

DOI: 10.15593/2224-9397/2021.4.06

УДК 621.313.17:621.924

Е.А. Чабанов, А.Д. КоротаевПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

КОНСТРУКЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЛИНЕЙНОГО ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ШЛИФОВАЛЬНОГО СТАНКА

Рассмотрено поэтапное конструирование цилиндрического линейного вентильного электродвигателя, который может быть использован в качестве электропривода для исполнительного механизма прямого нанесения материалов. В шлифовальном станке линейный двигатель может быть использован для организации возвратно-поступательного движения, обеспечивающего перемещение план-шайбы. Конструкция цилиндрического линейного вентильного двигателя с постоянными магнитами согласно предварительным проектно-конструкторским расчетам имеет ряд особенностей, которые в процессе производства необходимо обязательно учитывать. **Цель исследования:** разработка технологического процесса производства цилиндрического линейного вентильного двигателя, учитывающего особенности его нестандартной конструкции. **Методы:** в статье в виде алгоритма, состоящего из последовательности операций, представлены этапы производственного цикла цилиндрического линейного вентильного двигателя. **Результаты:** представленный в статье технологический процесс учитывает рекомендации по выбору материала и особенности формирования конечного изделия на каждом конкретном его этапе. Разработанная конструкция электрической машины была реализована в виде опытного образца, для исследования которого также создан экспериментальный испытательный стенд в различных вариантах комплектации. На этом стенде проводились исследования цилиндрического линейного вентильного двигателя на предмет определения тягового усилия с целью подтверждения верности проектно-конструкторских расчетов. Приведены результаты испытаний, подтверждающие высокую степень сходимости расчетных и экспериментальных значений тягового усилия спроектированного цилиндрического линейного вентильного электродвигателя. **Практическая значимость:** полученные результаты подтверждают возможность создания цилиндрического линейного вентильного двигателя малой мощности для организации возвратно-поступательного движения, обеспечивающего перемещение план-шайбы шлифовального станка.

Ключевые слова: цилиндрический линейный вентильный электродвигатель, технология изготовления, испытательный стенд, тяговое усилие.

E.A. Chabanov, A.D. Korotaev

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

DESIGN AND MANUFACTURING TECHNOLOGY OF A CYLINDRICAL LINEAR VALVE MOTOR WITH PERMANENT MAGNETS FOR AN ELECTRIC DRIVE OF A GRINDING MACHINE

The article discusses the step-by-step design of a cylindrical linear valve motor, which can be used as an electric drive for an actuator for direct application of materials. In a grinding machine, a linear motor can be used to organize a reciprocating motion, ensuring the movement of the washer. According to preliminary design calculations, the design of a cylindrical linear valve motor with permanent magnets has a number of features that must be taken into account during the production process. **Purpose of the research:** development of a technological process for the production of a cylindrical linear valve motor, taking into account the features of its non-standard design. **Methods:** the article presents the stages of the production cycle of a cylindrical linear valve motor in the form of an algorithm consisting of a sequence of operations. **Results:** the technological process presented in the article takes into account the recommendations for the choice of material and the features of the formation of the final product at each specific stage. The developed design of the electric machine was implemented in the form of a prototype, for the study of which an experimental test bench was also created in various configuration options. At this stand, research was carried out on a cylindrical linear valve motor for determining the tractive effort in order to confirm the accuracy of design calculations. The test results are presented, confirming a high degree of convergence of the calculated and experimental values of the traction force of the designed cylindrical linear valve electric motor. **Practical significance:** the results obtained confirm the possibility of creating a cylindrical linear valve motor of low power for organizing a reciprocating motion, which ensures the movement of the planer washer of a grinding machine.

Keywords: cylindrical linear valve motor, manufacturing technology, test bench, traction force.

Введение

В большинстве машин поступательного и возвратно-поступательного движения перемещение исполнительных органов создается обычными электродвигателями вращательного действия. В настоящее время для этих целей используется почти 50 % выпускаемых асинхронных электродвигателей [1–3].

Для преобразования вращательного движения двигателя в поступательное перемещение исполнительного органа применяются дополнительные механические вспомогательные устройства (редуктор, шестерня-рейка, винт-гайка, гидро- или колесная передача и др.). При этом усложняется конструкция машины, увеличиваются их вес и стоимость, снижаются надежность и общий коэффициент полезного действия.

Отмеченные недостатки во многих случаях можно устранить, заменив приводной электродвигатель вращательного движения линей-

ным двигателем. Достоинствами этого типа двигателей являются: отсутствие сложных механических передач между двигателем и исполнительным механизмом, отсутствие механических контактов между двигателем и исполнительным органом, простота конструкции, надежность в работе [4–6].

