

УДК 621.313.8

**Д.А. Чирков<sup>1</sup>, А.Т. Ключников<sup>1</sup>, А.Д. Коротаев<sup>1</sup>, Э.О. Тимашев<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия<sup>2</sup>Корпоративный научно-проектный комплекс НК «Роснефть», Москва, Россия

## СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЁТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ПРИМЕРЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЛИНЕЙНОГО ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

В данной статье представлено сравнение двух основных методов расчёта электромагнитных процессов и рабочих характеристик электродвигателей. Первый метод основан на теории электрических и магнитных цепей, а второй на базе решения уравнений Максвелла в дифференциальной форме. Методы моделирования синхронных двигателей с постоянными магнитами показаны на примере ЦЛВД. Расчёты электромагнитных полей на базе математической модели, в большей или меньшей степени отражающей реальный физический объект, являются основой для проектирования различных электрических машин. Тем самым выбор методики, по которой будет построена математическая модель двигателя, играет важнейшую роль в проектировании электрических машин. В качестве результатов расчёта по этим двум методикам представлены угловые и рабочие характеристики как наиболее значимые параметры для проектирования двигателей. Расчёт электромагнитных полей с использованием теории электрических и магнитных цепей на основании схем замещения проводился согласно методике расчёта синхронных машин с постоянными магнитами, представленной в работе И.Л. Осина и Ф.М. Юферова. Расчёт электромагнитных полей согласно методу конечных элементов был реализован в программном пакете ANSYS Maxwell. Угловые характеристики представлены зависимостями электромагнитного усилия двигателя  $F$  от значения углового смещения  $\theta$  при разных значениях частоты питающего напряжения. Рабочие характеристики представлены зависимостями электромагнитного усилия двигателя  $F$ , фазного тока  $I$ , потребляемой мощности  $P_1$ , коэффициента полезного действия  $\eta$  и коэффициента мощности  $\cos(\varphi)$  от мощности на штоке  $P_2$ . Результат сравнения этих двух методик выявил существенное отклонение расчёта  $I$ ,  $P_1$  и  $\eta$ , что связано с насыщением магнитной цепи, которое в работах И.Л. Осина и Ф.М. Юферова не учитывалось.

**Ключевые слова:** рабочие характеристики, угловые характеристики, насыщение магнитной цепи, цилиндрический линейный вентильный двигатель, синхронный двигатель.

D.A. Chirkov<sup>1</sup>, A.T. Klyuchnikov<sup>1</sup>, A.D. Korotaev<sup>1</sup>, E.O. Timashev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Perm National Research Polytechnical University, Perm, Russian Federation

<sup>2</sup>Corporate Scientific and Design Complex of Rosneft, Moscow, Russian Federation

## COMPARISON OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES CALCULATION METHODS ON THE EXAMPLE OF A CYLINDRICAL LINEAR ELECTRONIC MOTOR

This article presents a comparison of the two main methods for calculating the electromagnetic processes and the characteristics of electric motors. The first method is based on the theory of electric and magnetic circuits, and the second based on the solutions of the Maxwell equations in differential form. The methods of modeling synchronous motors with permanent magnets are shown in the example of the CLEM. Calculations of electromagnetic fields on the basis of a mathematical model reflecting to a greater or lesser extent the real physical object are the basis for the design of various electric machines. Thus, the choice of the method by which the mathematical model of the engine will be constructed plays an important role in the design of electric machines. As the results of the calculation for these two methods, angular and work characteristics are presented as the most important parameters for engine design. The calculation of electromagnetic fields using the theory of electric and magnetic circuits based on substitution schemes was carried out according to the method of calculating synchronous machines with permanent magnets, presented in the work of I.L. Osin and F.M. Yuferov. Calculation of electromagnetic fields according to the finite element method was realized by the software package ANSYS Maxwell. The angular characteristics are represented by the dependence electromagnetic force  $F$  on the values of the angular displacement  $\theta$  for different values of the supply voltage frequencies. Work characteristics are represented by the dependences of the electromagnetic force  $F$ , the phase current  $I$ , the power consumption  $P_1$ , the efficiency  $\eta$  and the power factor  $\cos(\varphi)$  on the power on the rod  $P_2$ . The result of the comparison of these two methods revealed a significant deviation of  $I$ ,  $P_1$  and  $\eta$ , which is related to the saturation of the magnetic circuit, which was not taken into account in the works of I.L. Osin and F.M. Uferov.

