

Бесконтактные двигатели постоянного тока с дискретным управлением и модуляцией тока по положению ротора

ГРИДИН В.М.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Рассмотрены бесконтактные двигатели постоянного тока (БДПТ) с дискретным управлением по положению ротора с трех- и двухсекционной и, соответственно, с шестью и четырьмя силовыми транзисторами коммутатора. Двигатели дополнительно снабжены широтно-импульсным модулятором (ШИМ) и выпрямителем сигналов датчика положения ротора. В ШИМ периодическое линейное напряжение сравнивается с выпрямленными сигналами датчика и формируются периодические прямоугольные импульсы с зависящей от положения ротора длительностью, которые запирают силовые транзисторы. Так как момент двигателя без ШИМ и выпрямленные сигналы датчика при повороте ротора изменяются синусоидально (т.е. одинаково), то в результате уменьшается пульсация момента. Описаны устройство и работа датчика и ШИМ, сформулированы требования к значениям их напряжения. Получены выражения для электромагнитного момента БДПТ и его предельных значений. Установлено, что пульсация электромагнитного момента у бесконтактного двигателя с трехсекционной якорной обмоткой не превышает 1%, а у БДПТ с двухсекционной якорной обмоткой равна 1,5%. что значительно меньше, чем пульсация у известных бесконтактных двигателей (4%).

К л ю ч е в ы е с л о в а: бесконтактный двигатель постоянного тока, модулятор, управление выпрямителем сигналов, датчик положения ротора, управление коммутатором, пульсация момента

Бесконтактные двигатели постоянного тока (БДПТ) обладают теми же характеристиками, что и двигатели постоянного тока, но не имеют скользящих контактов [1–4], поэтому работают более надежно, особенно при вибрациях, ускорениях, после ударов, в вакууме и т.п.

Основные характеристики БДПТ – удельный момент (отношение момента к объему активной электромеханической части двигателя), КПД и пульсация момента. Последняя должна быть как можно меньше, особенно для моментных, т.е. низкоскоростных, двигателей, у которых частота вращения вала может быть $(0,01–0,1) \text{ с}^{-1}$. Такие двигатели применяют, например, в гироскопических системах в качестве коррекционных для удержания оси гироскопа в заданном направлении.

Характеристики БДПТ зависят от распределения магнитной индукции по окружности воздушного зазора и способа управления током в секциях якорной обмотки (ЯО) по положению ротора. Возможны два способа управления током.

Первый, дискретный, способ управления обеспечивает при повороте ротора поочередное подключение секций ЯО к источнику питания и отключение их от источника. При трапецеидальной форме ЭДС и оптимальных значениях момента

подключения секций к источнику форма тока в каждой секции близка к трапецеидальной. Трапецеидальная форма ЭДС возможна при трапецеидальном распределении магнитной индукции по окружности воздушного зазора. Реальное распределение магнитной индукции по окружности воздушного зазора – не строго трапецеидальное, поэтому при повороте ротора момент пульсирует. Пульсацию можно уменьшить, плавно изменяя токи в ЯО при повороте ротора или ступенчато, как это показано в [11, 12]. Рассматриваемым здесь БДПТ с дискретным способом управления током посвящены, например, [2, 5–13].

Второй, аналоговый, способ управления обеспечивает при повороте ротора изменение токов в секциях (фазах) ЯО путем позиционной непрерывной или широтно-импульсной модуляции фазных напряжений [7]. Для них характерны синусообразное распределение магнитной индукции по окружности воздушного зазора и синусообразная форма фазных токов. Однако реальное распределение магнитной индукции по окружности воздушного зазора и форма фазных токов не строго синусоидальны, поэтому при повороте ротора момент пульсирует. Пульсацию можно уменьшить, применяя отрицательную обратную связь по току. В этом слу-

чае БДПТ содержит датчик тока с усложненной схемой. С той же целью можно калибровать сигналы датчика положения ротора (ДПР), т.е. корректировать форму фазных токов. Но устройство и процесс калибровки весьма громоздки [14]. Работы [7, 14–16] посвящены БДПТ с аналоговым способом управления током.

