

УДК 621.313.8

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СИЛА ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ С НЕМАГНИТНЫМ ЯКОРЕМ

Д.В. Макаров, А.В. Сапсалева, С.А. Харитонов

Новосибирский государственный технический университет

Благодаря своим высоким эксплуатационным качествам вентильные двигатели находят все более широкое применение в системах автоматического управления. Этому способствует как прогресс в развитии компонентной базы силовой электроники, так и в создании высокоэффективных постоянных магнитов. Применение вентильных двигателей с немагнитным якорем, в том числе линейных, расширяет возможные сферы практического использования вентильных приводов в мехатронных системах. Полученное расчетное соотношение для электромагнитной силы секции линейного вентильного двигателя с немагнитным якорем позволяет определить на интервале коммутации как электромагнитную силу линейного двигателя, так и электромагнитный момент вращающейся машины. Кроме того, открывается возможность оценить также уровень пульсаций электромагнитных сил и моментов. В работе определено общее выражение для электромагнитной силы линейного двигателя при 120-градусном законе коммутации и произведена оценка пульсаций электромагнитной силы, обусловленных дискретной коммутацией секций якорной обмотки.

Ключевые слова: вентильный двигатель, постоянные магниты, индукция магнитного поля, ряды Фурье, электромагнитная сила.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-4-84-93

Введение

Настоящая работа посвящена анализу электромагнитных сил бесконтактных двигателей постоянного тока с немагнитным якорем (БДПТ). БДПТ представляют собой сочетание синхронной машины с полупроводниковым коммутатором, переключаящим секции обмотки якоря в зависимости от их положения относительно магнитного поля индуктора и одновременно осуществляющим регулирование скорости перемещения подвижного элемента двигателя. В силу этих причин их часто называют вентильными двигателями (в англоязычной литературе BLDC или PMSM).

Основные соотношения получены в данной работе для линейного БДПТ, который способен заменить комплекс «усилитель мощности – коллекторный двигатель постоянного тока – редуктор». Целями такой замены являются повышение быстродействия, точности и надежности привода.

Бурное развитие силовой полупроводниковой элементной базы и прогресс в производстве термостабильных постоянных магнитов из материала неодим-железо-бор (Nd-Fe-B) открывают широкие перспективы по разработке вентильных электродвигателей и приводов на их основе. Специальные легирующие добавки способствуют повышению коэрцитивной силы и сохранению работоспособности магнитов при нагреве до +170° С и пятикратном от номинального кратковременном значении момента и тока якоря. За последние десять лет вентильные электродвигатели заняли прочное положение в производственных программах ведущих зарубежных электромашиностроительных компаний (Сименс, Бош Рексрот, Дженерал Электрик, Ансальдо, Фанук и др.). В большинстве каталогов

готовой продукции этих компаний вентиляльные двигатели с редкоземельными постоянными магнитами представлены на первом месте.

Щеточно-коллекторный узел традиционных машин постоянного тока не только снижает надежность и перегрузочную способность двигателя, но и исключает его использование в агрессивных, взрывоопасных и вакуумно-чистых средах. Вентиляльные двигатели имеют более простую конструкцию и практически свободны от указанных недостатков. Одним из основных препятствий для широкого внедрения вентиляльных приводов является необходимость датчика положения ротора. Особенно ощутим данный недостаток в оборудовании, которое подвергается значительным механическим воздействиям вибрационного и ударного характера.

Существует способ управления вентиляльными электродвигателями без датчика положения ротора [1]. Реализация этого способа возможна только при 120-градусном законе коммутации, поскольку он основан на контроле величины противоЭДС, наводимой в обесточенных обмотках. Такой способ управления допустим, когда не требуется большая кратность пускового момента и исключается режим работы на упор. Типичные сферы применения привода без датчика положения ротора: холодильное оборудование, компрессоры, системы нагрева, вентиляции и кондиционирования воздуха.

