

УДК 621.313.8

**А.Д. Петрушин<sup>1</sup>, А.В. Шевкунова<sup>1</sup>, Н.В. Шулаков<sup>2</sup>, С.В. Шутемов<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия<sup>2</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ТЯЖЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЛИНЕЙНОГО ВЕНТИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Рассмотрены теоретическое и экспериментальное исследования эффекта тяжения, возникающего в цилиндрическом линейном вентильном двигателе (ЦЛВД) между вторичным элементом и индуктором. Силовое усилие, создающее возвратно-поступательное движение вторичного элемента, является рабочим усилием цилиндрического линейного вентильного двигателя. Вторичный элемент создает силовое усилие по оси двигателя, а эффект тяжения заключается в поперечном притяжении вторичного элемента к индуктору. Силы механического трения вторичного элемента об индуктор возникают из-за наличия между ними эффекта тяжения. В результате эффекта тяжения вторичный элемент начинает касаться поверхности индуктора, что приводит к резкому возрастанию величины силы механического трения между ними. Как следствие, происходит резкое ослабление силового усилия, являющегося рабочим для ЦЛВД.

Рассмотрены две отличающиеся друг от друга конструкции индуктора цилиндрического линейного вентильного двигателя, проведено их сравнение по величине удельного силового усилия. Определены силы тяжения, трения и силового усилия между вторичным элементом и индуктором для двух этих различных конструкций. Усилие тяжения существует из-за смещения вторичного элемента цилиндрического линейного вентильного двигателя относительно оси индуктора, в результате чего магнитный зазор между индуктором и вторичным элементом становится неравномерным по величине. В экспериментальных исследованиях выяснили, что усилие тяжения, а значит, и механическое трение, значительно ослабляет рабочее силовое усилие ЦЛВД.

На основании экспериментальных результатов пришли к выводу, что необходимо изменить конструкцию индуктора ЦЛВД для снижения сил тяжения и механического трения. Изменение конструкции индуктора заключается в применении немагнитного промежуточного центратора, который вводится между двумя подшипниками скольжения, которые находятся с концов каждого модуля ЦЛВД. Кроме того, была изменена конструкция магнитопровода ЦЛВД, в которой вместо одного паза под трехфазную систему обмоток были сделаны три симметричных паза, каждый под свою фазу трехфазной обмотки. В результате магнитная система ЦЛВД стала осесимметричной. Все эти проведенные мероприятия изменения конструкции ЦЛВД позволили резко уменьшить эффект тяжения, а значит, и величину механического трения, в результате чего значительно возросло удельное силовое усилие.

**Ключевые слова:** цилиндрический линейный вентильный двигатель, постоянные магниты, магнитный зазор, вторичный элемент, индуктор, усилие тяжения, магнитная система, привод.

**A.D. Petrushin<sup>1</sup>, A.V. Shevkunova<sup>1</sup>, N.V. Shulakov<sup>2</sup>, S.V. Shutemov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation

<sup>2</sup>Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## **INVESTIGATION OF THE TRACTION EFFECT OF A CYLINDRICAL LINEAR VALVE ELECTRIC MOTORS**

The theoretical and experimental investigation of the traction effect occurring in a cylindrical linear valve motor (CLEM) between a secondary element and an inductor is considered in the article. The force acting to reciprocate the secondary element is the operating force of the cylindrical linear valve motor. The secondary element creates a force force along the axis of the motor, and the traction effect consists in the transverse attraction of the secondary element to the inductor. The forces of mechanical friction of the secondary element about the inductor arise because of the presence of a traction effect between them. As a result of the traction effect, the secondary element begins to touch the surface of the inductor, which leads to a sharp increase in the magnitude of the mechanical friction force between them. As a consequence, there is a sharp weakening of the force effort, which is a worker for the CLEM.

Two different designs of the inductor of a cylindrical linear valve motor are considered in the article, their comparison is compared with the magnitude of the specific force. The forces of traction, friction, and force between the secondary element and the inductor are determined for these two different structures. The traction force is due to the displacement of the secondary element of the cylindrical linear valve motor relative to the axis of the inductor, as a result of which the magnetic gap between the inductor and the secondary element becomes uneven in magnitude. In experimental studies, it was found that the tensile force, and hence the mechanical friction, significantly weakens the working force of the CLEM.