**Keywords:** work characteristics, angle characteristics, saturation of magnetic circuit, cylindrical linear electronic motor, synchronous motor.

В работе И.Л. Осина и Ф.М. Юферова представлена методика расчёта синхронных машин с постоянными магнитами с использованием теории электрических и магнитных цепей на основании схем замещения [1, с. 122]. В данной статье сопоставляются характеристики ЦЛВД, рассчитанные по данной методике с характеристиками, полученными методом конечных элементов. Расчёт методом конечных элементов характеризуется повышенной точностью, что хорошо показано в [2]. Потому расчёт методом конечных элементов учитывает насыщение магнитной цепи и усилия тяжения [3]. Однако именно на математических моделях, таких как в [4], построенных в соответствии с расчётными формулами, основываются системы управления электроприводом [5–8].

Цилиндрический линейный вентильный двигатель с постоянными магнитами [9–12] (рис. 1) состоит из цилиндрического корпуса 1, индуктора 3, с трёхфазными обмотками 2, а также вторичного элемента с возможностью возвратно-поступательного движения вдоль корпуса 1, который содержит шток 5, множество постоянных магнитов 6, полюсов 4 и немагнитных вставок 7. Индуктор 3 неподвижно установлен в корпусе 1 и представляет собой множество катушек, образующих трёхфазную обмотку, которая создаёт бегущее магнитное поле вдоль оси корпуса. Рассматриваемый ЦЛВД был разработан в первую очередь как привод погружного плунжерного насоса. Преимущества использования погружного насосного агрегата на основе ЦЛВД были описаны ранее в [13–17].

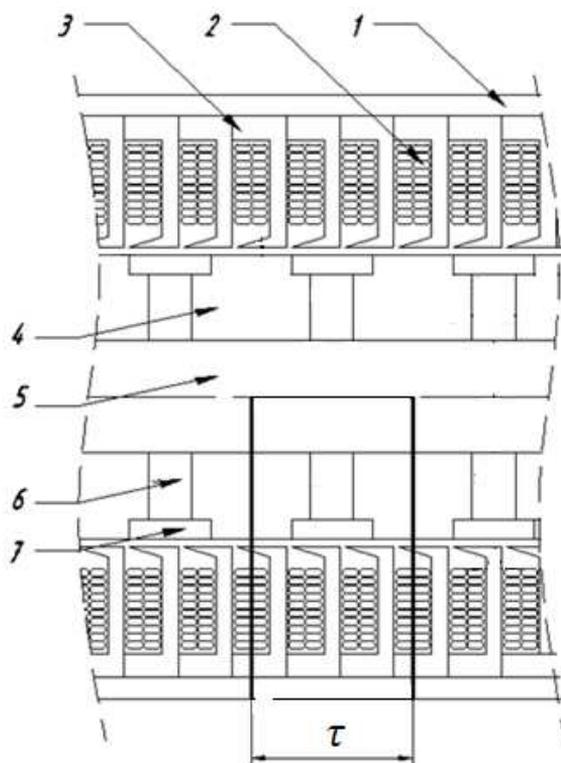


Рис. 1. Разрез модуля ЦЛВД

После проведения расчёта магнитной цепи, изложенного в [18, 19], и нахождения продольной и поперечной индуктивностей ЦЛВД стало возможным использовать методику [1, с. 128] для расчёта рабочих характеристик двигателя.