Исполнительные механизмы различных технологических производств выдвигают такие требования к динамике электроприводов, как глубокий диапазон регулирования скоростью с заданной точностью ее стабилизации на минимуме и высокую точность отработки заданных перемещений с максимальным быстродействием. Эти факторы обуславливают невозможность применения управления вентиляльным двигателем без датчика положения.

В [2] отмечается, что вентиляльный электропривод на базе синхронных машин с постоянными магнитами является универсальным средством электромеханического преобразования энергии и автоматизации технологических процессов. Определенную нишу здесь могут занять вентиляльные двигатели с немагнитным якорем, в том числе линейные.

Высокие требования к динамике электроприводов с вентиляльными двигателями обуславливают необходимость оценки не только уровня электромагнитных сил и моментов электрических двигателей, но и их пульсаций. Еще более остро эти вопросы ощутимы в случаях применения в приводах линейных электродвигателей. В настоящей статье проводится оценка уровня электромагнитных сил линейного бесконтактного двигателя постоянного тока с немагнитным якорем и их пульсаций, обусловленных дискретной коммутацией фазных обмоток вентиляльных двигателей.

1. Электромагнитная сила секции вентиляльного двигателя с немагнитным якорем

Расчетная модель линейного индуктора с постоянными магнитами приведена на рис. 1. Полюсы из магнитотвердого материала прикреплены к ядру, магнитная проницаемость которого принята равной бесконечности $\mu = \infty$. На расстоянии δ от полюсов – гладкая поверхность с $\mu = \infty$. Данная поверхность служит заменой эквипотенциали, расположенной посередине зазора двигателя. Направление вектора намагниченности \vec{J} характеризует полярность полюсов индуктора.

Для двигателей с магнитоэлектрическим возбуждением реакция якоря пренебрежимо мала. В этом случае нормальная составляющая индукции магнитного поля в воздушном зазоре для сплавов из редкоземельных материалов будет равна [3, 4]

$$B_z = \frac{4B_r}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sh}(n\pi h_*) \cdot \sin(n\pi\alpha/2) \cdot \text{ch}(n\pi(z_* + \delta_*))}{n \cdot \text{sh}(n\pi(h_* + \delta_*))} \cos(n\pi x_*), \quad (1)$$

где B_r – остаточная индукция постоянных магнитов, τ – полюсное деление, $x_* = x/\tau$ и $z_* = z/\tau$ – относительные координаты, отсчитываемые соответственно от оси постоянного магнита вдоль плоскости воздушного зазора и поверхности полюса в воздушном зазоре по высоте магнита, $h_* = h/\tau$ и $\delta_* = \delta/\tau$ – относительные значения высоты магнита и одностороннего воздушного зазора, α – коэффициент полюсного перекрытия.

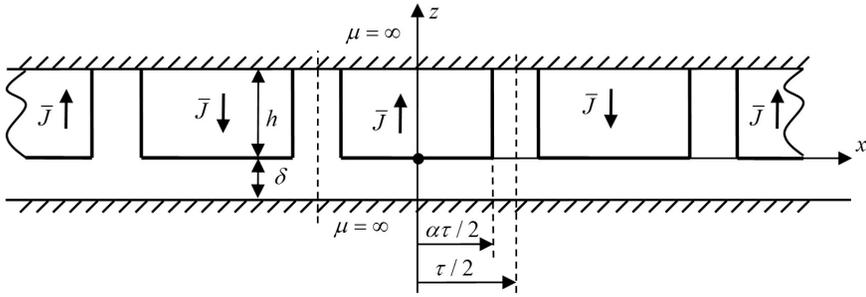


Рис. 1 – Расчетная модель линейного индуктора с постоянными магнитами

Fig. 1 – The evaluation model of a linear inductor with permanent magnets

Среднее значение индукции магнитного поля по объему воздушного зазора, занимаемому обмоткой якоря, будет равно

$$B_{\delta} = \frac{2}{h_2} \int_{-\delta}^{-(\delta-h_2/2)} B_z(x, z) dz,$$

где h_2 – толщина немагнитного якоря.