Чаще всего применяют БДПТ с дискретным управлением благодаря их более простому устройству. При этом БДПТ имеют трехсекционную ЯО, шесть силовых транзисторов в случае двухполярной коммутации или три силовых транзистора при однополярной коммутации секций ЯО по положению ротора [5, 6]. Индуктор выполняется в виде магнита-звездочки или составным из внутреннего магнитомягкого основания и наружных полюсов-магнитов.

Пульсация момента у известных БДПТ с дискретным и аналоговым управлением составляет не менее 3,5–4%. Но во многих случаях она не должна превышать 2%, например, у коррекционных двигателей гироскопических систем.

Цель настоящей статьи – возможность уменьшения пульсации электромагнитного момента (далее – момента) моментных БДПТ до 1–2%. При этом рассматриваются альтернативные БДПТ с дискретным управлением током в секциях ЯО по положению ротора, трех- и двухсекционной якорной обмоткой, дополнительно снабженные широтно-импульсным модулятором (ШИМ) и выпрямителем сигналов ДПР. У БДПТ с трех- и двухсекционной ЯО коммутатор имеет соответственно шесть и четыре силовых транзистора, а межкоммутационный интервал (МКИ) равен соответственно 60 и 90°. Для БДПТ с двухсекционной ЯО необходим источник питания со средней точкой.

Индуктор выполнен в виде простого цилиндрического постоянного магнита с радиальными полюсами (как и у ДПР), чтобы зависимость момента m' обычного БДПТ (т.е. без ШИМ) от углового положения ротора была близка к синусоидальной. С этой же целью ЯО может быть выполнена укороченной распределенной.

Рассмотрим устройство ДПР. На рис. 1 схематически показано это устройство для БДПТ с трехсекционной ЯО, там же – мостовой выпрямитель сигналов такого ДПР.

Ротор ДПР выполнен в виде цилиндрического постоянного магнита с радиальными полюсами. Число полюсов ДПР равно числу полюсов двигателя. На статоре ДПР расположены три чувствительных элемента (ЧЭ) Э1–Э3, например в виде элемента Холла или интегральной микросхемы с элементом Холла и линейным усилителем. ЧЭ смеще-

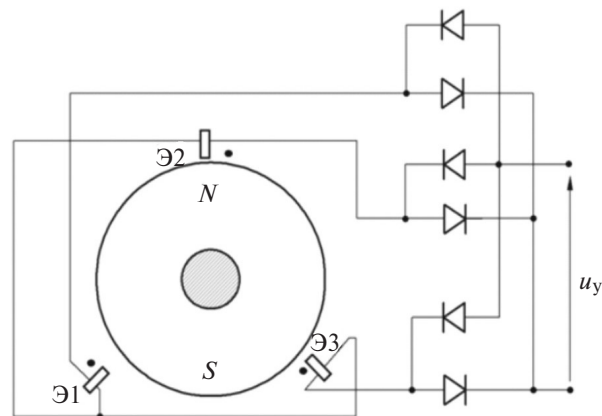


Рис. 1. Устройство датчика положения ротора и выпрямителя его сигналов для БДПТ с трехсекционной ЯО

Fig. 1. The device of the rotor position sensor and rectifier its signals for a BDPT with a three-section nuclear weapons

ны относительно друг друга, как и секции ЯО. Все ЧЭ установлены в обойме, которая может поворачиваться относительно якоря для определения и фиксирования согласованного с якорем положения. Электрические цепи ЧЭ соединены в виде звезды, которая подключена к трехфазному мостовому выпрямителю. Падением напряжения на диодах выпрямителя пренебрегаем. Периодическое выходное напряжение выпрямителя на каждом угловом интервале 60° изменяется по закону:

$$u_y \approx U_{ym} \sin \alpha,$$

где U_{ym} – амплитуда напряжения между сигнальными выводами двух различных ЧЭ, помеченными точками; α – угловое положение ротора.

В качестве ДПР можно применить бесконтактный трехфазный сельсин.

Датчик положения ротора для БДПТ с двухсекционной ЯО в отличие от рассмотренного ДПР имеет два ЧЭ, смещенные на 90°. В качестве ДПР можно применить синус-косинусный вращающийся трансформатор или двухфазный микросин.

