

## Способ формирования мягкой механической характеристики бесконтактных двигателей постоянного тока

ГРИДИН В.М.

*Рассмотренный в статье способ позволяет формировать мягкую механическую характеристику бесконтактных двигателей постоянного тока без преобразования силовой электрической цепи. Двигатель дополнительно снабжен широтно-импульсным модулятором (ШИМ) и датчиком тока, потребляемого обмоткой. Характеристика формируется в виде ломаной линии, состоящей из отрезков (участков). В ШИМ напряжение датчика, пропорциональное току и моменту на валу, сравнивается с периодическим пилообразным напряжением и формируются прямоугольные импульсы, которые запирают силовые транзисторы коммутатора. Чем больше момент и, следовательно, потребляемый ток, тем продолжительнее указанные импульсы, меньше среднее напряжение на обмотке и частота вращения вала двигателя. Переход от одного участка характеристики к другому осуществляется путем дискретного изменения параметров периодического пилообразного напряжения по сигналам датчика тока. Описана совместная работа ШИМ и датчика тока, сформулированы требования к значениям их напряжений. Получены выражения для мягкой механической характеристики. Приведен пример расчета мягкой механической характеристики.*

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** *двигатель постоянного тока, мягкая механическая характеристика, способ формирования, широтно-импульсный модулятор, датчик тока, пример расчета*

Бесконтактные двигатели постоянного тока (БДПТ) имеют жесткую механическую характеристику, подобную характеристике обычных двигателей постоянного тока (ДПТ) с параллельным возбуждением. Однако отсутствие скользящих контактов позволяет им работать более надежно, особенно при вибрациях, ускорениях, после ударов, в вакууме и т.п. [1].

При жесткой механической характеристике и увеличении момента нагрузки частота вращения вала двигателя уменьшается незначительно, поэтому мощность увеличивается почти пропорционально моменту, что неприемлемо для привода, например, электрического транспорта, подъемных и других устройств. Двигатели для них должны иметь мягкую механическую характеристику, при этом частота вращения вала автоматически снижается с увеличением момента нагрузки. Благодаря этому мощность таких двигателей изменяется значительно меньше, чем у ДПТ с параллельным возбуждением [2–4].

Мягкую механическую характеристику имеют ДПТ с последовательным и смешанным возбуждением. Их обмотка возбуждения, расположенная на статоре, соединена последовательно с якорной обмоткой. Следовательно, при изменении момента нагрузки изменяется не только ток якоря, но и магнитный поток, что смягчает механическую характеристику.

В БДПТ источником магнитного потока являются не электромагниты, а постоянные магниты, расположенные на роторе. Поэтому нет возможно-

сти так просто, как у ДПТ, изменять магнитный поток.

В литературе, например в [5–8], предлагались решения по формированию мягкой механической характеристики БДПТ. Она формируется методом кусочно-линейной аппроксимации в виде ломаной линии, состоящей из нескольких (четырёх) отрезков – участков. Переход от одного участка к другому осуществляется дискретным изменением структуры силовой электрической цепи при одновременном дискретном изменении напряжения в этой цепи по сигналам тахогенератора.

Особенности устройства известных БДПТ с мягкой механической характеристикой описаны, например, в [5]: «Каждая фаза трехфазной обмотки состоит из трех последовательно включенных секций с отводами (отпайками), подключенными к трем (дополнительным силовым) ключам переключателя секций, который помимо указанных ключей содержит логическую схему, два генератора прямоугольных импульсов (с различной скважностью указанных импульсов) и два электронных реле (компаратора)». На один вход компараторов подается напряжение тахогенератора, на другой – опорные значения напряжения. Выходы компараторов связаны со входом логической схемы, которая запускает тот или иной генератор. При изменении частоты вращения двигателя дискретно изменяются число активных витков обмотки и длительность импульсов напряжения ее питания. Очевидно, описанные БДПТ с изменяемой структурой силовой

электрической цепи являются очень сложными, дорогими и не очень надежными.