On the basis of experimental results, we came to the conclusion that it is necessary to change the design of the inducer of CLEM to reduce the traction and mechanical friction forces. The change in the design of the inductor is the use of a non-magnetic intermediate centralizer, which is inserted between two sliding bearings that are located at the ends of each module of the CLEM. In addition, the design of the magnetic flux tube of the high-voltage tube was changed, in which instead of one slot for a three-phase system of windings, three symmetrical grooves were made, each under its phase of a three-phase winding. As a result, the magnetic system of the CLEM became axisymmetric. All these measures taken to change the design of the CLEM have made it possible to sharply reduce the effect of traction, and hence the magnitude of mechanical friction, resulting in a significant increase in the specific force.

**Keywords:** cylindrical linear valve engine, permanent magnets, magnetic gap, secondary element, inductor, pulling force, magnetic system, drive.

**Введение.** Для электроприводов возвратно-поступательного движения различных промышленных механизмов рационально применять цилиндрический линейный вентильный двигатель (ЦЛВД). В нефтедобывающей промышленности ЦЛВД можно использовать для бесштанговой добычи нефти из скважин погружными агрегатами, которые могут служить в качестве альтернативы станкам-качалкам, широко распространенным в настоящее время [1, 2].

Принцип действия ЦЛВД, основанный на создании электромагнитных сил и движении электромагнитного поля, соответствует вентильным электрическим машинам вращательного движения, отличие

заключается лишь в том, что магнитное поле перемещается линейно. На вторичном элементе ЦЛВД находятся постоянные магниты, так что основные конструктивные особенности машины соответствуют вентильным двигателям [3, 4].

При проектировании ЦЛВД основное внимание пришлось уделить увеличению удельного силового усилия, которое двигает вторичный элемент. Для реализации этой задачи проводился расчетный поиск рациональной конструкции вторичного элемента и индуктора, при котором создается максимальное силовое усилие. В результате математических исследований были проведены многовариантные расчеты множества кривых статических угловых характеристик для различных конструкций ЦЛВД. В результате была выбрана конструкция, дающая наибольшее силовое усилие [5, 6].

Работа ЦЛВД осложнена существованием эффекта тяжения, который возникает при смещении вторичного элемента относительно оси индуктора [7]. В результате силы трения между вторичным элементом и индуктором значительно увеличиваются. Это связано с тем, что вторичный элемент и индуктор начинают соприкасаться, что приводит к уменьшению силового усилия на вторичном элементе. Кроме того, возникнет сильный износ поверхностей индуктора и вторичного элемента. Поэтому расчет усилий тяжения и реализация методов по его устранению являются важной задачей для получения необходимых характеристик ЦЛВД.

**Взаимодействие между индуктором и вторичным элементом ЦЛВД.** На рис 1, а показан ЦЛВД, который состоит из 3 частей.

Постоянные магниты имеют следующие технические характеристики:  $H_c = 1400$  кА/м,  $B = 1,2$  Тл. Индуктор состоит из чашек, составляющих зубцы и пазы, в которых находятся катушки трехфазного индуктора. Полюсное деление двигателя составляет  $\tau = 30$  мм, а величина зубцового деления  $t_z = 10$  мм.

Катушки каждой фазы трехфазной обмотки соединяются последовательно на протяжении длины индуктора. Фазы питаются от подключенного преобразователя частоты (ПЧ). Обмотки фаз цилиндрического индуктора создают линейное бегущее магнитное поле, направление и скорость движения которого изменяются при помощи ПЧ [8, 9]. Вторичный элемент имеет диаметр  $D_p = 53$  мм. Между вторичным элементом и индуктором существует воздушный зазор  $\delta$ , который

составляет 1,5 мм. Вторичный элемент расположен симметрично относительно оси индуктора, т.е. их оси совмещены. При таком взаимном расположении осей вторичного элемента и индуктора усилие тяжения между ними равно нулю.

