

Бесконтактный двигатель постоянного тока с мягкой механической характеристикой

ГРИДИН В.М.

Рассматриваемый двигатель дополнительно снабжен широтно-импульсным модулятором (ШИМ) и датчиком тока, потребляемого обмоткой. В ШИМ напряжение датчика, пропорциональное току, сравнивается с периодическим пилообразным напряжением и формируются прямоугольные импульсы, запирающие силовые транзисторы коммутатора. Чем больше момент на валу и, следовательно, потребляемый ток, тем больше длительность указанных импульсов, меньше среднее значение напряжения на обмотке и частота вращения вала двигателя. Описана совместная работа ШИМ и датчика тока, сформулированы требования к их напряжениям. Получены выражения для преобразованной, т.е. мягкой, механической характеристики, а также для характеристик, необходимых при проектировании двигателей и при преобразовании жестких механических характеристик реальных двигателей в мягкую характеристику. Приведены примеры расчета характеристик. Двигатель обеспечивает примерно такое же небольшое изменение мощности при изменении момента нагрузки от 0,5 до 1,5 значений номинального момента, как и двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением, но проще известных бесконтактных двигателей постоянного тока с мягкой механической характеристикой.

К л ю ч е в ы е с л о в а: бесконтактный двигатель постоянного тока, мягкая механическая характеристика, широтно-импульсный модулятор, датчик тока, примеры расчета характеристик двигателя

Бесконтактные двигатели постоянного тока (БДПТ) имеют жесткую механическую характеристику, подобную характеристике обычных двигателей постоянного тока (ДПТ) с параллельным возбуждением, но не имеют скользящих контактов, и поэтому работают 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, следовательно мощность увеличивается почти пропорционально моменту, что неприемлемо для привода электрического транспорта, подъемных и других устройств. Для них требуются двигатели с мягкой механической характеристикой, у которых автоматически уменьшается частота вращения вала при увеличении 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. Расположенная на статоре обмотка возбуждения этих двигателей соединена последовательно с якорной обмоткой. При изменении момента нагрузки изменяется не только ток в обмотке якоря, но и магнитный поток, что и смягчает механическую характеристику.

В БДПТ источником магнитного потока являются не электромагниты, а постоянные магниты, расположенные на роторе. Поэтому нет возможности изменять магнитный поток так же просто, как у ДПТ.

В известной литературе предлагались решения по формированию мягкой механической характеристики БДПТ [5–8]. В этих работах мягкая механическая характеристика формируется методом кусочно-линейной аппроксимации в виде ломаной линии, состоящей из нескольких отрезков – участков. Переход от одного участка к другому происходит путем дискретного изменения структуры силовой электрической цепи и одновременного дискретного изменения напряжения на 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 изменяемой скважностью) и два электронных реле (компаратора)». На один вход компараторов подается напряжение тахогенератора, на другой – опорные напряжения. Выходы компараторов связаны со входом логической схемы. При изменении частоты

вращения двигателя дискретно изменяются число активных витков обмотки и длительность импульсов напряжения ее питания. В БДПТ по источнику [8] обмотка двухфазная, каждая ее фаза состоит из двух секций, а вместо изменения числа витков обмотки меняется последовательное соединение секций на параллельное и наоборот.

Очевидно, известные БДПТ с мягкой механической характеристикой – сложные, дорогие и невысоконадежные. Поэтому создание БДПТ с мягкой механической характеристикой, конкурентных описанным в [5–8], следует считать актуальной задачей.

Цель настоящей статьи – предложение по созданию более простого БДПТ с мягкой механической характеристикой. В этом двигателе при увеличении момента нагрузки автоматически снижается напряжение на обмотке с помощью широтно-импульсного модулятора (ШИМ) по сигналам датчика тока (ДТ), потребляемого обмоткой.

На рис. 1 показаны 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, причем $u_y \leq u_{y \max}$.