В [9] предложен значительно более простой метод. Мягкая механическая характеристика БДПТ формируется без преобразования силовой электрической цепи с помощью широтно-импульсного модулятора (ШИМ) и датчика тока (ДТ), потребляемого обмоткой. Но у такого БДПТ механическая характеристика состоит только из трех участков, следовательно, возможность формирования характеристики с незначительно изменяемой мощностью ограничена.

Цель настоящей статьи – рассмотрение альтернативного БДПТ, у которого мягкая механическая характеристика формируется с помощью ШИМ и ДТ, как и в [9], но число участков не ограничено, а переход от одного участка характеристики к другому осуществляется дискретным изменением параметров ШИМ по сигналам ДТ (рис. 1).

В ШИМ напряжение  $u_y$  сравнивается с пилообразным напряжением  $u_{\Pi} = u_{y \min} + U_m t / T$ , где  $T$  – период повторения напряжения  $u_{\Pi}$  (рис. 1). Значение минимального напряжения  $u_{y \min}$  может быть как положительным (рис. 1), так и отрицательным.

Напряжения  $u_y$  и  $u_{\Pi}$  подаются на разные входы компаратора, который может быть выполнен на основе операционного усилителя. При  $u_{\Pi} < u_y$  компаратор выдает прямоугольные импульсы длительностью  $t_3$ , зависящей от напряжения  $u_y$ , т.е. от тока  $I$ . Импульсы запирают силовые транзисторы коммутатора, и обмотка в это время не потребляет ток от источника питания. При  $u_{\Pi} \geq u_y$  силовые транзисторы открыты (по сигналам датчика положения ротора) в течение времени  $t_0$  (рис.1). Очевидно, чем больше ток  $I$  и, соответственно, напряжение  $u_y$ , тем меньше время  $t_0$  открытого состоя-

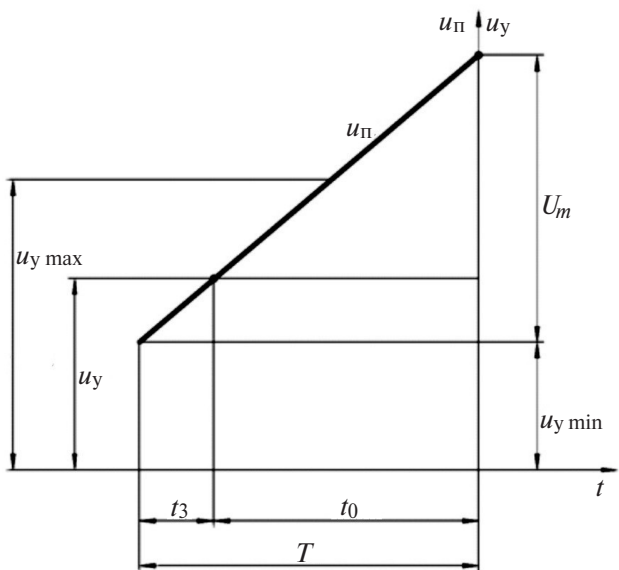


Рис. 1. Напряжения, поясняющие совместную работу ШИМ и ДТ:  $u_y$  – напряжение ДТ, пропорциональное току  $I$ , потребляемому обмоткой;  $u_{y \min}$ ,  $u_{y \max}$  – минимальное и максимальное значения этого напряжения

ния транзисторов, отношение  $\gamma = t_0 / T$  и среднее на периоде  $T$  напряжение на обмотке двигателя. Согласно рис. 1

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

В пренебрежении механическими, магнитными и добавочными потерями электромагнитный момент равен моменту на валу  $M$ , а электромагнитная мощность – мощности нагрузки  $P$ . В пренебрежении падением напряжения на силовых транзисторах коммутатора напряжение на обмотке при  $\gamma = 1$  и холостом ходе двигателя равно напряжению питания. Кроме того, считаем, что при изменении тока в обмотке магнитный поток не изменяется, тогда момент  $M$  пропорционален току в обмотке  $I$  и напряжению  $u_y$ .