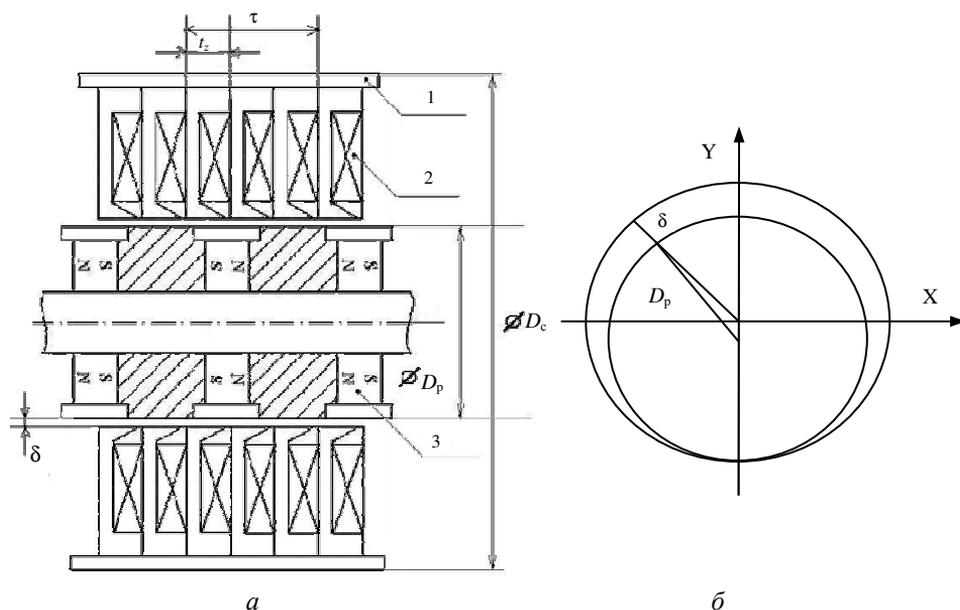


Рис. 1. ЦЛВД в продольном (а) и поперечном (б) сечении: 1 – корпус, в виде трубы; 2 – цилиндрический индуктор, состоящий из ферромагнитных чашек с уложенными в них фазами трехфазной обмотки; 3 – вторичный элемент, содержащий постоянные магниты и совершающий возвратно-поступательное движение

При смещении оси вторичного элемента относительно оси индуктора воздушный зазор по образующей диаметра становится неравномерным, что приводит к появлению усилий тяжения, направленных к поверхности индуктора с наименьшим зазором [10–12]. Вторичный элемент в результате изгибается под действием возникающих усилий тяжения, что, как следствие, приводит к еще большей неравномерности рабочего воздушного зазора. В результате возникновения радиальных усилий тяжения неравномерность рабочего воздушного зазора увеличивается так, что зазор с одной стороны в пределе становится равен нулю, а с противоположной стороны становится максимальным (рис.1, б). Соответственно силы трения между вторичным элементом и индуктором значительно возрастают, что обусловлено их взаимным касанием, это приводит к уменьшению силового усилия и возникновению значительного износа поверхностей вторичного элемента и индуктора.

Для определения сил трения, действующих при соприкосновении вторичного элемента с индуктором, необходимо рассчитать эффект тяжения, возникающий в магнитной системе [13–15]. Рассчитаем эффект тяжения, для чего проведем разбивку диаметра вторичного элемента и индуктора на 12 секторов в соответствии с рис. 2.