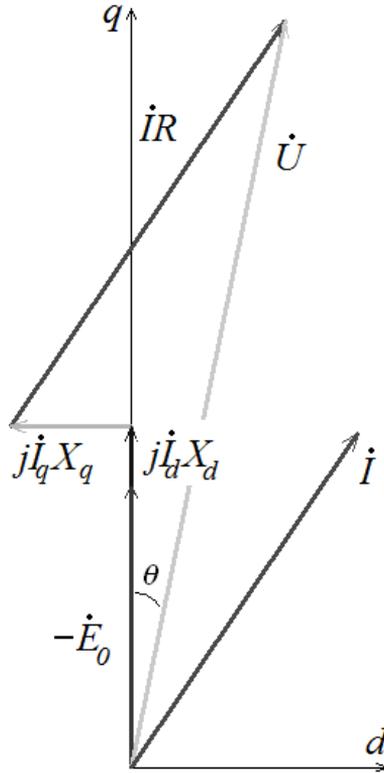


Рис. 2. Векторная диаграмма ЦЛВД

Задаваясь величиной и частотой питающего напряжения, а также углом нагрузки  $\theta$ , можно рассчитать продольную и поперечную составляющие токов статора и полный ток согласно векторной диаграмме, изображённой на рис. 2:

$$I_d = \frac{X_q(U \cdot \cos(\theta) - E_0) - r_s \cdot U \cdot \sin(\theta)}{X_d \cdot X_q + r_s^2},$$

$$I_q = \frac{r_s(U \cdot \cos(\theta) - E_0) + X_d \cdot U \cdot \sin(\theta)}{X_d \cdot X_q + r_s^2},$$

$$I = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}.$$

Преобразовав уравнения, полученные в [1, с. 128], определим выражения для нахождения тягового усилия.

Выражения для определения максимальных основного и реактивного усилий запишем в виде:

$$F_{\varepsilon m} = \frac{U \cdot E_0}{2\tau \cdot f(X_d X_q + r_s^2)^2} \times \\ \times \sqrt{(X_d X_q^2 + 2 \cdot r_s^2 X_d - r_s^2 X_q)^2 + r_s^2 (2X_q^2 - X_d X_q + r_s^2)^2}, \\ F_{dqm} = \frac{U^2 (X_d - X_q)}{4\tau \cdot f(X_d X_q + r_s^2)^2} \cdot \sqrt{(X_d^2 + r_s^2) \cdot (X_q^2 + r_s^2)}.$$

Основное и реактивное тормозные усилия:

$$F_{\varepsilon T} = -\frac{E_0^2 \cdot r_s}{2\tau \cdot f(X_d X_q + r_s^2)^2} \cdot (X_q^2 + r_s^2), \\ F_{dqT} = -\frac{U^2 \cdot r_s}{2\tau \cdot f(X_d X_q + r_s^2)^2} \cdot (X_d - X_q)^2.$$

Углы смещения основного и реактивного усилия:

$$\alpha_{\varepsilon} = \arctg \left( \frac{r_s (2X_q^2 - X_d X_q + r_s^2)}{X_d X_q^2 + 2r_s^2 X_d - r_s^2 X_q} \right), \\ \alpha_{dq} = \arctg \left( \frac{r_s (X_d + X_q)}{X_d X_q - r_s^2} \right).$$

В итоге получим значение синхронного усилия:

$$F = F_{\varepsilon} + F_{dq} = (F_{\varepsilon m} \cdot \sin(\theta + \alpha_{\varepsilon}) + \\ + F_{\varepsilon T}) + (F_{dqm} \cdot \sin 2(\theta + \alpha_{dq}) + F_{dqT}).$$

Полезная мощность на штоке и потребляемая мощности рассчитываются по формулам:

$$P_2 = F \cdot v, P_1 = P_2 + \dot{I}^2 \cdot r_s,$$

где  $v$  – линейная скорость вторичного элемента,  $v = 2 \cdot \tau \cdot f$ ;  $\tau$  – величина полюсного деления,  $\tau = 30$  мм;  $\dot{I}^2 \cdot r_s$  – потери в меди на все три фазы двигателя.

Коэффициент полезного действия и коэффициент мощности:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}, \cos(\varphi) = \frac{P_1}{S},$$

где полная мощность  $S = U \cdot I$ .