В ШИМ напряжение u_y сравнивается с периодическим пилообразным напряжением u_{Π} , изменяемым по закону $u_{\Pi} = u_{y \min} + U_m t / T$, где T – период повторения напряжения u_{Π} (см. рис. 1). Напряжения u_y и u_{Π} подаются на разные входы компаратора, который может быть выполнен на основе операционного усилителя. При $u_{\Pi} < u_y$ компаратор выдает прямоугольные импульсы с длительностью t_3 , зависящей от напряжения u_{Π} , т.е. от тока I ; импульсы запирают силовые транзисторы коммутатора. В это время обмотка не потребляет ток от источника питания. При $u_{\Pi} \geq u_y$ силовые транзисторы открыты (по сигналам датчика положения ротора)

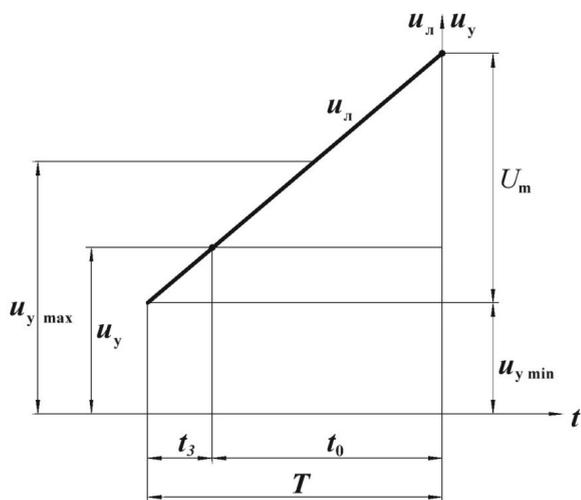


Рис. 1. Напряжения, поясняющие совместную работу ШИМ и ДТ

ра) в течение времени t_0 (см. рис. 1). Очевидно, чем больше ток I и соответственно напряжение u_y , тем меньше время t_0 открытого состояния транзисторов, отношение $\gamma = t_0 / T$ и среднее на периоде T напряжение на обмотке двигателя.

Для отношения γ согласно рис. 1 справедливо выражение:

$$\gamma = (U_m + u_{y \min} - u_y) / U_m = 1 - (u_y - u_{y \min}) / U_m.$$

При равенстве напряжений $u_{y \max}$ и U_m :

$$\gamma = 1 - (u_y - u_{y \min}) / u_{y \max}.$$

Будем пренебрегать механическими, магнитными и добавочными потерями. Тогда электромагнитный момент равен моменту на валу M , а электромагнитная мощность – мощности нагрузки P . Также пренебрегаем падением напряжения на силовых транзисторах коммутатора. Тогда напряжение на обмотке при холостом ходе двигателя U 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 .

Так как $u_y / u_{y \max} = I / I_{\max} = M / M_{\max}$, где I_{\max} , M_{\max} – максимальные значения тока и момента на ограниченном интервале (см. рис. 2), а M_{\min} – минимальное значение момента на том же интервале, то

$$u_{y \min} / u_{y \max} = M_{\min} / M_{\max} = \nu;$$

$$\gamma = 1 + \nu - M / M_{\max}.$$

Представим $M_{\min} = K_{\min} M_H$, $M_{\max} = K_{\max} M_H$, где M_H – номинальный момент; $K_{\min} / K_{\max} = \nu$.

Примерные значения $K_{\min} = 0,4 \div 0,6$; $K_{\max} = 1,5 \div 2,0$; $\nu = 0,2 \div 0,4$.

На рис. 2 изображена преобразованная механическая характеристика БДПТ, на которой ω – угловая скорость вращения вала двигателя.