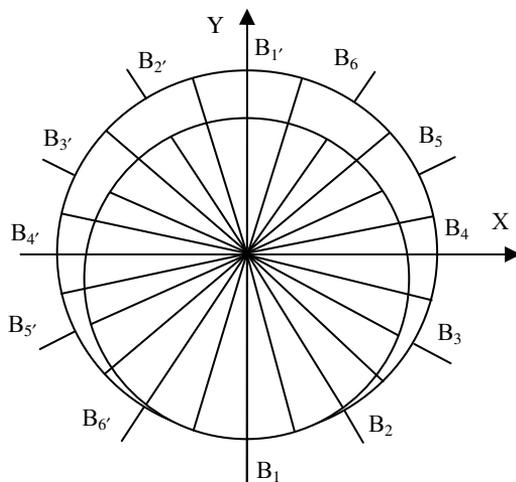


Рис. 2. Разбивка диаметра магнитной системы ЦЛВД на сектора

Угол  $n$  отсчитывается от оси  $Y$  и разбивается на 6 угловых значений: 0, 30, 60, 90, 120, 150 град, которые определяют сектора разбивки индуктора. Согласно уравнению Максвелла сила притяжения между индуктором и вторичным элементом в зазоре зависит от величины магнитной индукции в каждом секторе по окружности диаметра индуктора:

$$F_{Bn} = \frac{B_c \cdot B_c \cdot S}{2\mu_0}, \quad (1)$$

где  $S$  – площадь каждого сектора,  $S = \pi r^2 \cdot \alpha = 13,4 \cdot 10^{-3}$ .

Силы, действующие в каждом секторе, направлены в разные стороны, поэтому в соответствии с системой уравнений результирующие силы по секторам определяется по формулам:

$$\begin{aligned} F_{C1} &= F_{B1} - F_{B1'}; & F_{C2} &= F_{B2} - F_{B2'}; \\ F_{C3} &= F_{B3} - F_{B3'}; & F_{C4} &= F_{B4} - F_{B4'}; \\ F_{C5} &= F_{B5} - F_{B5'}; & F_{C6} &= F_{B6} - F_{B6'}; \end{aligned} \quad (2)$$

Составляющая усилия секции  $F_{Cn}$  по оси  $F_{Yn}$  равна:

$$F_{Yn} = F_{Cn} \cdot \cos(\alpha). \quad (3)$$

В результате находим силу тяжения  $F_m$  ЦЛВД, возникающую по оси  $Y$ , в соответствии с уравнением

$$F_m = \sum_1^n F_{Yn}. \quad (4)$$

#### Расчет величины сил тяжения ЦЛВД

Оси сектора	Индукция на концах осей, В <sub>с</sub> , Тл		Угол оси $\alpha$ , градус	Силы на концах осей, Н		Результат силы по осям, $F_{Cn}$ , Н	Результат силы по оси $Y$ , $F_{Yn}$ , Н
	$n$	$n'$		$F_{Bn}$	$F_{Bn'}$		
В <sub>1</sub> -В <sub>1'</sub>	0,836	0,615	0	3730	2017	1712,4	1712,4
В <sub>2</sub> -В <sub>2'</sub>	0,794	0,628	30	3362	2175	1187	1057,5
В <sub>3</sub> -В <sub>3'</sub>	0,756	0,660	60	3048	2323	725	426
В <sub>4</sub> -В <sub>4'</sub>	0,710	0,710	90	2020	2020	0	0
В <sub>5</sub> -В <sub>5'</sub>	0,660	0,756	120	2323	3048	725	426
В <sub>6</sub> -В <sub>6'</sub>	0,628	0,794	150	2175	3362	1187	1057,5
Итого						$F_T$ , Н	4679,4 Н

Значения величин сил тяжения вторичного элемента ЦЛВД по секторам сведем в таблицу. В результате проведенных магнитных расчетов получили значение усилия тяжения по оси  $Y$  и выяснили, что его необходимо учитывать для определения сил трения, так как оно значительно по величине. Расчеты показали, что величина силы тяжения равна 4,7 кН, из чего можно определить величину силы трения вторичного элемента об индуктор. Такое значительное по величине тяжение приводит к прогибу вторичного элемента, которое превышает величину воздушного зазора [16]. В результате появляются значительные силы трения, падает силовое усилие на вторичном элементе. Первая экспериментальная конструкция индуктора, представленная на рис. 3, не дала необходимого по техническому заданию силового усилия в 4 кН. Усилие, показанное двигателем на экспериментальном стенде, оказалось равным по величине 3 кН.