После подстановки под знак интеграла выражения (1) и интегрирования получим

$$B_{\delta} = \frac{4B_r}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sh}(n\pi h_*) \cdot \sin(n\pi\alpha/2) \cdot \text{sh}(n\pi(\delta_* - \Delta_*))}{n^2 (\delta_* - \Delta_*) \cdot \text{sh}(n\pi(h_* + \delta_*))} \cos(n\pi x_*), \quad (2)$$

где $\Delta_* = \frac{\delta - h_2/2}{\tau}$ – относительная величина воздушного зазора в свету между поверхностями якоря и полюсами индуктора.

Обозначим, как γ_2 – ширину зоны, которую занимает одна секция обмотки якоря на одном полюсном делении ($\gamma_2 \leq \tau/3$). Внутри этой зоны распределение витков обмотки якоря непрерывное. Тогда величина электромагнитной силы, действующей на секцию с N числом витков, в которых протекает ток I , расположенную на расстоянии x от оси магнита параллельно плоскости воздушного зазора в магнитном поле с индукцией B_{δ} , будет определяться выражением

$$F = \frac{IN}{\gamma_*} \int_{x_* - \gamma_*/2}^{x_* + \gamma_*/2} B_{\delta}(x_*) dx_*, \quad (3)$$

где l – активная длина проводника обмотки якоря.

Подставив в (3) выражение индукции (2), после интегрирования получим

$$F = IINB_r \sum_1^{\infty} C_n \cos n\pi x_*, \quad (4)$$

где $\gamma_* = \gamma_2 / \tau$, $C_n = \frac{8\text{sh}(n\pi h_*) \cdot \sin(n\pi\alpha / 2) \cdot \sin(n\pi\gamma_* / 2) \cdot \text{sh}(n\pi(\delta_* - \Delta_*))}{n^3 \pi^3 \gamma_* (\delta_* - \Delta_*) \cdot \text{sh}(n\pi(h_* + \delta_*))}$.

Аналогично можно получить выражение для ЭДС, наведенной в секции, пересекающейся в воздушном зазоре со скоростью V ,

$$E = VINB_r \sum_1^{\infty} C_n \cos n\pi x_*. \quad (5)$$

Полученные выражения для электромагнитной силы и ЭДС двигателя можно представить в безразмерной форме:

$$F_* = E_* = \sum_1^{\infty} C_n \cos n\pi x_*, \quad (6)$$

где $F_* = \frac{F}{IINB_r}$, $E_* = \frac{E}{VINB_r}$.

2. Электромагнитная сила вентильного двигателя при 120-градусной коммутации

На основании выражения (6) можно провести анализ различных схем соединения секций обмотки якоря при различных законах коммутации.

Рассмотрим лучевую обмотку с двуполярным питанием при 120-градусном законе коммутации. Схема питания обмотки от мостового коммутатора и диаграмма работы его силовых ключей приведены на рис. 2, а и б соответственно. В каждый момент времени коммутатор подключает к источнику питания две секции обмотки, причем соединение секций получается последовательным. Длительность межкоммутационного интервала составляет $\alpha_k = \tau / 3$. Коммутация производится в момент, когда начало очередной секции, подключаемой к источнику питания, совпадает с началом полюсного деления, как это показано на рис. 2, в. Диаграмма токов секций, соответствующая режиму коммутации ключей коммутатора (рис. 2, б), приведена на рис. 2, г.