На рис. 2 изображена мягкая механическая характеристика БДПТ в относительных единицах.

Она имеет четыре участка 0, 1, 2, 3 в виде прямолинейных отрезков. Их число может быть больше для приближения мягкой характеристики к идеальной, т.е. с неизменяемой мощностью. Переход от одного участка характеристики к другому обеспечивает схема управления, содержащая логическую схему и компараторы, применяемые с той же целью в известных БДПТ с мягкой механической характеристикой (см. выше). При указанном переходе схема управления изменяет параметры напряжения  $u_{\Pi}$  ( $u_{y \min}$  и  $U_m$ ) по сигналам датчика тока (рис. 1).

В реальном БДПТ датчик тока должен быть настроен так, чтобы известному значению момента  $M_*$ , кратного току в обмотке  $I_*$ , соответствовало удобное значение напряжения датчика  $U_*$ , например  $U_* = 1$  В. Тогда любому моменту  $M$  и, в частности, моментам  $M_0, M_1, M_2, M_{\Pi}$  будут соответствовать напряжения датчика  $U = U_* M / M_*$ ;  $U_0 = U_* M_0 / M_*$ ;  $U_1 = U_* M_1 / M_*$ ;  $U_2 = U_* M_2 / M_*$ ;  $U_{\Pi} = U_* M_{\Pi} / M_*$ .

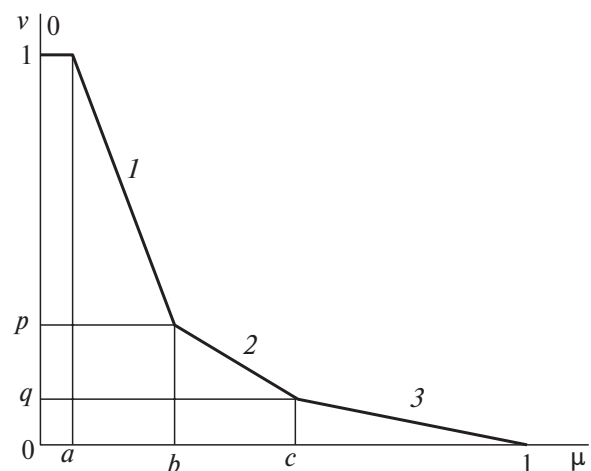


Рис. 2. Механическая характеристика БДПТ:  $\mu = M / M_{\Pi}$ ;  $v = \omega / \omega_0$ ;  $\omega$  – угловая частота вращения вала двигателя;  $M_{\Pi}$  – пусковой момент;  $\omega_0$  – частота вращения вала двигателя при  $\gamma = 1$  и холостом ходе

Для БДПТ с жесткой механической характеристикой справедливо выражение:

$$\omega = \gamma \omega_0 - sM,$$

где  $\gamma$  – отношение среднего напряжения на обмотке к напряжению питания, равное отношению  $t_0/T$  (рис. 1);  $s$  – крутизна жесткой механической характеристики, которая тем меньше, чем больше КПД и мощность двигателя. Ее значение можно определить экспериментально.

Будем считать, что крутизна  $s$  на участках 0, 1, 2 равна нулю, следовательно  $\omega = \gamma \omega_0$ , а на участке 3 не равна нулю, так как на нем  $\gamma < 1$ ,  $\omega < \omega_0$ .

На участке 0 механической характеристики  $M = 0 \div M_0$ . Схема управления обеспечивает постоянное напряжение  $u_y = u_{y \min 0} = U_0$ ,  $U_{m0} = 0$ . Поэтому  $\gamma = 1 = \text{const}$ , напряжение на обмотке – наибольшее, а вал двигателя вращается с наибольшей, но ограниченной частотой  $\omega_0$ .