**Модернизация ЦЛВД для устранения эффекта тяжения и повышения силового усилия.** Несимметрия величины зазора между вторичным элементом и индуктором является только одной из причин, которая приводит к появлению усилий тяжения. Также к значительному увеличению эффекта тяжения может приводить и возникающая

магнитная несимметрия конструкции индуктора (рис. 3). Этот факт связан с возникновением асимметрии радиального магнитного потока между вторичным элементом и индуктором в связи с наличием только одного паза под прокладку трехфазных соединительных обмоток [17–19].



Рис. 3. Вариант индуктора с одним пазом под трехфазную обмотку

В результате возникает асимметрия радиального магнитного потока между вторичным элементом и индуктором, вследствие чего появляется дополнительная сила тяжения. Асимметрия радиального магнитного потока приводит к тому, что вторичный элемент притягивается к индуктору, что создает дополнительное механическое трение, уменьшающее силовое усилие. Для устранения этого вредного явления в модуле ЦЛВД был добавлен дополнительный промежуточный центратор для уменьшения величины возникающего трения и центрирования вторичного элемента относительно оси индуктора. Диаметр центратора выбирается из условия:  $D_{ц} < (D_p + 2\delta)$  и  $D_p < D_{ц}$ , чтобы при работе ЦЛВД зазор между вторичным элементом и индуктором ограничивался центратором.

Также была изменена на осесимметричную конструкция индуктора для значительного ослабления эффекта тяжения. Изменению подверглась конструкция канала индуктора для размещения концов трехфазной обмотки. Вместо одного канала для всех трех фаз изготовили три отдельных канала, по одному для каждой фазы, с пространственным смещением в 120 град в соответствии с рис. 4. Такое изменение

конструкции приводит к более равномерному распределению радиального магнитного потока [20]. Это конструктивное изменение ведет к устранению асимметрии магнитного потока, что уменьшает величину эффекта тяжения. Применение осесимметричной конструкции индуктора позволило достичь значительного роста силового усилия за счет уменьшения величины сил тяжения и, как следствие, сил трения. Такое изменение конструкции необходимо для более равномерного распределения радиального магнитного поля. Изменение конструкции индуктора ЦЛВД на осесимметричную позволило достичь роста силового усилия вторичного элемента на 1 кН.



Рис. 4. Вариант индуктора с тремя симметричными пазами, каждый под свою фазу

При определении силового усилия на вторичном элементе ЦЛВД следует учесть, что оно является разностью электромагнитной силы, создаваемой индуктором, и сил трения вторичного элемента в подшипниках скольжения. Зависимость силового усилия, которое равно разности электромагнитного усилия и силы трения, можно определить по уравнению:

$$F_C = F_{\text{Э}} - F_{\text{тр}} \quad (5)$$

На рис. 5 приведены данные экспериментально измеренных силовых усилий на вторичном элементе в зависимости от тока двигателя для двух вариантов конструкции индуктора ЦЛВД,  $F$  (см. рис. 3) и  $F'$  (см. рис. 4). Разница измеренных силовых усилий для двух конструкций

индукторов ЦЛВД составляет 1 кН при токе 30 А. При этом необходимо учесть, что существенная разница усилий  $F$  и  $F'$  возникает только при токах, составляющих более 16 А.

В соответствии с техническим заданием заказчика длина ЦЛВД, состоящего из 8 модулей, не должна превышать 12 м. Такое техническое ограничение связано с необходимостью использовать стандартное крановое оборудование на нефтяных промыслах. В соответствии с этим требованием важной задачей является повышение величины силового усилия, что позволяет уменьшить длину двигателя. Уменьшение величины эффекта тяжения за счет введения дополнительного промежуточного центратора и применения осесимметричной конструкции индуктора дало возможность увеличить силовое усилие. Экспериментальное исследование, связанное с проблемой тяжения, позволило решить ряд важных теоретических и практических проблем, выработать решения по устранению этого вредного эффекта за счет изменения конструкции ЦЛВД. В результате удалось достичь силовых усилий, предусмотренных техническим заданием.