Электромагнитная сила, развиваемая двигателем в каждый момент времени, будет равна сумме сил двух отдельных секций:

$$F_* = \sum_1^{\infty} C_n \cos n\pi(x_* - 1/6) + \sum_1^{\infty} C_n \cos n\pi(x_* + 1/6).$$

После несложных преобразований получается, что

$$F_* = \sum_1^{\infty} 2C_n \cos \frac{n\pi}{6} \cos n\pi x_*.$$

Функция $\cos n\pi x_*$ на интервале коммутации $\alpha_{k*} = \alpha_k / \tau = 1/3$ разлагается в ряд [5].

$$\cos n\pi x_* = \frac{\sin(n\pi/6)}{n\pi/6} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos(6k\pi x_*)}{1 - (6k/n)^2} (-1)^k \right].$$

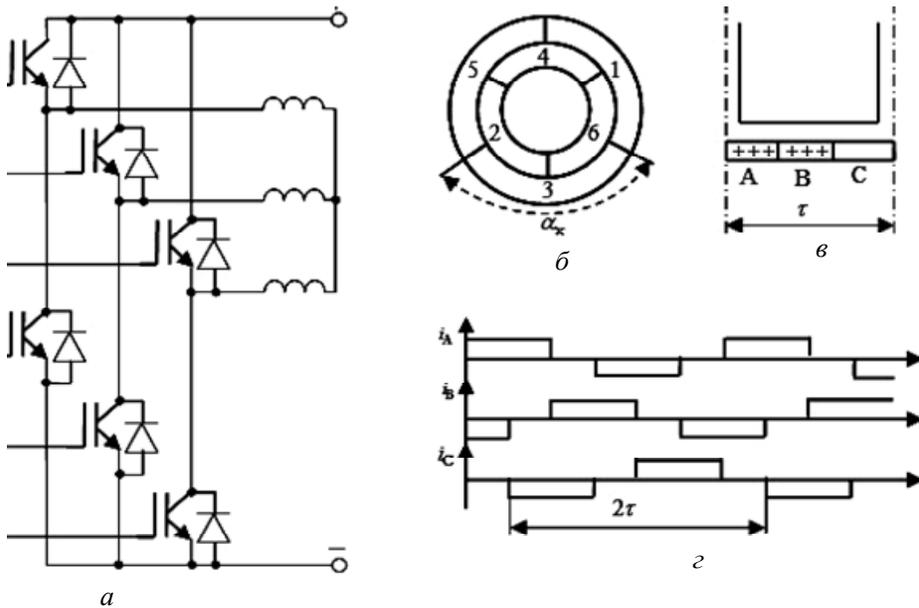


Рис. 2 – Схема питания обмотки (а); диаграмма работы силовых ключей (б); диаграмма момента коммутации (в); диаграмма токов секций (г)

Fig. 2 – Winding supply scheme (a); diagram of commutation technique (b); commutation moment diagram (c); diagram of section's current (d)

С учетом данного разложения можно получить выражение для безразмерной силы, справедливое для любого значения текущей координаты в пределах интервала коммутации,

$$F_* = F_{*0} + \sum_{k=1}^{\infty} F_{*k} \cos 6k\pi x_*,$$

$$\text{где } F_{*0} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{6C_n \sin(n\pi/3)}{n\pi}, \quad F_{*k} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{12C_n \sin(n\pi/3)}{[1 - (6k/n)^2] n\pi} (-1)^k.$$

Исследование подобных рядов для реальных параметров бесконтактных двигателей с немагнитным ротором, проведенное в [6], показало, что при оценке постоянной составляющей достаточно ограничиться первым членом ряда по n (составляющие кратные трем в разложении отсутствуют). А при оценке переменной составляющей достаточно учесть первый член ряда по k и 1, 5 и 7 члены ряда по n . Максимальная амплитуда пульсаций второй гармонической составляющей

ряда по k будет составлять не более 3 % от постоянной составляющей. В результате окончательное выражение для безразмерной силы лучевой обмотки с двухполярным питанием при 120-градусном законе коммутации можно представить в виде

$$F_* = F_{*0} + K_{\Pi} F_{*0} \cos 6\pi x_*,$$

где $F_{*0} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} C_1$, K_{Π} – коэффициент пульсаций, равный [3],

$$K_{\Pi} = \frac{F_{*1}}{F_{*0}} = \frac{2}{35} \left(1 - 15,9 \frac{C_5}{C_1} - 18,8 \frac{C_7}{C_1} \right).$$