Характеристика имеет три участка. Для обычных жестких механических характеристик на всех

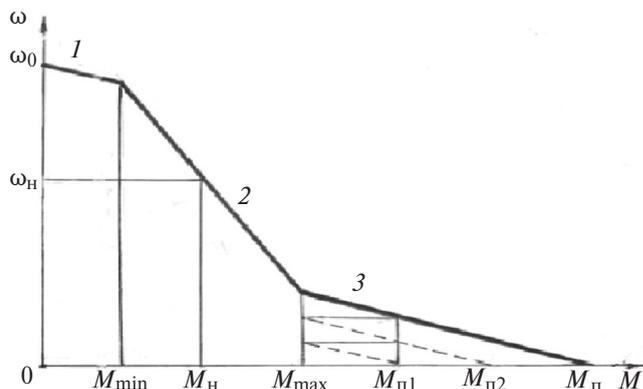


Рис. 2. Механическая характеристика БДПТ

участках преобразованной характеристики БДПТ справедливо общее выражение:

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

где ω_0 – частота вращения вала двигателя при напряжении U на обмотке и холостом ходе; γ – отношение напряжения на обмотке к напряжению U , равное t_0/T , причем напряжение на обмотке – среднее значение напряжения на периоде T (см. рис. 1); c – крутизна естественной жесткой механической характеристики, для которой $\gamma=1$:

$$c = [\omega_0 - \omega(M_H)] / M_H = d\omega_0 / M_H,$$

где $\omega(M_H)$ – частота вращения вала двигателя при $\gamma=1$, $M=M_H$; $d=1-\omega(M_H)/\omega_0$.

Примерные значения $\omega(M_H)/\omega_0=0,86 \div 0,92$; $d=0,08 \div 0,14$.

Коэффициент d тем меньше, чем больше КПД и мощность двигателя. Его значение можно определить экспериментально.

С учетом формулы для коэффициента d получим общее выражение механической характеристики БДПТ на всех участках:

$$\omega = \left(\gamma - d \frac{M}{M_H} \right) \omega_0.$$

На участке 1 механической характеристики $M=0 \div M_{\min}$, $\gamma=1$, напряжение U на обмотке – наибольшее, а вал двигателя вращается с наибольшей, но ограниченной скоростью, поэтому «разнос» ротора невозможен. Механическая характеристика описывается выражением:

$$\omega = \left(1 - d \frac{M}{M_H} \right) \omega_0.$$

На участке 2 механической характеристики $M=M_{\min} \div M_{\max}$, $\gamma=1+v-M/M_{\max}=1 \div v$. Напряжение на обмотке изменяется от U до vU .

С учетом формулы для отношения γ получим следующее выражение для механической характеристики:

$$\omega = \left(1 + v - \frac{1 + dK_{\max}}{K_{\max}} \frac{M}{M_H} \right) \omega_0,$$

которое показывает, что частота вращения вала двигателя линейно зависит от момента на валу.

Для номинального режима работы двигателя ($M=M_H$, $\omega=\omega_H$) справедливы выражения:

$$\gamma = \gamma_H = 1 + v - \frac{1}{K_{\max}} = 1 - \frac{1 - K_{\min}}{K_{\max}} < 1; \quad \omega_H = g\omega_0;$$

$$g = \frac{\omega_H}{\omega_0} = 1 + v - \frac{1 + dK_{\max}}{K_{\max}}; \quad \omega_0 = \omega_H / g.$$

Из выражения для отношения g получим формулы для коэффициентов:

$$K_{\min} = 1 - (1 - g - d)K_{\max};$$

$$K_{\max} = (1 - K_{\min}) / (1 - g - d).$$

Видим, что коэффициент K_{\min} тем меньше, чем больше коэффициент K_{\max} и меньше коэффициент g , и что, изменяя коэффициент K_{\min} , можно изменять коэффициент K_{\max} .

При $M=M_{\min}$ значение $\omega=(1-dK_{\min})\omega_H/g$,

при $M=M_{\max}$ – $\omega=(1-dK_{\max})\omega_H/g$.

Мощность БДПТ равна $P=M\omega(M)$;

$$P(M_{\min}) = K_{\min} (1 - dK_{\min}) P_H / g;$$

$$P(M_{\max}) = K_{\max} (v - dK_{\max}) P_H / g,$$

где $P_H = M_H \omega_H$ – номинальная мощность.