На участке 1 механической характеристики  $M = M_0 \div M_1$ ;  $\omega = \omega_0 \div \omega_1$ ;  $\omega_1 = p\omega_0$ ;  $\gamma = (U_{m1} + u_{y \min 1} - u_y) / U_{m1} = 1 \div p$ ;  $u_{y \min 1} = U_0$ . В частности,  $p = (U_{m1} + U_0 - U_1) / U_{m1}$ . Отсюда получим выражение

$$U_{m1} = (U_1 - U_0) / (1 - p),$$

с учетом которого

$$\gamma = \frac{U_1 - pU_0 - (1-p)u_y}{U_1 - U_0}.$$

На участке 2 механической характеристики

$$M = M_1 \div M_2; \quad \omega = \omega_1 \div \omega_2; \quad \omega_2 = q\omega_1;$$

$$\gamma = (U_{m2} + u_{y \min 2} - u_y) / U_{m2} = p \div q.$$

В частности,

$$p = (U_{m2} + u_{y \min 2} - U_1) / U_{m2};$$

$$q = (U_{m2} + u_{y \min 2} - U_2) / U_{m2},$$

отсюда

$$U_{m2} = (U_2 - U_1) / (p - q);$$

$$u_{y \min 2} = U_2 - (1 - p)U_{m2},$$

с учетом которых

$$\gamma = \frac{pU_2 - qU_1 - (p - q)u_y}{U_2 - U_1}.$$

Очевидно, на участках 1 и 2 частота вращения вала двигателя линейно зависит от момента нагрузки, так как отношение  $\gamma$  пропорционально скорости, а напряжение  $u_y$  – моменту (рис. 2).

На участке 3 механической характеристики  $M = M_2 \div M_{\Pi}$ ;  $\omega = \omega_2 \div 0$ . Схема управления обеспечивает постоянное напряжение  $u_y = U_2 = \text{const}$ ;  $U_{m3} = 0$ , поэтому  $\gamma = q = \text{const}$ ,  $\omega = q\omega_0 - s(M - M_2)$ , т.е. значение  $\omega$  линейно зависит от момента  $M$ .

Случаю  $\omega = 0$  соответствуют пусковой момент  $M_{\Pi}$  и выражения, связывающие  $M_2$  и  $q$ :

$$M_{\Pi} = M_2 + q\omega_0 / s; \quad q = (M_{\Pi} - M_2)s / \omega_0,$$

с учетом которых получим другое выражение механической характеристики:

$$\omega = q\omega_0 \frac{M_{\Pi} - M}{M_{\Pi} - M_2}.$$

Схема управления может обеспечить вместо постоянного напряжения  $u_y = U_2 = \text{const}$  переход при  $M = M_2$  от  $U_m = U_{m2}$  к  $U_m = U_{m3}$  и, наоборот, от  $U_{m3}$  к  $U_{m2}$ . В этом случае  $M_2$  и  $q$  не зависят друг от друга, а для отношения  $\gamma$  справедливо выражение:

$$\gamma = (U_{m3} + u_{y \min 3} - u_y) / U_{m3} = q \div \gamma_{\Pi},$$

где  $\gamma_{\Pi} \approx 0,03 \div 0,06$  – значение  $\gamma$  в момент трогания двигателя.

В частности,

$$q = (U_{m3} + u_{y \min 3} - U_2) / U_{m3};$$

$$\gamma_{\Pi} = (U_{m3} + u_{y \min 3} - U_{\Pi}) / U_{m3},$$

откуда

$$U_{m3} = (U_{\Pi} - U_2) / (q - \gamma_{\Pi});$$

$$u_{y \min 3} = U_{\Pi} - (1 - \gamma_{\Pi}),$$

с учетом которых

$$\gamma = \frac{qU_{\Pi} - \gamma_{\Pi}U_2 - (q - \gamma_{\Pi})u_y}{U_{\Pi} - U_2}.$$

Очевидно, на участке 3 значение  $\omega$  также линейно зависит от момента  $M$ .