Особенности конструирования цилиндрического линейного вентильного двигателя с постоянными магнитами

Линейные двигатели преобразуют электрическую энергию, потребляемую из сети, непосредственно в поступательное движение исполнительного органа без всяких промежуточных механических устройств [7–9]. Характерной особенностью линейных двигателей является разомкнутость индуктора и вторичного элемента (ротора), что приводит к появлению продольного краевого эффекта, который проявляется в неравномерном распределении поля по длине воздушного зазора двигателя и его выпучивания за пределы индуктора [10, 11]. К вариантам конструкций линейных двигателей можно отнести цилиндрический линейный асинхронный электродвигатель (ЦЛАД) [2, 11–14] и цилиндрический линейный вентильный электродвигатель с постоянными магнитами (ЦЛВД) [15–18].

ЦЛВД состоит из неподвижного цилиндрического индуктора, штока с постоянными магнитами и ферромагнитными полюсами [19]. На индукторе имеются зубцы и пазы, в которых находятся цилиндрические катушки, образующие трехфазную обмотку [20]. Продольный разрез индуктора и вторичного элемента представлен на рис. 1, согласно которому принципиальная конструкция ЦЛВД состоит из статора (неподвижная часть), включающего цилиндрический корпус 1 – полый цилиндр, индуктора 2, вмонтированного в корпус и состоящего из немагнитных чашек; катушки, уложенные в чашки и образующие единую трехфазную обмотку 3, а также ротора (вторичный элемент, исполнительный орган, подвижная часть), который включает немагнитный шток 4, закрепляемый к корпусу с помощью подшипников скольжения, постоянные магниты с аксиальным намагничиванием 5, которые крепятся неподвижно на штоке, полюса 6.

Трехфазная обмотка индуктора создает на внутренней поверхности индуктора одну волну магнитной индукции, бегущую вдоль оси корпуса двигателя [21].

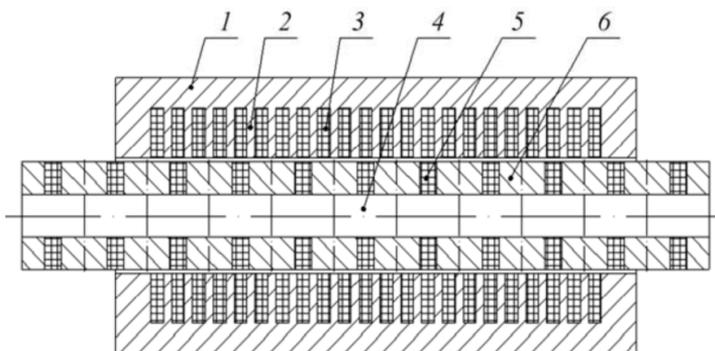


Рис. 1. Продольный разрез индуктора и вторичного элемента ЦЛВД

ЦЛВД можно использовать для электроприводов возвратно-поступательного движения различных общепромышленных механизмов и, в частности, в составе шлифовального станка вместо асинхронных двигателей вращательного движения со сложной кинематической схемой [22, 23]. ЦЛВД осуществляет непосредственное перемещение план-шайбы шлифовального станка в пределах $\Delta x = 0 \dots 28$ мм. Усилие прижима шлифовальной головки к поверхности план-шайбы составляет 392 Н. Усилие перемещения план-шайбы определяется как

$$F = F_n \cdot k_{\text{тр}} = 392 \cdot 0,55 = 215,6 \text{ Н},$$

где $k_{\text{тр}}$ – коэффициент трения при шлифовании, $k_{\text{тр}} = 0,55$.

Исследования подтвердили, что для выполнения шлифовальным станком возложенной функции (обработка поверхности деталей) при заданных параметрах (прижимное усилие, расстояние и усилие перемещения план-шайбы) наиболее целесообразно использовать из всех возможных конструкций линейных двигателей именно ЦЛВД. На основе произведенных расчетов были определены геометрия экспериментального модуля ЦЛВД и параметры трехфазной обмотки индуктора [24–26]. Выполнен эскизный проект модуля, согласно которому проводились работы по его изготовлению [27, 28]. Магниты вторичного элемента в соответствии с расчетом, производимым в связи с рационализацией конструкции линейного двигателя, применялись из материала «неодим-железо-бор» производства «ПОЗ-Прогресс» (Российская Федерация, Свердловская область, город Верхняя Пышма) [4].