В зависимости от угла  $\theta$  были построены характеристики ЦЛВД при частоте 5 Гц (рис. 3).

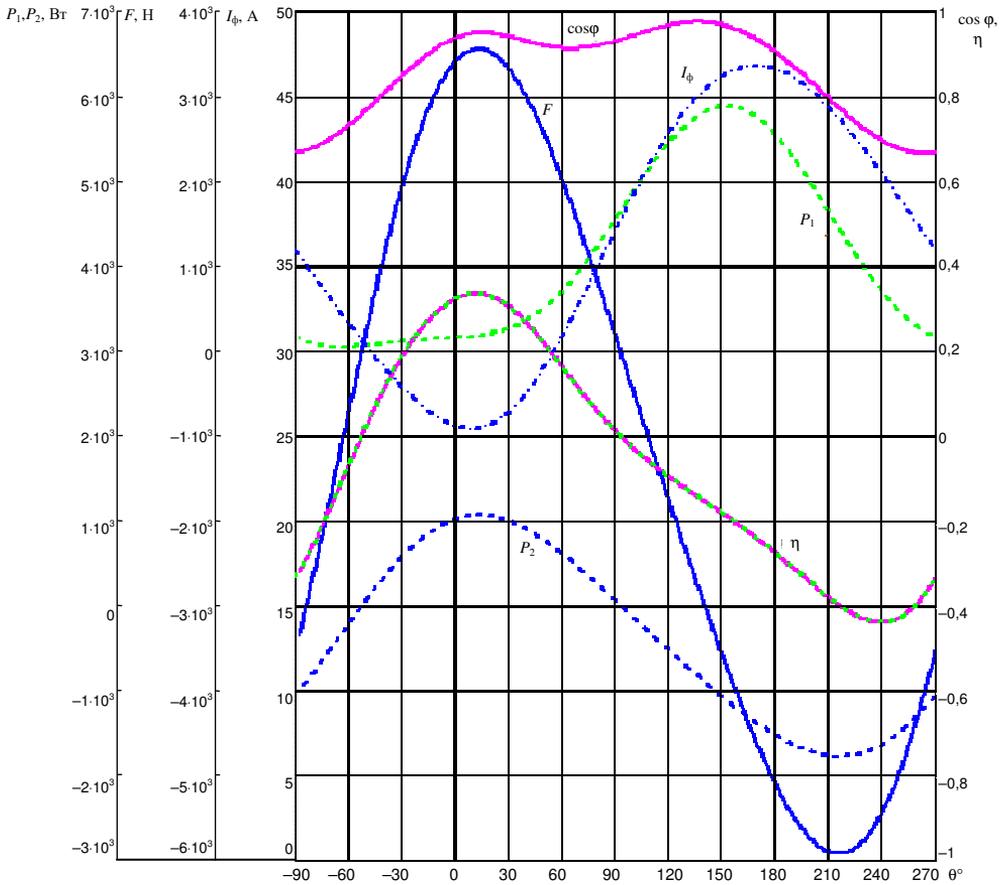


Рис. 3. Угловые характеристики ЦЛВД

На графике видно, что усилие достигает своего максимального значения при угле  $\theta = 15^\circ$ . Также можно заметить, что коэффициент полезного действия и коэффициент мощности достигают своих наибольших значений приблизительно при том же угле  $\theta$ . При  $\theta = 95^\circ$  ЦЛВД переходит в генераторный режим, при этом усилие ЦЛВД становится отрицательным. Причём максимальное усилие в генераторном режиме становится больше, чем в двигательном, потому что в генераторном режиме реакция якоря усиливает основной магнитный поток в воздушном зазоре, а не ослабляет его. Действующее значение фазного тока при этом растёт. Активная потребляемая мощность тоже растёт вместе

током, несмотря на то, что полезная мощность становится отрицательной. Смещение максимума усилия на угловой зависимости наглядно продемонстрировано на рис. 4. При увеличении частоты питающего напряжения значение угла  $\theta$ , соответствующего максимальному усилию двигателя, растёт, начиная от 0 и стремясь к  $90^\circ$ , что соответствует идеализированной синхронной машине, в которой активное сопротивление по сравнению с индуктивным мало и им пренебрегают.