Решив уравнение $\frac{dP}{dM} = 0$, получим:

$$M = M' = \frac{(1+v)}{2} \frac{K_{\max}}{(1+dK_{\max})} M_H;$$

$$\omega(M') = \frac{1+v}{2} \omega_H / g;$$

$$P(M') = P_{\max} = \frac{K_{\max} (1+v)^2}{4g(1+dK_{\max})} P_H,$$

где P_{\max} – максимальная мощность.

На участке 3 $M=M_{\max} \div M_{\Pi}$ (пусковой момент), $\gamma=v$, напряжение vU на обмотке наименьшее, пусковой ток в $1/v$ раз меньше, чем при напряжении U . Механическая характеристика – жесткая и описывается выражением

$$\omega = \left(v - d \frac{M}{M_H} \right) \omega_0.$$

Частота вращения вала изменяется от нуля до $(v-dK_{\max})\omega_H/g$.

При $\omega=0$

$$M_{\Pi} = \frac{v}{d} M_H; \quad K_{\Pi} = M_{\Pi} / M_H = \frac{v}{d},$$

отсюда $K_{\min} = K_{\Pi} K_{\max} d$, обычно $K_{\Pi} = 2 \div 3$. Очевидно, чем меньше отношение $v = M_{\min} / M_{\max}$, тем меньше значения пускового тока и момента. Для их уменьшения необходимо увеличивать значение момента M_{\max} и уменьшать момент M_{\min} .

Если, например, $K_{\max} = 1,7$; $K_{\Pi} = 2,7$; $d = 0,11$, то $K_{\min} = 0,5$ и $v = 0,294$.

Из двух формул для коэффициента K_{\min} можно получить третью (без коэффициента K_{\max}):

$$K_{\min} = \frac{K_{\Pi} d}{K_{\Pi} d + 1 - g - d}.$$

Приведенные выше формулы позволяют определять характеристики для различных исходных данных.

Преобразованная механическая характеристика БДПТ может состоять только из двух прямолинейных участков 1 и 2. В этом случае участок 2 отличается от такового на рис. 2 тем, что момент M_{\max} является пусковым моментом M_{Π} , а максимальное напряжение $u_{y,\max}$ (см. рис.1) должно соответствовать максимальному моменту $M_{\max} = M_{\Pi} = K_{\Pi} M_{\text{H}}$ и пусковому току:

$$K_{\min} = dK_{\Pi}^2; K_{\max} = K_{\Pi} = \sqrt{\frac{K_{\min}}{d}}; v = \sqrt{K_{\min} d}.$$

Если, например, $K_{\min} = 0,5$, $d = 0,11$, то $K_{\Pi} = 2,13 < 2,7$, $v = 0,235 < 0,294$.

Рассмотренные выше преобразованные механические характеристики БДПТ (как мягкие) подходят для привода электрического транспорта и подъемных устройств и могут быть реализованы с помощью ШИМ и ДТ. Для механической характеристики, состоящей из трех участков, характерны большое значение пускового момента и более медленное начало разгона двигателя, чем для характеристики, состоящей из двух участков. Поэтому она больше подходит для привода электрического транспорта и подъемных устройств.

Для проектирования БДПТ с мягкой механической характеристикой должны быть известны номинальные значения напряжения питания, мощности P_{H} , частоты вращения ω_{H} или момента M_{H} , значения коэффициентов K_{Π} и d , а также отношения g или коэффициента K_{\max} . Выше показано, как определять значения неизвестных характеристик.

Рассчитаем значения параметров БДПТ для $K_{\Pi} = 2,7$; $d = 0,11$; $g = 0,6$. Получим следующие результаты:

$$K_{\min} = 0,5; K_{\max} = 1,7; v = 0,294; \gamma_{\text{H}} = 0,706;$$

$$\omega(0,5M_{\text{H}}) = 1,586\omega_{\text{H}}; \omega(1,5M_{\text{H}}) = 0,414\omega_{\text{H}};$$

$$P(0,5M_{\text{H}}) = 0,793P_{\text{H}}; P(1,5M_{\text{H}}) = 0,621P_{\text{H}};$$

$$M' = 0,927M_{\text{H}}; \omega(M') = 1,086\omega_{\text{H}}; P_{\max} = 1,006P_{\text{H}}.$$

Согласно результатам расчетов при изменении момента нагрузки от 0,5 до 1,5 номинального значения частота вращения вала двигателя уменьшается в 3,831 раз, а мощность изменяется в 1,62 раз.