При производстве модуля линейного двигателя корпус изготавливался из металлической трубы, внутренняя поверхность которой обраба-

тывалась по классу Н8. Чашки магнитопровода цилиндрического индуктора производились из стали Ст45. По внешней кромке чашек фрезеровались вырезы для выводов обмоток, укладываемых в них (рис. 2–5).

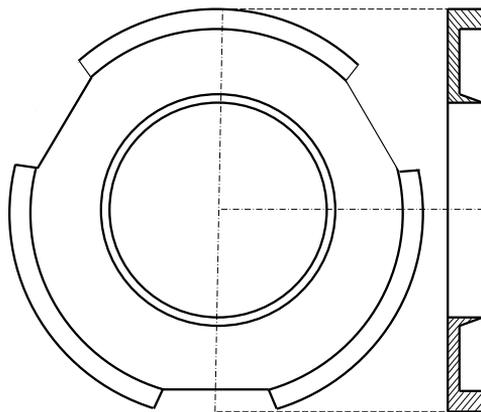


Рис. 2. Чашка индуктора

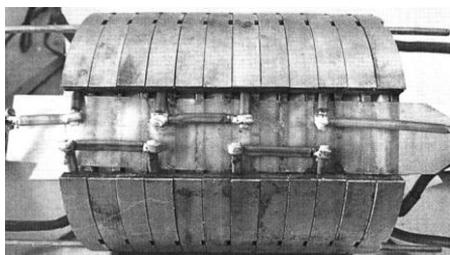


Рис. 3. Выводы фазы А обмотки индуктора

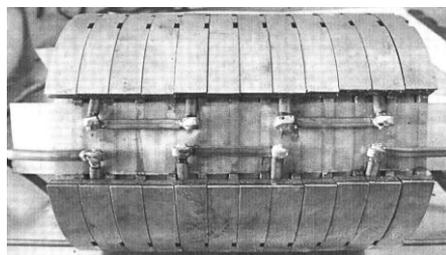


Рис. 4. Выводы фазы В обмотки индуктора

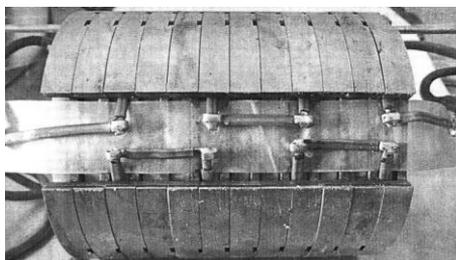


Рис. 5. Выводы фазы С обмотки индуктора



Рис. 6. Полюса и промежуточные кольца вторичного элемента

Согласно проведенному расчету конструкции ЦЛВД магнитопровод индуктора состоит из 12 чашек, каждая высотой 10 мм, диаметром 105 мм (см. рис. 3–5). Внутри каждой чашки размещаются кольце-

вые обмотки, концы которых выводятся через боковые вырезы чашки. На рис. 3 показаны выводы катушек фазы А; на рис. 4 – фазы В; на рис. 5 – фазы С. В пределах каждого выреза колец катушки соединяются между собой перемычками и образуют фазные обмотки А, В, С.

Подвижная часть двигателя (вторичный элемент) состоит из немагнитного штока, на который насаживаются полюса из стали. Внутри полюса размещаются кольцевые магниты с аксиальным намагничиванием, а сами полюса соединяются с помощью промежуточных немагнитных колец, изготовляемых из нержавеющей стали. На рис. 6 показаны немагнитные промежуточные кольца и полюса. На рис. 7 представлена секция ротора в сборе без магнитов, а на рис. 8 показан вторичный элемент с магнитами в сборе. При сборке ротора в каждый полюс устанавливался магнит, после чего пакет полюсов насаживался на немагнитный шток (рис. 8).

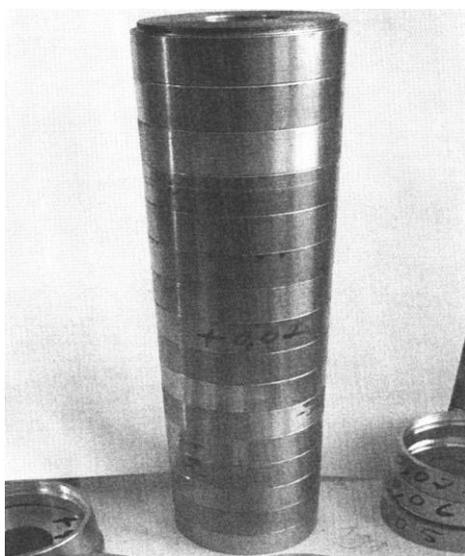


Рис. 7. Секция вторичного элемента без магнитов



Рис. 8. Секция вторичного элемента с магнитами в сборе

Структурная схема испытательного стенда для снятия статических тяговых усилий, развиваемых разработанным и изготовленным маломощным ЦЛВД, представлена на рис. 9. На рис. 10 показан внешний вид испытательного стенда ЦЛВД.