Аналогично будет выглядеть выражение электромагнитной в абсолютных единицах:

$$F = F_0 + K_{\Pi} F_0 \cos 6\pi x_* . \quad (7)$$

Среднее значение электромагнитной силы можно выразить формулой

$$F_0 = C_k I ,$$

где I – ток секций якорной обмотки, C_k – конструктивная постоянная двигателя, равная

$$C_k = lNB_r \frac{3\sqrt{3}}{\pi} C_1 .$$

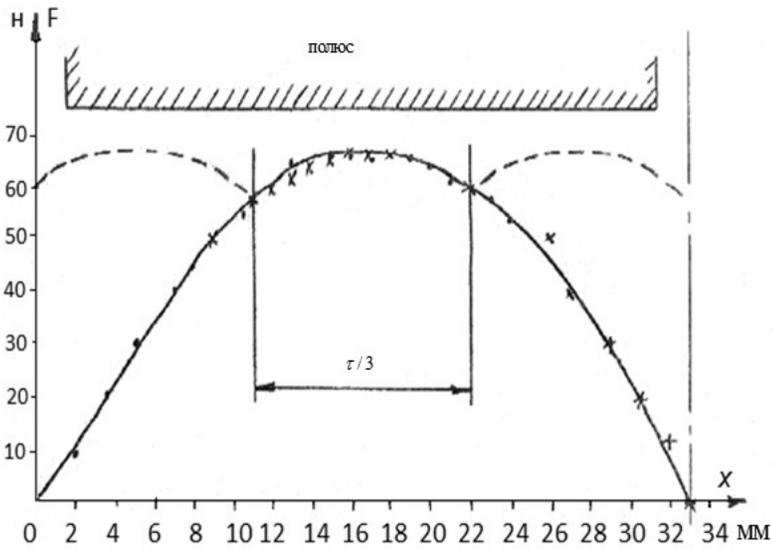
Аналогично выглядит выражение для ЭДС, наводимой в секциях якорной обмотки,

$$E = E_0 + K_{\Pi} E_0 \cos(6\pi x_*), \quad (8)$$

где $E_0 = C_k V$, V – скорость перемещения якоря.

Одним из недостатков бесконтактных двигателей постоянного тока являются пульсации силы, связанные с дискретной коммутацией секций якорной обмотки по положению. В [7] показано, что за счет рационального выбора геометрических размеров для линейного бесконтактного двигателя с немагнитным якорем можно получить коэффициент пульсаций силы менее 0,06. Для экспериментального определения пульсаций силы двигателя была снята характеристика зависимости силы от перемещения индуктора относительно якоря на длине полюсного деления, равного 0,033 м. Зависимость представлена на рис. 3.

Характеристика показывает, что изменение силы происходит по закону, близкому к синусоидальному, а амплитуда пульсаций примерно равна 6,5 %. На рис. 4 показана осциллограмма пульсаций силы, полученная на основании структурной модели линейного вентильного двигателя с немагнитным якорем при коэффициенте пульсаций 0,065. Осциллограмма снята при силе статического сопротивления, близкой к номинальной силе двигателя. Как видно, пульсации силы, полученные в структурной модели, достаточно точно соответствуют пульсациям силы реального двигателя.



* - результаты измерений при смещении в прямом направлении
 * - результаты измерений при смещении в обратном направлении

Рис. 3 – Характеристика зависимости силы от перемещения индуктора относительно якоря на длине полюсного деления

Fig. 3 – Characteristic of the force dependence on the displacement of the inductor relative to the length of the armature pole pitch