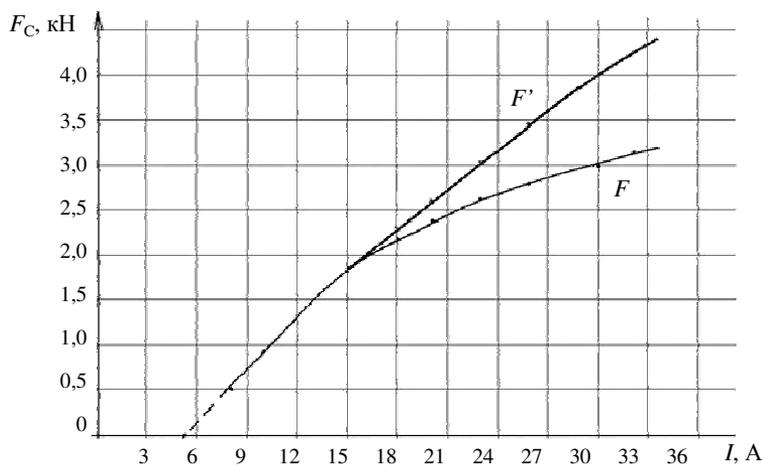


Рис. 5. Силовое усилие на вторичном элементе для двух конструкций:  $F$  (см. рис. 3) и  $F'$  (см. рис. 4)

**Выводы.** В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований эффекта тяжения выяснили степень его влияния на работу ЦЛВД. Полученные значения сил тяжения и силового усилия для двух рассмотренных конструкций ЦЛВД позволили определить силы трения между вторичным элементом и индуктором.

Выяснили, что при работе ЦЛВД величина силы трения между вторичным элементом и индуктором значительна, и ее необходимо учитывать. На основе анализа измеренных и вычисленных сил тяжения и трения был сделан вывод о необходимости использовать немагнитный центратор, который позволяет снизить величину сил трения. Это способствует центрированию вторичного элемента относительно индуктора, что устраняет их касание. Для устранения вредного эффекта тяжения также была изменена конструкция индуктора. Изменению подверглась конструкция пазов индуктора, в которой для размещения проводников трехфазной обмотки сделали три паза. В результате конструкция индуктора стала осесимметричной. Такое изменение конструкции необходимо для более равномерного распределения радиального магнитного поля. Изменение конструкции индуктора ЦЛВД на осесимметричную позволило достичь роста силового усилия вторичного элемента на 1 кН. Все эти мероприятия позволили реализовать условия технического задания заказчика.

### **Библиографический список**

1. Ключников А.Т., Коротаев А.Д., Шутемов С.В. Моделирование цилиндрического линейного вентильного двигателя // *Электротехника*. – 2013. – № 11. – С. 14–17.
2. Богданов А.А. Погружные центробежные электронасосы для добычи нефти. – М.: Недра, 1986. – 272 с.
3. Ледовский А.Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 168 с.
4. Овчинников И.Е., Адволоткин Н.П. Закономерности проектирования вентильных двигателей с постоянными магнитами для станков с ЧПУ и других механизмов // *Электротехника*. – 1988. – № 7. – С. 59–65.
5. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины. – М.: Высшая школа, 1990. – 416 с.
6. Шулаков Н.В., Шутемов С.В. Метод расчета электромагнитных процессов в цилиндрическом линейном вентильном двигателе // *Электротехника*. – 2014. – № 11. – С. 18–22.
7. Шимчак И.В. Инновационные конструкции магнитных систем синхронных машин с постоянными магнитами // *Электричество*. – 2009. – № 9. – С. 37–44.

8. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным управлением. – М.: Академия, 2006. – 272 с.
9. Крючков В.В., Малышков Г.М., Соловьев И.Н. Кодовое широтно-импульсное регулирование для инверторов // Практическая силовая электроника. – 2001. – № 1.
10. Ганджа С.А., Мартьянов А.С. Методика инженерного расчета вентиляльных машин с аксиальным потоком // Вестник Южно-Урал. гос. ун-та. Сер. Энергетика. – 2013. – Т. 13. – № 2. – С. 85–87.
11. Бинс К., Лауренсон П. Анализ и расчет электрических и магнитных полей. – М.: Энергия, 1970. – 376 с.
12. Рисованый С.В., Финкельштейн В.Б. Проектирование вентиляльных реактивных двигателей: монография. – Харьков: ХНУГХ, 2014. – 245 с.
13. Samia M. Mahmoud, Mohsen Z. El-Sherif, Emad S. Abdel-Aliem. Studying different types of power converters fed switched reluctance motor // International Journal of Electronics and Electrical Engineering. – 2013. – Vol. 1. – № 4.
14. Cunningham J.D. Switched reluctance motor drive circuit evaluation criteria for vehicle efficiency and responsiveness: Ph.D. Thesis. – The University of Texas at Austin, 2011. – 234 p.
15. Мирзин А.М., Коротаев А.Д., Шутемов С.В. Усилие тяжения цилиндрического линейного вентиляльного двигателя с постоянными магнитами между статором и вторичным элементом // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. – URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=11637>
16. Кузнецов В.А. Кузмичев В.А. Вентильно-индукторные двигатели. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 70 с.
17. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink. – 1-е изд. – М.: ДМК-Пресс, 2007. – 288 с.
18. Le-Huy H., Brunelle P. Design and Implementation of a Switched Reluctance Motor Generic Model for Simulink SimPowerSystems // Conference: Industrial Electronics, 2005.
19. Miller T.J.E. Switched Reluctance motor and their Control. – Magna Physics Publishing and Clarendon Oxford Press, 1993. – 203 p.
20. Зечихин Б.С., Журавлев С.В., Ситин Д.А. Расчетные коэффициенты синхронных машин с редкоземельными магнитами // Электричество. – 2009. – № 3. – С. 35–40.

## Reference

1. Kliuchnikov A.T., korotaev. A.d., Shutemov S.V. Modelirovanie tsilindricheskogo lineinogo ventil'nogo dvigatel'ia [Simulation of a cylindrical linear motor valve]. *Elektrotekhnika*, 2013, no. 11, pp. 14-17.

2. Bogdanov A.A. Pogruzhnye tsentrobezhnye elektronasosy dlia dobychi nefi [Submersible centrifugal pumps for oil production]. Moscow: Nedra, 1986. 272 p.

3. Ledovskii A.N. Elektricheskie mashiny s vysokokoertsitivnymi postoiannymi magnitami [Electric machines with high-coercivity permanent magnets]. Moscow: Energoatomizdat, 1985. 168 p.

4. Ovchinnikov I.E., Advolotkin N.P. Zakonomernosti proektirovaniia ventil'nykh dvigatelei s postoiannymi magnitami dlia stankov s CHPU i drugikh mekhanizmov [Patterns of design brushless motors with permanent magnets for CNC machine tools and other mehanizmov]. *Elektrotekhnika*, 1988, no. 7, pp. 59-65.

5. But D.A. Beskontaktnye elektricheskie mashiny [Non-contact electrical machines]. Moscow: Vysshiaia shkola, 1990. 416 p.

6. Shulakov N.V., Shutemov S.V. Metod rascheta elektromagnitnykh protsessov v tsilindricheskom lineinom ventil'nom dvigatele [The method of calculation of electromagnetic processes in a cylindrical linear brushless motors]. *Elektrotekhnika*, 2014, no. 11, pp. 18-22.

7. Shimchak I.V. Innovatsionnye konstruksii magnitnykh sistem sinkhronnykh mashin s postoiannymi magnitami [Innovative designs of magnetic systems of synchronous machines with permanent magnets]. *Elektrichestvo*, 2009, no. 9, pp. 37-44.

8. Sokolovskii G.G. Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym upravleniem [Electric drives of alternating current with frequency management]. Moscow: Akademiia, 2006. 272 p.

9. Kriuchkov V.V., Malyshkov G.M., Solov'ev I.N. Kodovoe shirotno-impul'snoe regulirovanie dlia invertorov [Code pulse-width regulation for inverters]. *Prakticheskaiia silovaia elektronika*, 2001, no. 1.

10. Gandzha S.A., Mart'ianov A.S. Metodika inzhenerenogo rascheta ventil'nykh mashin s aksial'nym potokom [Technique of engineering calculation of gate machines with axial flow]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Energetika*, 2013, vol. 13, no. 2, pp. 85-87.