Согласно рис. 9 стенд включает в себя ЦЛВД, состоящий из неподвижного статора с индуктором I и подвижного вторичного элемен-

та 2. Двигатель закреплен на жестком неподвижном основании 7. Между ротором 2 и опорной стойкой 4 устанавливается динамометр 3 для измерения тяговых усилий. С помощью болта 5 изменяется положение ротора 2 относительно неподвижного статора с формированием при этом необходимого силового воздействия на вторичный элемент. Усилие также может быть сформировано посредством утяжелителей, подвешиваемых через блочную передачу (рис. 10). Текущее положение ротора, которое соответствует тяговому усилию, фиксируется с помощью линейки 6, установленной на основании 7.

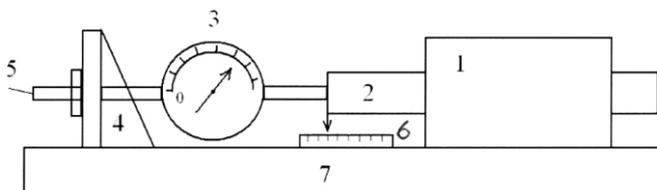


Рис. 9. Испытательный стенд для снятия тяговых характеристик ЦЛВД: 1 – статор; 2 – ротор; 3 – динамометр; 4 – опорная стойка; 5 – болт для фиксации ротора; 6 – мерная линейка смещения ротора; 7 – основание



Рис. 10. Внешний вид испытательного стенда ЦЛВД

Для снятия статических характеристик был подобран момент времени на графиках мгновенных значений токов фаз обмотки индуктора таким образом, чтобы ток в фазе А имел максимальное положи-

тельное значение. Следовательно, в двух соседних фазах В и С ток имел отрицательные значения, равные по модулю половине амплитудного. Для реализации указанного распределения токов использовалась схема, в которой обмотки фаз В и С соединялись параллельно, а обмотка фазы А подключалась последовательно с ними. При таком варианте соединения обмоток индуктора использовался источник постоянного тока регулируемого напряжения. Такой испытательный стенд позволяет снимать семейства статических характеристик при разных токах, протекающих в обмотках индуктора двигателя [18].

Тяговое усилие ЦЛВД имеет прямопропорциональную зависимость от линейной токовой нагрузки обмотки индуктора:

$$F = \frac{w \cdot I}{t_z},$$

где w – число витков в пазу статорного диска (чашки индуктора); I – ток фазы обмотки индуктора; t_z – зубцовое деление ЦЛВД.

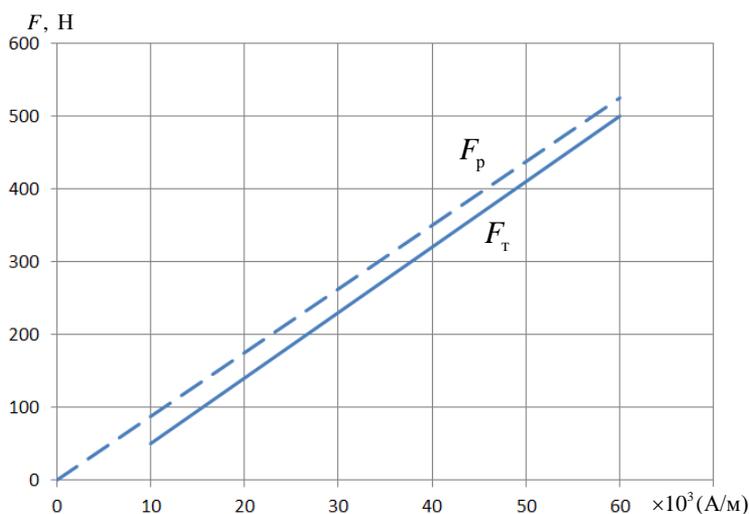


Рис. 11. Зависимость тяговых усилий от линейной токовой нагрузки ЦЛВД

На рис. 9 представлена расчетная зависимость тягового усилия F_p от линейной токовой нагрузки ЦЛВД. Расчет был произведен методом конечных элементов с применением программы ANSYS Maxwell [15, 20, 29]. Зависимость F_T (рис. 11) снята с помощью испытательного стенда, изображенного на рис. 9, согласно которому погрешность рас-

хождения данных, полученных расчетным путем и экспериментальным, не превышает 8 % в рабочей зоне линейной токовой нагрузки, что является вполне приемлемым для практических расчетов.