Но при оптимальном значении отношения g или K_{\max} мощность двигателя будет изменяться в 1,5 раза и меньше. У ДПТ с последовательным возбуждением частота вращения вала, примерно пропорциональная $1/\sqrt{M}$, и мощность, примерно пропорциональная \sqrt{M} (см. [2]), изменяются в 1,732 раза ($\sqrt{1,5}/\sqrt{0,5} = \sqrt{3} = 1,732$).

П р и л о ж е н и е. Безреостатный ступенчатый пуск БДПТ. При отношении v/d , большем $2,0 \div 2,5$, с целью уменьшения пускового тока можно реализовать ступенчатый пуск двигателя без применения токоограничивающих резисторов. Например, при трехступенчатом пуске двигатель разгоняется от $M_{\Pi 1}$ до M_{\max} сначала по двум параллельным механическим характеристикам, показанным на рис. 2 в виде прерывистых наклонных отрезков, а затем при $M \leq M_{\Pi 1}$ – по непрерывной механической характеристике.

На первой ступени двигатель разгоняется по самой нижней прерывистой механической характеристике, параллельной характеристике на участках 1 и 3. Характеристику можно описать выражением

$$\omega = \left(\gamma_{\Pi 1} - d \frac{M}{M_{\text{H}}} \right) \omega_0,$$

где $\gamma_{\Pi 1} < v$.

Напряжение на обмотке, пусковой ток и пусковой момент меньше таковых при пуске двигателя без токоограничения в $v/\gamma_{\Pi 1}$ раз. Для пускового момента $M_{\Pi 1}$ справедливо выражение

$$M_{\Pi 1} = M_{\max} + \frac{M_{\Pi} - M_{\max}}{s},$$

а для отношения $\gamma_{\Pi 1}$ напряжения на обмотке к напряжению U – выражение

$$\gamma_{\Pi 1} = d \frac{M_{\Pi 1}}{M_{\text{H}}},$$

где s – число ступеней пуска двигателя, определяется по формуле, вытекающей из выражения для пускового момента $M_{\Pi 1}$:

$$s = \frac{M_{\Pi} - M_{\max}}{M_{\Pi 1} - M_{\max}}.$$

На второй ступени двигатель разгоняется по более высокой прерывистой механической характеристике, которую можно описать выражением

$$\omega = \left(\gamma_{\Pi 2} - d \frac{M}{M_{\text{H}}} \right) \omega_0,$$

где $\gamma_{\Pi 1} < \gamma_{\Pi 2} < \gamma_{\Pi 3} < \dots < v$; $\gamma_{\Pi 2} = d \frac{M_{\Pi 2}}{M_{\text{H}}}$;

$$M_{п2} = M_{\max} + \frac{M_{п} - M_{\max}}{s} 2.$$

Для k -й ступени пуска справедливы выражения, аналогичные предыдущим:

$$\omega = \left(\gamma_{пk} - d \frac{M}{M_{\text{H}}} \right) \omega_0; \quad \gamma_{пk} = d \frac{M_{пk}}{M_{\text{H}}};$$

$$M_{пk} = M_{\max} + \frac{M_{п} - M_{\max}}{s} k.$$

Для последней ступени ($k = s$) справедливы выражения:

$$\gamma_{пs} = d \frac{M_{п}}{M_{\text{H}}} = v; \quad \omega = \left(\gamma_{п} - d \frac{M}{M_{\text{H}}} \right) \omega_0.$$

Формулы для моментов $M_{пk}$ получены из рассмотрения подобных прямоугольных разновеликих треугольников с параллельными гипотенузами на рис. 2.