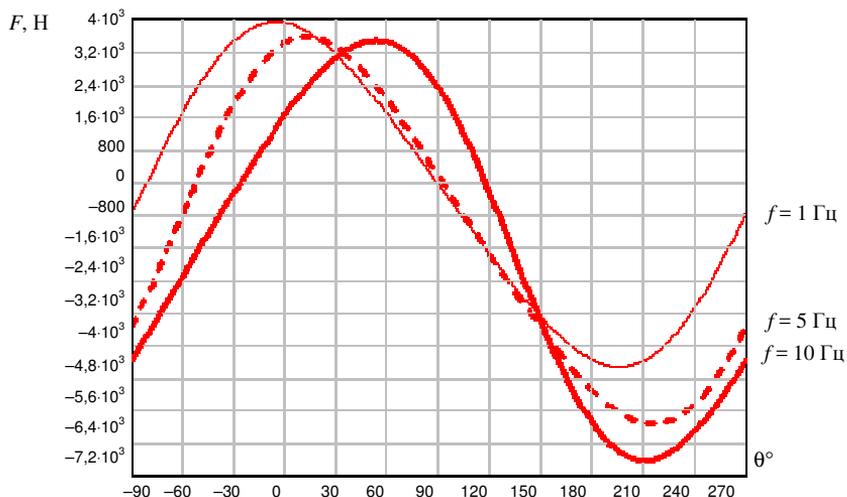


Рис. 4. Угловые зависимости усилия математической модели ЦЛВД при разных частотах

Аналогичный расчёт был проведён на модели ЦЛВД, построенной в программном пакете ANSYS Maxwell согласно [20]. Величина силы тяги вторичного элемента  $F$  принимается равной  $F_{\text{ср}}$  – среднему значению усилия, действующего на вторичный элемент, в установившемся режиме работы. Расчёт двигателя в ANSYS Maxwell ведётся при движении вторичного элемента. Строится зависимость усилия во времени.

Угловые характеристики ЦЛВД, рассчитанные в программном пакете ANSYS Maxwell, приведены на рис. 5.

Проведя сравнение зависимостей, приведённых на рис. 4 и 5, можно заметить, что максимальные значения усилия характеристик соответствующих частот практически равны для всех частот питающего напряжения и угловом смещении  $\theta$ . Из чего можно сделать вывод о хорошем совпадении сопоставляемых методик.

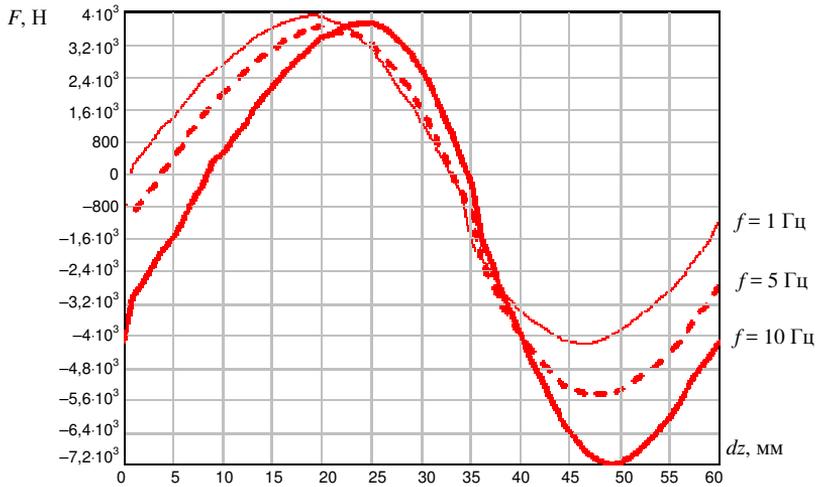


Рис. 5. Угловые зависимости усилия при разных частотах модели ЦЛВД, построенной в ANSYS Maxwell