Заключение

Линейные двигатели в последнее время получили широкое распространение по причине их способности формировать поступательное или возвратно-поступательное движение без применения сложных механических преобразователей [4–6]. По этой причине все большее количество предприятий Российской Федерации организуют производство линейных двигателей на своих мощностях. Цилиндрический линейный вентильный двигатель как один из представителей линейных двигателей применяется на практике все чаще, чем остальные конструкции, по причине лучших энергетических и силовых показателей [5, 9]. Представленная в статье технология производства цилиндрического линейного вентильного двигателя основана на предварительном проектно-конструкторском расчете, который приведен в текущем номере журнала. Технология производства линейного двигателя раскрыта в статье в виде последовательности действий, отражающих особенности выбора материала и операций. По эскизному чертежу собран экспериментальный испытательный стенд, реализация которого на практике показала наличие возможностей различного его комплектования. Испытания цилиндрического вентильного двигателя, который был спроектирован специально для шлифовального станка, прошли успешно во всех предусмотренных режимах. Подтверждена высокая степень сходимости расчетных и экспериментальных значений тягового усилия, развиваемого опытным образцом. Погрешность результатов не превысила 8 %.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по государственному заданию FSNM-2020-0028.

Библиографический список

1. Адонин А.Н. Процессы глубиннонасосной нефтедобычи. – М.: Недра, 1964. – 264 с.
2. Семенов В.В., Огарков Э.М., Коротаев А.Д. Специальные асинхронные электродвигатели для нефтедобычи: монография. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 286 с.

3. Zhang Fengwu. Electric submersible Pump lifting process optimization // Proceedings of 2013 2nd International Conference on Measurement, Information and Control. – 2013. – P. 1328–1331. DOI: 10.1109/MIC.2013.6758204

4. Шимчак И. Инновационные разработки магнитных систем для синхронных машин с постоянными магнитами // Электроэнергетика. – 2009. – № 9. – С. 37–44.

5. Шулаков Н.В., Шутемов С.В. Перспективы использования цилиндрического линейного вентильного двигателя в качестве привода плунжерных нефтедобывающих агрегатов // Фундаментальные исследования. – 2016. – Т. 4, № 12. – С. 795–799.

6. Новые технологии эксплуатации малодебитного и периодического фонда / Э.Ю. Вдовин, Л.И. Локшин, М.А. Лурье [и др.] // Эксплуатация осложненного фонда скважин: сб. тр. произв.-техн. конф. – Сургут, 2017. – С. 40–43.

7. Промышленное использование нетрадиционных технических и технологических решений для нефтедобычи на промыслах Пермского края / Е.Ю. Вдовин, Л. Локшин, В. Семенов [и др.] // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике: материалы междунар. науч.-техн. конф. (Пермь, 21–22 апреля 2016). – Пермь: Изд-во Пермского нац. исслед. политехн. ун-та, 2016. – С. 212–222.

8. Lewis L.H., Jiménez-Villacorta F. Perspectives on Permanent Magnetic Materials for Energy Conversion and Power Generation // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2013. – Vol. 44. – P. 2–20.

9. Бакиров Р.И., Попов М.С., Бердин С. Первый опыт применения плунжерных насосов с погружным линейным электроприводом в ОАО «НК «РОСНЕФТЬ» // Научно-технический вестник ОАО «НК «РОСНЕФТЬ». – 2016. – № 2 (43). – С. 72–75.

10. Вилнитис А.Я., Дриц М.С. Концевой эффект в линейных асинхронных двигателях. – Рига: Зинатне, 1981. – 255 с.

11. Огарков Е.М., Коротаев А.Д. Поперечный эффект линейных асинхронных двигателей с учетом анизотропии вторичного элемента // Электричество. – 1991. – № 4. – С. 36–40.

12. Многофункциональный линейный асинхронный двигатель с продольно-поперечным магнитным потоком для магнитнолевитаци-

онного транспорта / В.А. Соломин, А.В. Соломин, В.В. Коледов, Н.А. Трубицина // Транспортные системы и технологии: сетевой электрон. журнал. – 2018. – Т. 4, № 2. – С. 167–179.