На рис. 2 показаны напряжения, поясняющие работу ШИМ,

Здесь $u_{y \max} = U_{ym}$ и $u_{y \min}$ – максимальное и минимальное значения напряжения u_y на выходе выпрямителя сигналов ДПР. Для БДПТ с трех- и двухсекционной ЯО $u_{y \min} = u_{y \max} \sin 60^\circ$ и $u_{y \min} = u_{y \max} \sin 45^\circ$ соответственно. Аналогично $m'_{\min} = m'_{\max} \sin 60^\circ$ и $m'_{\min} = m'_{\max} \sin 45^\circ$, где m'_{\max} и m'_{\min} – максимальное и минимальное значения момента m' . А для напряжения U_m найдем выражение ниже. В ШИМ напряжение u_y сравнивается с периодическим линейным напряжением u_{Δ} , изменяемым по закону: $u_{\Delta} = u_{y \min} + U_m t / T$, где T – период повторения напряжения u_{Δ} .

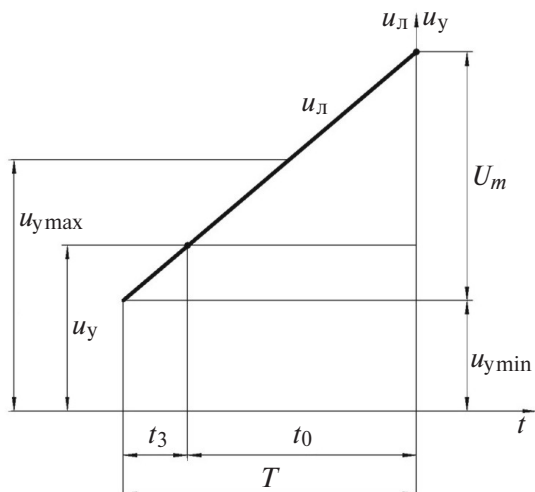


Рис. 2. Напряжения, поясняющие работу ШИМ

Fig. 2. Voltages explaining the operation of PWM

Напряжения u_y и u_l подаются на разные входы компаратора. При $u_l < u_y$ компаратор выдает прямоугольные импульсы u_3 с длительностью t_3 , зависящей от напряжения u_y , т.е. от положения ротора. Эти импульсы запирают силовые транзисторы коммутатора – три транзистора, соединенные с одним и тем же полюсом источника питания в БДПТ с трехсекционной ЯО, и все четыре транзистора в БДПТ с двухсекционной ЯО. В это время ЯО не потребляет ток от источника питания. При $u_l \geq u_y$ силовые транзисторы открыты, как обычно, по сигналам ДПР в течение времени t_0 . Очевидно, чем больше напряжение u_y , тем меньше время t_0 открытого состояния транзисторов и отношение $\gamma = t_0 / T$.

В начале и в конце каждого МКИ напряжение u_y минимально, значение γ максимально, а момент m' обычного БДПТ (т.е. без ШИМ) минимален. В середине МКИ напряжение u_y максимально, значение γ минимально, а момент m' максимален. Поэтому при повороте ротора произведение $\gamma(u_y)u_y$, а следовательно и момент m рассматриваемого БДПТ, почти не изменяются, при этом пульсация момента незначительна. Уменьшению пульсации способствуют синусоидальные зависимости m' и u_y от положения ротора.

Для момента m рассматриваемого БДПТ справедливо выражение:

$$m = \gamma m' \approx \text{const.}$$

Найдем выражения для отношения γ и произведения γu_y , а также для пульсации этого произведения. Из рис. 2 можно получить следующее выражение:

$$\gamma = \gamma(u_y) = (U_m + u_{y \min} - u_y) / U_m.$$

Из условия $u_y \max \gamma(u_y \max) = u_{y \min}$ определим:

$$U_m = u_{y \max}; \quad \gamma = (u_{y \max} + u_{y \min} - u_y) / u_{y \max};$$

$$\gamma u_y = (u_{y \max} + u_{y \min} - u_y) u_y / u_{y \max};$$

$$(\gamma u_y)_{\min} = u_{y \min}.$$

Из уравнения $\frac{d}{dt}(\gamma u_y) = 0$ найдем выражение для

$u_y = u_{ym}$, при котором $\gamma u_y = (\gamma u_y)_{\max}$, получим:

$$u_y = u_{ym} = (u_{y \max} + u_{y \min}) / 2;$$

$$(\gamma u_y)_{\max} = u_{ym}^2 / u_{y \max}.$$

Для определения пульсации момента μ (%) применим выражение:

$$\mu = 100(m_{\max} - m_{\min}) / (m_{\max} + m_{\min}),$$

где m_{\max} , m_{\min} – максимальное и минимальное значения электромагнитного момента.