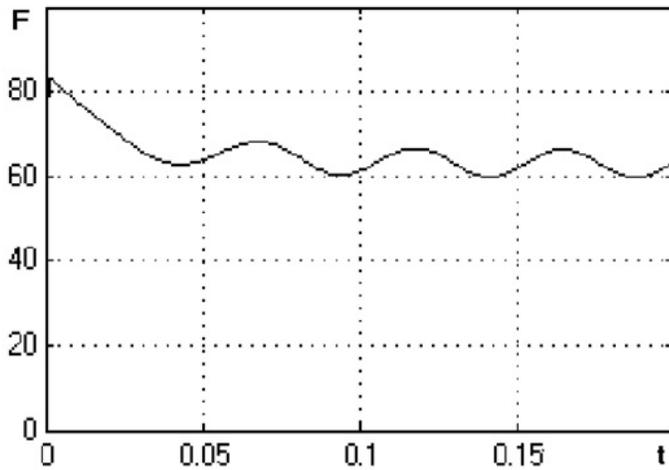


Рис. 4 – Осциллограмма пульсаций силы ЛБД

Fig. 4 – LBD Oscillations

Заключение

Найдены аналитические выражения для электромагнитной силы и ЭДС секции магнитоэлектрического двигателя с немагнитным якорем. Данные выражения можно положить в основу анализа различных схем соединения секций обмотки

якоря вентильных двигателей при различных законах коммутации и любом числе фаз. Проведен анализ линейного бесконтактного двигателя постоянного тока с трехфазной лучевой обмоткой при 120-градусном законе коммутации. Получены аналитические выражения для электромагнитной силы двигателя и ее пульсаций, обусловленных дискретной коммутацией якорной обмотки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Acarnley P.P., Watson J.F.** Review of position-sensorless operation of brushless permanent-magnet machines // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2006. – Vol. 53, iss. 2. – P. 352–362.
2. Электроприводы с магнитоэлектрическими двигателями – перспективные системы для электрического и гибридного транспорта / В.В. Панкратов, Е.А. Зима, Д.А. Котин, Е.С. Кучер // *Транспорт: наука, техника, управление*. – 2010. – № 8. – С. 10–14.
3. **Афанасьев В.В., Веселовский О.Н., Зибарев А.Ю.** Магнитное поле индукторов с постоянными магнитами без полюсных наконечников // *Известия вузов. Электромеханика*. – 1978. – № 3. – С. 248–253.
4. **Зечихин Б.С., Тимершин Ф.Г.** Исследование поля магнитоэлектрического генератора с индуктором без полюсных наконечников // *Известия АН СССР. Энергетика и транспорт*. – 1975. – № 1. – С. 81–87.
5. **Градштейн И.С., Рыжик И.М.** Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. – М.: Физматгиз, 1963. – 1108 с.
6. **Зибарев А.Ю.** Разработка и исследование линейного бесконтактного двигателя, питаемого от полупроводникового коммутатора: дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 1977. – 198 с.
7. **Сапсалева А.В.** Разработка и исследование силовых элементов электропривода поступательного перемещения роботов: дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 1979. – 218 с.

ELECTROMAGNETIC FORCE OF BLDC WITH NONMAGNETIC ARMATURE**Makarov D.V., Sapsalev A.V., Kharitonov S.A.***Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation*

Brushless DC electric motor are becoming more widely used in automatic control systems due to its high performance. It is promoted by progress in the development of power electronic components and in the implementation of highly efficient permanent magnets. The use of brushless DC electric engines with non-magnetic armature including linear extends the area of possible practical application of BLDC actuators in mechatronic systems. In this paper the ratios for the electromagnetic force calculation on the switching period in the section of the linear BLDC with a non-magnetic armature are obtained and general expression of the electromagnetic force at 120-degree switching law is determined. The estimation of the electromagnetic force ripple caused by discrete switching in the armature winding sections is performed.

Keywords: brushless DC electric motor, permanent magnets, magnetic field induction, Fourier series, electromagnetic force.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-4-84-93

REFERENCES

1. Acarnley P.P., Watson J.F. Review of position-sensorless operation of brushless permanent-magnet machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, iss. 2, pp. 352–362.
2. Pankratov V.V., Zima E.A., Kotin D.A., Kucher E.S. Elektroprivody s magnitoelektricheskimi dvigatelyami – perspektivnyye sistemy dlya elektricheskogo i gibridnogo transporta [Electrical drives with magnetolectric motor – advanced systems for electric and hybrid vehicles].