13. Веселовский О.Н., Полевский В.И. Аналитическое исследование электромагнитного поля цилиндрического асинхронного двигателя с анизотропным вторичным элементом // Электродвигатели с разомкнутым магнитопроводом: сб. науч. трудов. – Новосибирск: Изд-во Новосибирск. электротехн. ин-та, 1973. – Вып. 1. – С. 18–28.

14. Klyuchnikov A.T., Korotaev A.D. The efficiency of the electric motor of a subsurface pump with reciprocating action and losses in a leading-in cable // Russian Electrical Engineering. – 2016. – 87(11). – P. 626–629.

15. Klyuchnikov, A.T., Korotaev, A.D., Shutemov, S.V. Modeling of a cylindrical linear AC electronic motor // Russian Electrical Engineeringthis. – 2013. – 84(11). – P. 606–609.

16. Пат. № 162544 Рос. Федерация. Устройство для двухрядной намотки катушки / А.Т. Ключников, А.Д. Коротаев, В.Г. Еременко // БИ. – 2016. – № 17.

17. Shulakov N.V., Shutemov S.V. The method of calculation of electromagnetic processes in a cylindrical linear brushless motors // Russian Electrical Engineering. – 2014. – 85(11). – P. 663–667.

18. Мирзин А.М., Коротаев А.Д., Шутемов С.В. Усилие тяжения цилиндрического линейного вентильного двигателя с постоянными магнитами между статором и вторичным элементом // Научное обозрение. Технические науки. – 2014. – № 2. – С. 61–61.

19. Yanyan Liu, Liu X., Sun Chaoyong. Comparative Study of Electromagnetic Performance of Multi-Tooth Switching Flux Permanent Magnet Memory Machine // Electric Machines and Systems. – 2018. – P. 1–5. DOI: 10.1109/SCEMS.2018.8624830

20. A Cylindrical Linear Valve Electric Motor for the Executive Mechanism of Material Application Research / A.D. Korotaev, A.T. Kluchnikov, S.A. Lokteev, D.A. Oparin, S.V. Shutemov // Proceedings – ICOECS 2020: 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems. – 2020. – 9278484.

21. Тимашев Е.О., Чирков Д.А., Коротаев А.Д. Режим работы цилиндрического линейного вентильного двигателя при добыче нефти //

Высокие технологии и инновации в науке: материалы междунар. конф. (Санкт-Петербург, 28 января 2019 г.). – СПб, 2019. – С. 76–81.

22. Zhuzhgov N.V., Korotaev A.D., Chabanov E.A. Calculation of transients of a cylindrical linear valve motor // AIP Conference Proceedings. – 2021. – 2402. – 050035 p.

23. Ключников А.Т, Коротаев А.Д., Чирков Д.А. Метод расчета магнитной цепи цилиндрического линейного вентильного двигателя по схеме замещения // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2016. – Т. 14, № 9. – С. 64–69.

24. Chirkov D.A., Timashev E.O. Efficiency of a submersible plunger pump linear motor // E3S Web of Conferences. – 2019. – 02012 p.

25. Research on Performance High-speed Multi-stage Cylinder Linear Induction Motor / Guan Xiao-cun, Lei Bin, Li Zhi-yuan, Zhao Ran // International Conference on Future Energy, Environment, and Materials. – 2012. – 16. – P. 1904–1912. DOI: 10.1016/j.egypro.2012.01.291

26. Performance test of a 1MW class HTS syn-chronous motor for industrial application / Y. Kwon, H. Kim, S. Baik, E. Lee, K. Ryu // J. Physica C. – 2008. – 468. – P. 2081–2086. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.physc.2008.05.249>

27. Овчинников И., Адволоткин Н. Закономерности проектирования вентильных двигателей с постоянными магнитами для станков с ЧПУ и других механизмов // Российская электротехника. – 1988. – 7. – С. 59–65.

28. Зечихин Б., Журавлев С., Ситин Д. Расчетные коэффициенты синхронных машин с редкоземельными магнитами // Электричество. – 2009. – 3. – С. 35–40.

29. Timashev E.O., Chirkov D.A., Korotaev A.D. Operating characteristics of a cylindrical linear induction motor // Russian Electrical Engineering. – 2018. – Vol. 89, № 11. – P. 643–647.

References

1. Adonin A.N. Protsessy glubinnonasnoi neftedobychi [Deep well pumped oil production processes]. Moscow: Nedra, 1964, 263 p.

2. Semenov V.V., Ogarkov E.M., Korotaev A.D. Spetsial'nye asinkhronnye elektrodvigateli dlia neftedobychi [Special asynchronous electric motors for oil production]. Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2014, 286 p.