Пренебрегаем падением напряжения на транзисторах коммутатора, а также – пульсациями, обусловленными механическими переходными процессами, несоосностью соединения валов БДПТ и рабочего механизма.

При одинаковой форме (осциллограмме) напряжения u_y и момента m' справедливо выражение:

$$\mu = 100[(\gamma u_y)_{\max} - u_{y \min}] / [(\gamma u_y)_{\max} + u_{y \min}].$$

Для БДПТ с трехсекционной ЯО, учитывая

$$u_{y \max} = \frac{u_{y \min}}{\sin 60^\circ}, \text{ получаем:}$$

$$(\gamma u_y)_{\max} = (1 + \sin 60^\circ)^2 / (4 \sin 60^\circ) = 1,0052 u_{y \min},$$

$$\mu = 0,26\%.$$

Пульсация настолько мала, что даже при заметных несовпадениях форм (осциллограмм) момента m' и напряжения u_y она все равно не будет превышать 1%.

Для БДПТ с двухсекционной ЯО, учитывая

$$u_{y \max} = \frac{u_{y \min}}{\sin 45^\circ}, \text{ получаем:}$$

$$(\gamma u_y)_{\max} = (1 + \sin 45^\circ)^2 / (4 \sin 45^\circ) = 1,0303;$$

$$\mu = 1,49\% \ll 4\%.$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хрущев В.В. Электрические машины систем автоматики: Учебник для вузов. Л.: Энергоатомиздат, 1985, 368 с.
2. Осин И.Л., Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств: Учебное пос. для вузов. М.: Изд-во МЭИ, 2003, 424 с.
3. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины. М.: Высшая школа, 1985, 250 с.

4. **Зимин Е.Н., Кацевич В.Л., Козырев С.К.** Электроприводы постоянного тока с вентильными преобразователями. М.: Энергоиздат, 1981, 192 с.

5. **Балагуров В.А., Гридин В.М., Лозенко В.К.** Бесконтактные двигатели постоянного тока с постоянными магнитами. М.: Энергия, 1975, 128 с.

6. **Овчинников И.Е., Лебедев Н.И.** Бесконтактные двигатели постоянного тока. Л.: Наука, 1979, 270 с.

7. **Косулин В.Д., Михайлов Г.Б., Омельченко В.В., Путников В.В.** Вентильные электродвигатели малой мощности для промышленных роботов. Л.: Энергоатомиздат, 1988, 184 с.

8. **Овчинников И.Е.** Теория вентильных электрических двигателей. Л.: Наука, 1985, 148 с.

9. **Кенио Т., Нагамори С.** Двигатели постоянного тока с постоянными магнитами/Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1991, 229 с.

10. **Штеллинг Г., Байссе А.** Электрические микромашины/Пер. с нем. М.: Энергоатомиздат, 1991, 229 с.

11. **Гридин В.М.** Способы уменьшения пульсации момента и выходного напряжения бесконтактных моментных двигателей и тахогенераторов постоянного тока. — *Электричество*, 2016, № 4, с. 56–61.

12. **Гридин В.М.** Моментные бесконтактные двигатели постоянного тока с дискретным и дискретно-аналоговым управ-

лением по положению ротора. — *Электричество*, 2017, № 4, с. 50–55.

13. **Гридин В.М.** Характеристики моментных бесконтактных двигателей постоянного тока с симметричной и несимметричной обмотками. — *Электроника и электрооборудование транспорта*, 2017, № 2, с. 28–31.

14. **Балковой А.П., Цаценкин В.К.** Прецизионный электропривод с вентильными двигателями. М.: Изд. дом МЭИ, 2010, 328 с.

15. **Соловьев Л.И., Афанасьев А.Ю.** Моментные двигатели постоянного тока. М.: Энергоатомиздат, 1989, 223 с.

16. **Баранов М.В., Бродовский В.Н., Зимин А.В., Каржавов Б.Н.** Электрические следящие приводы с моментным управлением исполнительными двигателями. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 240 с.

[14.09.2020]



А в т о р: Гридин Владимир Михайлович — кандидат техн. наук, доцент кафедры «Электротехника и промышленная электроника» Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (национального исследовательского университета).