Значения отношений $\gamma_{пk}$ должна обеспечивать схема управления пуском двигателя с соответствующими значениями амплитуд M_{mk} периодического пилообразного напряжения $u_{\text{д}}$ (см. рис. 1) в соответствии с формулой

$$U_{mk} = \frac{u_{\text{y.max}} = u_{\text{y.min}}}{1 - \gamma_{пk}},$$

вытекающей из формулы для отношения γ (см. выше)

$$\gamma_{пk} = 1 - \frac{u_{\text{y.max}} = u_{\text{y.min}}}{U_{mk}}.$$

При каждом уменьшении момента с $M_{п1}$ до M_{\max} и соответствующем уменьшении тока в обмотке схема управления пуском двигателя должна заменять значение отношения $\gamma_{п1}$ на $\gamma_{п2}$, $\gamma_{п2}$ на $\gamma_{п3}$ и т.д. до $\gamma_{пs} = v$. В результате двигатель продолжает разгоняться по другой, более высокой, механической характеристике.

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. Л.: Энергия, 1974, 840 с.
3. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. М.: Энергия, 1980, 928 с.
4. Копылов И.П. Электрические машины. 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. Электропривод. М.: Информэлектро, 1984, вып. 1, с. 11–15.
8. Косулин В.Д., Михайлов Г.Б., Омельченко В.В., Путьков В.В. Вентильные электродвигатели малой мощности для промышленных роботов. Л.: Энергоатомиздат, 1988, 184 с.

[08.10.2018]

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, диссертацию защитил в 1979 г.

A Contactless DC Motor with a Soft Mechanical Characteristic

GRIDIN Vladimir M. (Moscow State Technical University named N.E. Bauman, Moscow, Russia) — Associate Professor of the Department «Electrical Engineering and Industrial Electronics», Cand. Sci. (Eng.)

The considered motor is additionally fitted with a pulse-width modulator (PWM) and a winding current sensor. In the PWM, the sensor voltage proportional to the current is compared with a periodic sawtooth voltage, and rectangular impulses closing the switching device's power transistors are generated. The higher the shaft torque and, hence, the consumed current, the longer the duration of these impulses, the smaller the average voltage across the winding, and the lower the motor shaft rotation frequency. Joint operation of the PWM and current sensor is described, and requirements for their voltages are formulated. Expressions for the converted (i.e., soft) mechanical characteristic, as well as for the characteristics necessary in designing motors and in converting the rigid mechanical characteristics of real motors into a soft characteristic are obtained. Examples illustrating the calculation of characteristics are given. The motor produces approximately the same small change of power in changing the load torque from 0.5 to 1.5 of the

nominal torque as a series-wound DC motor, but has a design simpler than that of well-known contactless DC motors with a soft mechanical characteristic.

Key words: contactless DC motor, soft mechanical characteristic, pulse-width modulator, current sensor, motor characteristics calculation examples

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* (Electrical machines). Leningrad, Energiya, 1974, 840 p.
3. **Ivanov-Smolenskiy A.V.** *Elektricheskiye mashiny* (Electrical machines). Moscow, Energiya, 1980, 928 p.
4. **Kopylov I.P.** *Elektricheskiye mashiny* (Electrical machines). Moscow, Vysshaya shkola, Logos, 2000, 607 p.
5. **Lebedev A.N.** *Elektrotehnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 1988, No. 2, pp. 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.** *Elektrotekhnicheskaya promyshlennost'. Elektroprivod – in Russ. (Electrical Industry. Electric Drives)*, 1984, iss. 1, pp. 11–15 (Moscow, Informelektro).
8. **Kosulin V.D., Mikhaylov G.B., Omel'chenko V.V., Putnikov V.V.** *Ventil'nye elektrodvigateli maloy moshchnosti dlya promyshlennykh robotov* (Switched small-capacity electric motors for industrial robots). Leningrad, Energoatomizdat, 1988, 184 p.

[08.10.2018]