3. Zhang Fengwu. Electric submersible Pump lifting process optimization. *Proceedings of 2013 2nd International Conference on Measurement, Information and Control*, 2013, pp. 1328-1331. DOI: 10.1109/MIC.2013.6758204

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

5. Shulakov N.V., Shutemov S.V. Perspektivy ispol'zovaniia tsilindricheskogo lineinogo ventil'nogo dvigatel'ia v kachestve privoda plunzhernykh neftedobyvaiushchikh agregatov [Prospects for using a cylindrical linear valve motor as a drive for plunger oil production units]. *Fundamental'nye issledovaniia*, 2016, vol. 4, no. 12, pp. 795-799.

6. Vdovin E.Iu., Lokshin L.I., Lur'e M.A. et al. Novye tekhnologii ekspluatatsii malodebitnogo i periodicheskogo fonda [New technologies of operation of low-debit and periodic fund]. *Ekspluatatsiia oslozhnennogo fonda skvazhin. Sbornik trudov proizvodstvenno-tekhnikeskoi konferentsii*. Surgut, 2017, pp. 40-43.

7. Vdovin E.Iu., Lokshin L., Semenov V. et al. Promyshlennoe ispol'zovanie netraditsionnykh tekhnicheskikh i tekhnologicheskikh reshenii dlia neftedobychi na promyslakh Permskogo kraia [Industrial use of non-traditional technical and technological solutions for oil production in the fields of the Perm region]. *Avtomatizatsiia v elektroenergetike i elektrotekhnike. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnikeskoi konferentsii* (Perm', 21-22 April 2016). Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2016, pp. 212-222.

8. Lewis L.H., Jiménez-Villacorta F. Perspectives on Permanent Magnetic Materials for Energy Conversion and Power Generation. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2013, vol. 44, pp. 2-20.

9. Bakirov R.I., Popov M.S., Berdin S. Pervyi opyt primeneniia plunzhernykh nasosov s pogrulzhnym lineinym elektroprivodom v OAO "NK "ROSNEFT'" [The first experience of using plunger pumps with submersible linear electric drive in OJSC NK ROSNEFT]. *Nauchno-tekhnikeskii vestnik OAO "NK "ROSNEFT'"*, 2016, no. 2 (43), pp. 72-75.

10. Vilnitis A.Ia., Drits M.S. Kontsevoi effekt v lineinykh asinkhronnykh dvigateliakh [End effect in linear asynchronous motors]. Riga: Zinatne, 1981, 255 p.

11. Ogarkov E.M., Korotaev A.D. Poperechnyi effekt lineinykh asinkhronnykh dvigatelei s uchetom anizotropii vtorichnogo elementa [Transverse effect of linear asynchronous motors taking into account the anisotropy of the secondary element]. *Elektrichestvo*, 1991, no. 4, pp. 36-40.

12. Solomin V.A., Solomin A.V., Koledov V.V., Trubitsina N.A. Mnogofunktional'nyi lineinyi asinkhronnyi dvigatel' s prodol'no-poperechnym magnitnym potokom dlia magnitnolevitatsionnogo transporta [Multifunctional linear asynchronous motor with longitudinal-transverse magnetic flux for magnetic levitation transport]. *Transportnye sistemy i tekhnologii. Setevoi elektronnyi zhurnal*, 2018, vol. 4, no. 2, pp. 167-179.

13. Veselovskii O.N., Polevskii V.I. Analiticheskoe issledovanie elektromagnitnogo polia tsilin-dricheskogo asinkhronnogo dvigatel'ia s anizotropnym vtorichnym elementom [Analytical study of the electromagnetic field of a cylindrical asynchronous motor with anisotropic secondary element]. *Elektrodvigateli s razomknutym magnitprovodom. Sbornik nauchnykh trudov. Novosibirsk: Novosibirskii elektrotekhnicheskii institut*, 1973, iss. 1, pp. 18-28.

14. Klyuchnikov A.T., Korotaev A.D. The efficiency of the electric motor of a subsurface pump with reciprocating action and losses in a leading-in cable. *Russian Electrical Engineering*, 2016, 87(11), pp. 626-629.

15. Klyuchnikov, A.T., Korotaev, A.D., Shutemov, S.V. Modeling of a cylindrical linear AC electronic motor. *Russian Electrical Engineering*, 2013, 84(11), pp. 606-609.

16. Kliuchnikov A.T., Korotaev A.D., Eremenko V.G. Ustroistvo dlia dvukhriadnoi namotki katushki [Device for double-row coil winding]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 162544 (2016).