Elektrichestvo, 2021, No. 3, pp. 60–64

DOI:10.24160/0013-5380-2021-3-60-64

Contactless DC Motors with Discrete Control of Current in the Armature Winding Sections Using the Rotor Position Feedback Signal

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

The article considers contactless DC motors with discrete control of the current in the three- and two-section armature winding using the rotor position feedback signal by means of a converter containing six and four power transistors, respectively. The motors are additionally equipped with a pulse width modulator (PWM) and a rectifier of the rotor position sensor signals. In the PWM, the periodic line-to-line voltage is compared with the rectified sensor signals to produce periodic rectangular pulses with the duration depending on the rotor position, which close the power transistors. Since the motor torque without PWM and the rectified sensor signals vary in a sine wave manner with turning the rotor (i.e., in the same way), a lower motor torque pulsation is obtained. The sensor and PWM designs and operation are described, and the requirements for their output voltages are formulated. Expressions for the contactless DC motor electromagnetic torque and its limit values are obtained. It is established that the electromagnetic torque pulsation levels in the contactless DC motors with three- and two-section armature windings do not exceed 1 and 1.5%, respectively, which is significantly lower than the pulsation level in the well-known contactless motors (4%).

Key words: *contactless DC motor, modulator, control of signal rectifier, rotor position sensor, control of a switch, torque pulsation*

REFERENCES

1. **Khrushchev V.V.** *Elektricheskiye mashiny sistem avtomatiki: Uchebnik dlya vuzov* (Electrical machines of automation systems: Textbook for universities). L.: Energoatomizdat, 1985, 368 p.

2. **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.

3. **But D.A.** *Beskontaktnyye elektricheskiye mashiny* (Contactless electrical machines). M.: Vysshaya shkola, 1985, 250 p.

4. **Zimin Ye.N., Katsevich V.L., Kozyrev S.K.** *Elektroprivody postoyannogo toka s ventil'nyimi preobrazovatelyami* (DC electric drives with valve converters). M.: Energoizdat, 1981, 192 p.

5. **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.

6. **Ovchinnikov I.Ye., Lebedev N.I.** *Beskontaktnyye dvigateli postoyannogo toka* (Direct current contactless motors). L.: Nauka, 1979, 270 p.

7. **Kosulin V.D., Mikhaylov G.B., Omel'chenko V.V., Putnikov V.V.** *Ventil'nyye elektrodvigateli maloy moshchnosti dlya promyshlennykh robotov* (Valve electric motors for industrial robots). L.: Energoatomizdat, 1988, 184 p.
8. **Ovchinnikov I.Ye.** *Teoriya ventil'nykh elektricheskikh dvigateley* (The theory of valve electric motors). L.: Nauka, 1985, 148 p.
9. **Kenio T., Nagamori S.** *Dvigateli postoyannogo toka s postoyannymi magnitami/Per. s angl.* (DC motors with permanent magnets / Trans. from English). M.: Energoatomizdat, 1991, 229 p.
10. **Shtelting G., Baysse A.** *Elektricheskiye mikromashiny/Per. s nem.* (Electric micromachines / Trans. from German). M.: Energoatomizdat, 1991, 229 p.
11. **Gridin V.M.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2016, No.4, pp. 56 – 61.
12. **Gridin V.M.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2017, No. 4, pp. 50 – 55.
13. **Gridin V.M.** *Elektronika i elektrooborudovaniye transporta – in Russ. (Electronics and electrical equipment of transport)*, 2017, No.2, pp. 28 –31.
14. **Balkovoy A.P., Tsatsenkin V.K.** *Pretsizionnyy elektroprivod s ventil'nymi dvigatelyami* (Precision electric drive with valve motors). M.: Izd. dom MEI, 2010, 328 p.
15. **Stolov L.I., Afanas'yev A.Yu.** *Momentnyye dvigateli postoyannogo toka* (DC torque motors). M.: Energoatomizdat, 1989, 223 p.
16. **Baranov M.V., Brodovskiy V.N., Zimin A.V., Karzhavov B.N.** *Elektricheskiye sledyashchiye privody s momentnym upravleniyem ispolnitel'nymi dvigatelyami* (Electric servo drives with torque control of the executive motors). M.: MGTU im. N.E. Baumana, 2006, 240 p.

[14.09.2020]