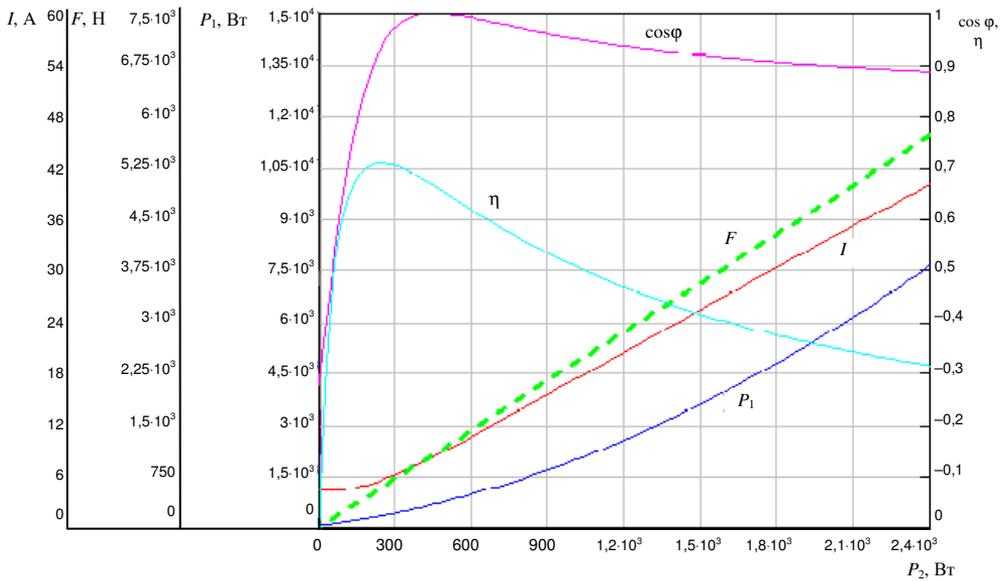


Рис. 6. Рабочие характеристики ЦЛВД для частоты питающего напряжения 7 Гц, полученные аналитически согласно формулам [1]

Сравнивая кривые, показанные на рис. 6 и 7, можно сделать следующий вывод, что зависимости  $F$  и  $\cos(\varphi)$  от мощности на штоке  $P_2$  практически совпадают, а зависимости  $I$ ,  $P_1$ ,  $\eta$  от  $P_2$  существенно отличаются. Расхождение  $I$ ,  $P_1$ ,  $\eta$  обусловлено тем, что расчёт по методике [1, с. 128] проводился без учёта насыщения магнитной системы ЦЛВД.

Насыщение магнитной цепи ЦЛВД приводит к увеличению её сопротивления, что вызывает уменьшение индуктивных сопротивлений и возрастание тока, при этом мощность  $P_1$  возрастает, а  $\eta$  с увеличением потерь уменьшается.

