alpha)$ для углового интервала α=30˚—150˚,

$b_2 = B_{m2} \cdot \cos 2\alpha$.

Для относительной результирующей магнитной индукции $\bar{b}$ справедливо следующее выражение :

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

где

$$K = \frac{l_2 \cdot B_{m2}}{l_1 \cdot B_{m1}}.$$

Считаем оптимальным такое значение коэффициента K, при котором равны значения магнитной индукции b в начале, середине и в конце интервала α = 30˚—150˚, т.е.:

$$\bar{b}(30°) = \bar{b}(90°) = \bar{b}(150°)\ , \qquad c + 0{,}5 + 0{,}5 \cdot K = c + 1 - K$$

Отсюда $K = 1/3$. Такое значение K можно обеспечить, передвигая вдоль вала дополнительный индуктор (см. рис. 4, а).

При $K = 1/3$ получим:

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

На интервале $\alpha = 30° - 150°$ минимальное значение относительной индукции:

$$\bar{b}_{min} = \bar{b}(30°) = \mathrm{c} + 0{,}667,$$

а максимальное значение относительной индукции $\bar{b}_{max}$ определим, решив уравнение:

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

Отсюда: $\alpha = 90°$ и $\alpha_m = 48{,}6°$,

$$\bar{b}_{max} = \bar{b}(\alpha_m) = \bar{b}(48{,}6°) = c + 0{,}7073.$$

$$\varepsilon = \frac{\bar{b}_{max} - \bar{b}_{min}}{\bar{b}_{max} + \bar{b}_{min}}\cdot 100 = \frac{4{,}16}{2\cdot c + 1{,}3750}\ \%$$

При $c = 0{,}74$; $\varepsilon = 1{,}46$ %, а при $c = 1{,}3$; $\varepsilon = 1{,}05$ %.

Это значительно меньше, чем пульсации для обычных БДПТ и ТГ. Значение пульсации напряжения ТГ можно уменьшить, если выполнить выпрямитель из шести диодов. В этом случае, действуя аналогично, можно получить: $K = 0{,}268$, $\varepsilon = 0{,}16$ % при $c = 0$.

Следует отметить, что по использованию объёма БДПТ и ТГ по рис. 4 уступают БДПТ и ТГ по рис. 2 и обычным БДПТ и ТГ из-за применения тороидальной ЯО.

Заключение

В рассмотренных БДПТ дополнительный индуктор действует как демфер колебаний момента. В рассмотренных ТГ он действует как безынерционный фильтр выпрямленного напряжения.

С другой стороны, рассмотренные БДПТ значительно проще и надежнее, чем обычный БДПТ, благодаря меньшему в два раза числу силовых транзисторов и схем управления этими транзисторами, а у рассмотренных ТГ число диодов выпрямителя вдвое меньше, чем у обычного ТГ.

Поэтому рассмотренные моментные БДПТ и ТГ могут конкурировать с известными БДПТ и ТГ и найти применение.

Список литературы

[1]. Столов Л.И., Афанасьев А.Ю. Моментные двигатели постоянного тока. М.: Энергоатомиздат. 1989. 223 с.

[2]. 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.

[3]. Гридин В.М. Электромагнитные характеристики моментных бесконтактных двигателей постоянного тока. // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. 2011. № 2. С. 75–86.

[4]. Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа. 1976. 416 с.

[5]. Бродовский В.Н., Каржавов Б.Н., Рыбкин Ю.П. Бесколлекторные тахогенераторы постоянного тока. / Под ред. В.Н. Бродовского. М.: Энергоиздат. 1982. 128 с.

[6]. Гридин В.М. Бесконтактные тахогенераторы постоянного тока с несимметричной якорной обмоткой. // Электричество. 2013. № 6. С. 42–45.