Приведенные выше формулы позволяют рассчитывать мягкую механическую характеристику БДПТ при различных исходных данных.

**Пример.** Расчет мягкой механической характеристики. Известны  $M_{\Pi} = 8$  Н·м;  $\omega_0 = 345$  1/с и координаты точек на границах участков характеристики (рис. 2):  $M_0 / M_{\Pi} = a = 0,06$ ;  $M_1 / M_{\Pi} = b = 0,2$ ;  $M_2 / M_{\Pi} = c = 0,5$ , отсюда  $M_0 = 0,48$  Н·м;  $M_1 = 1,6$  Н·м;  $M_2 = 4$  Н·м;  $\omega_1 / \omega_0 = p = 0,3$ ;  $\omega_1 = 103,5$  1/с.

По формуле  $q = (M_{\Pi} - M_2)s / \omega_0$ , приняв  $s \approx 10$  1/(с·Н·м), расчет дает  $\omega_2 / \omega_0 = q = 0,116$ ,  $\omega_2 = 40$  1/с.

Считаем, что датчик тока настроен так, что  $U_* / M_* = 0,5$  В/Н·м, а  $M_* = 1$  Н·м, тогда  $U_0 = 0,24$  В;  $U_1 = 0,8$  В;  $U_2 = 2$  В;  $U_{\Pi} = 4$  В.

Расчет дает:  $U_{m1} = 0,8$  В;  $u_{y \min 1} = 0,24$  В;  $U_{m2} = 6,52$  В;  $u_{y \min 2} = -3,77$  В;  $U_{m3} = 26,3$  В;  $u_{y \min 3} = -21,3$  В при  $\gamma_{\Pi} = 0,04$ .

Значения  $U_m$  и  $u_{y \min}$  можно изменить, скорректировав значения напряжений  $U_1$  и  $U_2$ .

Расчет значений мощности для точек характеристики с известными координатами:  
 $P_a = aI M_{\Pi} \omega_0 = 165,6$  Вт;  $P_b = bP M_{\Pi} \omega_0 = 165,6$  Вт;  
 $P_c = cq M_{\Pi} \omega_0 = 160,1$  Вт;  $P_a = P_b \approx P_c$ .

Согласно [9] наибольшей мощности соответствуют точки, лежащие на середине участков характеристики. Для такой точки на участке 1  $\mu = M / M_{\Pi} = 0,13$ ;  $\nu = \omega / \omega_0 = 0,65$ ;  $P = 233,2$  Вт; для точки на участке 2  $\mu = 0,35$ ;  $\nu = 0,208$ ;  $P = 200,9$  Вт. Следовательно, при изменении момента нагрузки от  $0,06 M_{\Pi}$  до  $0,5 M_{\Pi}$  мощность рассмотренного в статье БДПТ изменяется в 1,46 раз, что меньше, чем у двигателей постоянного тока с последовательным возбуждением [9].

Изменение мощности можно уменьшить, более удачно выбрав координаты точек на границах участков механической характеристики или увеличив число таких участков.

#### 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. Вольдек А.И. Электрические машины: Учебник для вузов. Л.: Энергия, 1974, 840 с.

3. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: Учебник для вузов. М.: Энергия, 1980, 928 с.

4. Копылов И.П. Электрические машины: Учебник для вузов. М.: Высшая школа, Логос, 2000, 607 с.

5. Лебедев А.Н. Формирование тяговой механической характеристики вентильного двигателя. — Электротехника, 1988, № 2, с. 41–45.

6. Лебедев А.Н. Характеристики тягового вентильного двигателя с постоянными магнитами при регулировании напряжения питания. — Электротехника, 1989, № 8, с. 49–51.