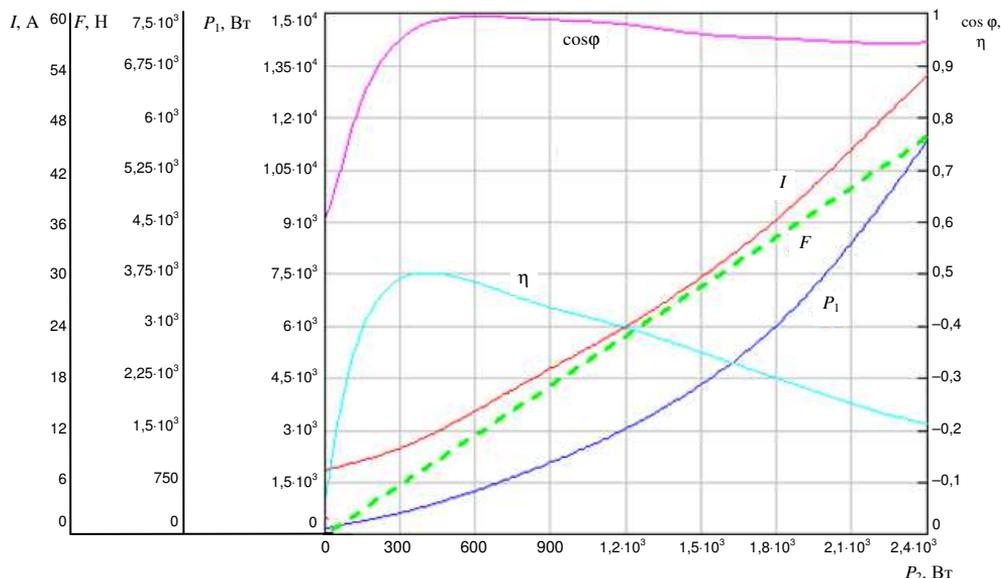


Рис. 7. Рабочие характеристики ЦЛВД для частоты питающего напряжения 7 Гц, полученные расчётом модели двигателя в ANSYS Maxwell

Таким образом, можно сделать вывод, что из-за значительных погрешностей расчёта по методике [1], вызванных полным отсутствием учёта насыщения магнитной цепи, наиболее целесообразным для расчёта характеристик ЦЛВД является метод конечных элементов, который, в свою очередь, учитывает насыщение, геометрию и вихревые токи магнитной цепи, благодаря чему максимально точно отображает физические процессы, происходящие в электрических машинах.

### Библиографический список

1. Осин И.Л., Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств: учеб. пособие для вузов. – М.: Изд-во МЭИ, 2003.
2. Шулаков Н.В., Шутемов С.В. Метод расчета электромагнитных процессов в цилиндрическом линейном вентильном двигателе // Электротехника. – 2014. – № 11. – С. 18–22.

3. Мирзин А.М., Коротаев А.Д., Шутемов С.В. Усилие тяжения цилиндрического линейного вентильного двигателя с постоянными магнитами между статором и вторичным элементом // *Современные проблемы науки и образования*. – Пенза: Изд-во Акад. естествознания, 2013. – № 6.

4. Математическая модель электромагнитных процессов в вентильном двигателе / Н.А. Окунева, А.М. Русаков, А.Н. Соломин, И.В. Шатова // *Вестник МЭИ*. – 2007. – № 3. – С. 33–40.

5. Система управления цилиндрическим линейным вентильным двигателем возвратно-поступательного движения / С.В. Шутемов, М.С. Байбаков, А.Д. Коротаев, А.Т. Ключников // *Информационно-измерительные и управляющие системы*. – 2015. – Т. 13, № 9. – С. 64–69.

6. Алгоритм управления цилиндрическим линейным вентильным двигателем с постоянными магнитами / М.С. Байбаков, А.Т. Ключников, А.Д. Коротаев, С.В. Шутемов // *Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике*. – 2015. – Т. 13, № 9. – С. 184–189.

7. Управление вентильным двигателем без датчика положения / А.М. Мирзин, С.А. Бэетрзу, А.Т. Ключников, А.Д. Коротаев // *Инновационные технологии: теория, инструменты, практика (Innotech 2013): материалы V Междунар. интернет-конф. мол. учен., аспирант., студ. (30 ноября 2013 г.)*. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – С. 158–166.

8. Бездатчиковое управление вентильным двигателем / С.А. Бэетрзу, А.Т. Ключников, А.Д. Коротаев, А.М. Мирзин, С.В. Шутемов // *Автоматизированные системы управления и информационные технологии: материалы краевой науч.-техн. конф. (г. Пермь, 22 мая 2013 г.)*. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. – С. 352–360.

9. Коротаев А.Д., Шутемов С.В., Ключников А.Т. Моделирование цилиндрического линейного вентильного двигателя // *Электротехника*. – 2013. – № 11. – С. 14–17.

10. Коротаев А.Д., Шулаков Н.В., Шутемов С.В. Экспериментальные исследования цилиндрического линейного вентильного электродвигателя // *Актуальные проблемы энергосберегающих электро-технологий АПЭЭТ-2014: материалы III Междунар. конф. (г. Екатеринбург, 17–20 марта 2014 г.)*. – Екатеринбург: Изд-во Урал. федер. ун-та им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2014. – С. 198–200.