17. Shulakov N.V., Shutemov S.V. The method of calculation of electromagnetic processes in a cylindrical linear brushless motors. *Russian Electrical Engineering*, 2014, 85(11), pp. 663-667.

18. Mirzin A.M., Korotaev A.D., Shutemov S.V. Usilie tiazheniia tsilindrisheskogo lineinogo ventil'nogo dvigatel'ia s postoiannymi magnitami mezhdou statorom i vtorichnym elementom [Tension force of a cylindrical linear valve motor with permanent magnets between the stator and the secondary element]. *Nauchnoe obozrenie. Tekhnicheskie nauki*, 2014, no. 2, pp. 61-61.

19. Yanyan Liu, Liu X., Sun Chaoyong. Comparative Study of Electromagnetic Performance of Multi-Tooth Switching Flux Permanent Magnet

Memory Machine. *Electric Machines and Systems*, 2018, pp. 1-5. DOI: 10.1109/SCEMS.2018.8624830

20. Korotaev A.D., Kluchnikov A.T., Lokteev S.A., Oparin D.A., Shutemov S.V. A Cylindrical Linear Valve Electric Motor for the Executive Mechanism of Material Application Research. *Proceedings – ICOECS 2020: 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems*. – 2020. – 9278484.

21. Timashev E.O., Chirkov D.A., Korotaev A.D. Rezhim raboty tsilindricheskogo lineinogo ventil'nogo dvigatelia pri dobyche nefiti [Mode of operation of a cylindrical linear valve engine in oil production]. *Vysokie tekhnologii i innovatsii v nauke. Materialy mezhdunarodnoi konferentsii* (Saint Petersburg, 28 January 2019). Saint Petersburg, 2019, pp. 76-81.

22. Zhuzhgov, N.V., Korotaev, A.D., Chabanov, E.A. Calculation of transients of a cylindrical linear valve motor. *AIP Conference Proceedings*, 2021, 2402, 050035.

23. Metod rascheta magnitnoi tsepi tsilindricheskogo lineinogo ventil'nogo dvigatelia po skheme zameshcheniia [Method for calculating the magnetic circuit of a cylindrical linear valve motor according to the equivalent circuit]. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravliaiushchie sistemy*, 2016, vol. 14, no. 9, pp. 64-69.

24. Chirkov D.A., Timashev E.O. Efficiency of a submersible plunger pump linear motor. *E3S Web of Conferences*, 2019, 02012 p.

25. Xiao-cun Guan, Bin Lei, Zhi-yuan Li, Ran Zhao. Research on Performance High-speed Multi-stage Cylinder Linear Induction Motor. *International Conference on Future Energy, Environment, and Materials*, 2012, 16, pp. 1904-1912. DOI: 10.1016/j.egypro.2012.01.291

26. Kwon Y., Kim H., Baik S., Lee E., Ryu K. Performance test of a 1MW class HTS syn-chronous motor for industrial application. *J. Physica C*, 2008, 468, pp. 2081-2086, available at: <https://doi.org/10.1016/j.physc.2008.05.249>

27. Ovchinnikov I., Advolotkin N. Zakonomernosti proektirovaniia ventil'nykh dvigatelei s postoiannymi magnitami dlia stankov s ChPU i drugikh mekhanizmov [Design patterns of valve motors with permanent magnets for CNC machines and other mechanisms]. *Rossiiskaia elektrotekhnika*, 1988, 7, pp. 59-65.

28. Zechikhin B., Zhuravlev S., Sitin D. Raschetnye koeffitsienty sinkhronnykh mashin s redkozemel'nymi magnitami [Calculated coeffi-

cients of synchronous machines with rare earth magnets]. *Elektrichestvo*, 2009, 3, pp. 35-40.

29. Timashev E.O., Chirkov D.A., Korotaev A.D. Operating characteristics of a cylindrical linear induction motor. *Russian Electrical Engineering*, 2018, vol. 89, no. 11, pp. 643-647.

Сведения об авторах

Чабанов Евгений Александрович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский проспект, 29, e-mail: ceapb@mail.ru).

Коротаев Александр Дмитриевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский проспект, 29, e-mail: alexanderkorotaev16@gmail.com).

About the authors

Evgenii A. Chabanov (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor Department of Electrical Engineering and Electromechanics Perm National Research Politechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: ceapb@mail.ru).

Aleksandr D. Korotaev (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor Department of Electrical Engineering and Electromechanics Perm National Research Politechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: alexanderkorotaev16@gmail.com).

Получена: 21.10.2021