11. Bins K., Laurenson P. Analiz i raschet elektricheskikh i magnitnykh polei [Analysis and calculation of electric and magnetic fields]. Moscow: Energiia, 1970. 376 p.

12. Risovanyi S.V., Finkel'shtein V.B. Proektirovanie ventil'nykh reaktivnykh dvigatelei: monografiia [Design of switched jet engines: monograph]. Khar'kov: Khar'kovskii natsional'nyi universitet gorodskogo khoziaistva imeni. A.M. Beketova, 2014. 245 p.

13. Samia M. Mahmoud, Mohsen Z. El-Sherif, Emad S. Abdel-Aliem. Studying different types of power converters fed switched reluctance motor. *International Journal of Electronics and Electrical Engineering*, 2013, vol. 1, no. 4.

14. Cunningham J.D. Switched reluctance motor drive circuit evaluation criteria for vehicle efficiency and responsiveness: Ph.D. Thesis. The University of Texas at Austin, 2011. 234 p.

15. Mirzin A.M., korotaev. A.D., Shutemov S.V. Usilie tiazheniia tsilindricheskogo lineinogo ventil'nogo dvigatel'ia s postoiannymi magnitami mezhdu statorom i vtorychnym elementom [The force pulling the valve cylindrical linear motor with permanent magnets between the stator and the secondary element]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia*, 2013, no. 6, available at: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=11637>

16. Kuznetsov V.A. Kuzmichev V.A. Ventil'no-induktornye dvigateli [Switched-reluctance motors]. Moscow: Moskovskii energeticheskii institut, 2003. 70 p.

17. Chernykh I.V. Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MatLab, SimPowerSystems i Simulink [Modeling of electrical devices in MatLab, SimPowerSystems and Simulink]. 1nd ed. Moscow: DMK-Press, 2007. 288 p.

18. Le-Huy H., Brunelle P. Design and Implementation of a Switched Reluctance Motor Generic Model for Simulink SimPowerSystems. *Conference: Industrial Electronics*, 2005.

19. Miller T.J.E. Switched Reluctance motor and their Control. Magna Physics Publishing and Clarendon Oxford Press, 1993. 203 p.

20. Zechikhin B.S., Zhuravlev S.V., Sitin D.A. Raschetnye koeffitsienty sinkhronnykh mashin s redkozemel'nymi magnitami [Calculating coefficients of synchronous machines with rare earth magnets]. *Elektrichestvo*, 2009, no. 3, pp. 35-40.

### **Сведения об авторах**

**Петрушин Александр Дмитриевич** (Ростов-на-Дону, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрический подвижный состав» Ростовского государственного университета

пути сообщения (344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2, e-mail: alex331685@yandex.ru).

**Шевкунова Анастасия Владимировна** (Ростов-на-Дону, Россия) – специалист по подготовке кадров высшей квалификации отдела докторантуры и аспирантуры Ростовского государственного университета путей сообщения (344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2, e-mail: nastya3051990@mail.ru).

**Шулаков Николай Васильевич** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: shulakov@pstu.ru).

**Шутемов Сергей Владимирович** (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: shutemsv@yandex.ru).

#### **About the authors**

**Petrushin Alexander Dmitrievich** (Rostov-on-Don, Russian Federation) is a Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the department Electric rolling stock, Rostov State Transport University (344038, Rostov-on-Don, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., 2, e-mail: alex331685@yandex.ru).

**Shevkunova Anastasiya Vladimirovna** (Rostov-on-Don, Russian Federation) is a Specialist in training highly qualified specialists of the doctoral and postgraduate department Rostov State Transport University (344038, Rostov-on-Don, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., 2, e-mail: nastya3051990@mail.ru).

**Shulakov Nikolay Vasilyevich** (Perm, Russian Federation) is a Doctor of Technical Sciences, Professor of Electrical Engineering and Electromechanics Department of Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: shulakov@pstu.ru).

**Shutemov Sergey Vladimirovich** (Perm, Russian Federation) is a Senior Lecturer Electrical Engineering and Electromechanics Department Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: shutemsv@yandex.ru).

Получено 08.10.2018