7. Каган В.Г., Рояк С.Л., Боченков Б.М., Шраменко С.Г. Транзисторные приводы с бесконтактными синхронными двигателями для станков с ЧПУ. — Электротехническая промышленность. Сер. Электропривод. М.: Информэлектро, 1984, вып. 1, с. 11–15.

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

9. Гридин В.М. Бесконтактный двигатель постоянного тока с мягкой механической характеристикой. — Электричество, 2019, № 8, с. 51–56.

[29.05.2019]

*А в т о р: Гридин Владимир Михайлович — кандидат техн. наук, доцент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, диссертацию защитил в 1979.*

*Electrichestvo, 2020, No. 2, pp. 18–21*

*DOI:10.24160/0013-5380-2020-2-18-21*

## A Method to Obtain a Soft Mechanical Characteristic of Contactless DC Motors

GRIDIN Vladimir M. (Moscow State Technical University named N.E. Bauman, Moscow, Russia) — Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

*A method using which it is possible to obtain a soft mechanical characteristic of contactless DC motors without transforming their power electrical circuit is considered. The motor is additionally fitted with a pulse-width modulator (PWM) and a sensor of the current consumed by the winding. The characteristic is synthesized in the form of an open polygon consisting of sections. In the PWM, the sensor output voltage proportional to the current and shaft torque is compared with a periodic sawtooth voltage, as a result of which rectangular pulses closing the switch power transistors are generated. The higher the torque and, accordingly, the higher the consumed current, the longer the pulses and the lower the mean voltage applied to the winding and the motor shaft rotation frequency. The transition from one section of the characteristic to another is done by discretely changing the parameters of the periodic sawtooth voltage in response to the current sensor signals. Joint operation of the PWM and current sensor is described, and requirements for their voltage values are formulated. Expressions for the soft mechanical characteristic are obtained. An example of calculating the soft mechanical characteristic is given.*

*Key words: DC motor, soft mechanical characteristic, synthesis method, pulse-width modulator, current sensor, calculation example*

#### REFERENCES

1. Balagurov V.A., Gridin V.M., Lozenko V.K. *Beskontaktnye dvigateli postoyannogo toka s postoyannymi magnitami* (Contactless DC motors with permanent magnets). Moscow, Energiya, 1975, 128 p.
2. Vol'dek A.I. *Elektricheskiye mashiny: Uchebnik dlya vuzov* (Electric machines: Textbook for high schools). Leningrad, Energiya, 1974, 840 p.
3. Ivanov-Smolenskiy A.V. *Elektricheskiye mashiny: Uchebnik dlya vuzov* (Electric machines: Textbook for high schools). Moscow, Energiya, 1980, 928 p.
4. Kopylov I.P. *Elektricheskiye mashiny: Uchebnik dlya vuzov* (Electric cars: Textbook for high schools). 2000, 607 p.
5. Lebedev A.N. *Elektrotehnika — in Russ. (Electrical Engineering)*, 1988, No. 2, p. 41–45.

6. Lebedev A.N. *Elektrotehnika — in Russ. (Electrical Engineering)*, 1989, No. 8, pp. 49–51.

7. Kagan V.G., Royak S.L., Bochenkov B.M., Shramenko S.G. *Elektrotehnicheskaya promyshlennost'. Ser. Elektroprivod — in Russ. (Electrical industry. Ser. Electric drive)*. Moscow, Informelectro, 1984, iss. 1, pp. 11–15.

8. Kosulin V.D., Mikhaylov G.B., Omel'chenko V.V., Putnikov V.V. *Ventil'nyye elektrodvigatelei maloy moshchnosti dlya promyshlennykh robotov* (Low-power valve motors for industrial robots). Leningrad, Energoatomizdat, 1988, 184 p.

9. Gridin V.M. *Electrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2019, No. 8, pp. 51–56.

[29.05.2019]