- Transport: nauka, tekhnika, upravlenie – Transport: science, technics, control*, 2010, no. 8, pp. 10–14.
3. Afanas'ev V.V., Veselovskii O.N., Zibarev A.Yu. Magnitnoe pole induktorov s postoyannymi magnitami bez polyusnykh nakonechnikov [The magnetic field of the permanent magnet inductors without pole pieces]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 1978, no. 3, pp. 248–253.
 4. Zechikhin B.S., Timershin F.G. Issledovanie polya magnitoelektricheskogo generatora s induktorom bez polyusnykh nakonechnikov [Study of the field of the magnetolectric generator with an inductor without pole pieces]. *Izvestiya Akademii nauk SSSR – Proceedings of Academy of Sciences. Power Engineering and Transport*, 1975, no. 1, pp. 81–87.
 5. Gradshteyn I.S., Ryzhik I.M. *Tablitsy integralov, summ, ryadov i proizvedenii* [Tables of integrals, series and products]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1963. 1108 p.
 6. Zibarev A.Yu. *Razrabotka i issledovanie lineinogo beskontaktnogo dvigatelya, pitaemogo ot poluprovodnikovogo kommutatora*. Diss. kand. tekhn. nauk [Development and research of non-contact linear the motor, powered by a semiconductor switch. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 1977. 198 p.
 7. Sapsalev A.V. *Razrabotka i issledovanie silovykh elementov elektroprivoda postupatel'nogo peremeshcheniya robotov*. Diss. kand. tekhn. nauk [Development and research of electric power components translational motion robots. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 1979. 218 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Макаров Денис Владимирович – родился в 1986 году, канд. техн. наук, доцент Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: силовая электроника, преобразователи электрической энергии, системы генерирования и накопления электрической энергии, активные силовые фильтры. Опубликовано 35 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: armature.current@gmail.com).

Makarov Denis Vladimirovich (b. 1986) – Candidate of Technical Sciences, associate prof., Novosibirsk state technical university. His research interests are currently focused on power electronics, power converters, power generation and accumulation systems, active power filters. He is author of 35 scientific papers. (Address: 20, Karl Marks av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Email: armature.current@gmail.com).



Сапсалева Анатолий Васильевич – родился в 1950 году, д-р техн. наук, профессор кафедры электроники и электротехники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: безредукторный электропривод и системы управления. Опубликовано более 120 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: sapsalevav@ngs.ru).

Sapsalev Anatoliy Vasilievich (b. 1950) – Doctor of Technical Sciences, prof., Novosibirsk state technical university. His research interests are currently focused on gearless electric drives and their control systems. He is author of more than 120 scientific papers. (Address: 20, Karl Marks av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Email: sapsalevav@ngs.ru).



Харитонов Сергей Александрович – родился в 1950 году, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой электроники и электротехники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: электромагнитные процессы в нелинейных электрических цепях с вентильными преобразователями электрической энергии. Опубликовано более 320 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: kharit1@ynadex.ru).

Kharitonov Sergey Alexandrovich (b. 1950) – Doctor of Technical Sciences, prof., head of Electronics and Electric engineering department, Novosibirsk state technical university. His research interests are currently focused on analysis of the electromagnetic process in the nonlinear electric circuits with semiconductor converters of the electric energy. He is author of more than 320 scientific papers. (Address: 20, Karl Marks av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Email: kharit1@ynadex.ru).

*Статья поступила 18 сентября 2015 г.
Received September 18, 2015*

To Reference:

Makarov D.V., Sapsalev A.V., Kharitonov S.A. Electromagnitnaya sila ventil'nogo dvigatelya s nemagnitnym yakorem [Electromagnetic force of BLDC with a nonmagnetic armature]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of science*, 2015, no. 4 (29), pp. 84–93.