11. Расчет электромагнитного поля в неподвижных электропроводящих изотропных средах [Электронный ресурс] / Е.М. Огарков, А.Т. Ключников, А.Д. Коротаев, Д.А. Чирков // *Фундаментальные исследования*. – 2016. – № 12, ч. 1. – С. 91–95. – URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41052>.

12. Шутемов С.В. Исследование цилиндрического линейного вентильного электродвигателя для погружного бесштангового насоса // *Фундаментальные исследования*. – 2016. – Т. 4, № 12. – С. 800–805.

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

14. Промышленное использование нетрадиционных технических и технологических решений для нефтедобычи на промыслах Пермского края / Э.Ю. Вдовин, Л.И. Локшин, В.В. Семенов, А.Д. Коротаев, Е.М. Огарков // *Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике: материалы II Междунар. науч.-техн. конф. (г. Пермь, 21–22 апреля 2016 г.)*. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2016. – С. 212–222.

15. Семенов В.В., Чазов Г.А. Перспективы эффективного использования глубинно-насоснобесштангового поршневого агрегата с линейным двигателем // *Геология, разработка, бурение и эксплуатация нефтяных месторождений Пермского Приуралья: сб. науч.тр. / ПермНИПИнефть*. – М., 1978. – С. 90–95.

16. Вдовин Э.Ю., Локшин Л.И. Установка насосная с линейным приводом // *Экспозиция. Нефть. Газ. – Нефтекамск*, 2016. – № 1. – С. 42–43.

17. Цилиндрический линейный вентильный электродвигатель для погружного бесштангового насоса / А.Т. Ключников, А.Д. Коротаев, Н.В. Шулаков, С.В. Шутемов // *Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике: материалы I Междунар. науч.-техн. конф. (г. Пермь, 24–25 сентября 2015 г.)*. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2015. – С. 158–162.

18. 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*. – 2010. – Т. 14, № 9. – С. 64–69.

19. Чирков Д.А., Коротаев А.Д., Ключников А.Т. Расчет основных параметров цилиндрического линейного вентильного двигателя по

схеме замещения // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике: материалы II Междунар. науч.-техн. конф. (г. Пермь, 21–22 апреля 2016 г.). – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2016. – С. 144–149.

20. Вишняков С.В., Гордюхина Н.М., Федорова Е.М. Расчет электромагнитных полей с помощью программного комплекса ANSYS: учеб. пособие по курсу «Теория электромагнитного поля» по направлению «Информатика и вычислительная техника» / ред. Ю.А. Казанцев. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – С. 100.

### **References**

1. Osin I.L., Iuferov F.M. Elektricheskie mashiny avtomaticheskikh ustroystv [Automatic devices electrical machines]. Moscow: Moskovskii energeticheskii institut, 2003.

2. Shulakov N.V., Shutemov S.V. Metod rascheta elektromagnitnykh protsessov v tsilindricheskom lineinom ventilnom dvigatele [The method of calculating the electromagnetic processes in a cylindrical linear electronic motor]. *Elektrotehnika*, 2014, no. 11, pp. 18-22.

3. Mirzin A.M., Korotaev A.D., Shutemov S.V. Usilie tiazheniia tsilindricheskogo lineinogo ventilnogo dvigatel'ia s postoiannymi magnitami mezhdu statorom i vtorichnym elementom [Thrust force of a cylindrical linear electronic motor with permanent magnets between the stator and the secondary element]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia*. Penza: Akademiia estestvoznaniia, 2013, no. 6.

4. Okuneeva N.A., Rusakov A.M., Solomin A.N., Shatova I.V. Matematicheskaiia model elektromagnitnykh protsessov v ventilnom dvigatele [Mathematical model of valve engine electromagnetic processes]. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta*, 2007, no. 3, pp. 33-40.

5. Shutemov S.V., Baibakov M.S., Korotaev A.D., Kliuchnikov A.T. Sistema upravleniia tsilindricheskim lineinym ventilnym dvigatelem vozvratno-postupatel'nogo dvizheniia [The control system of a cylindrical linear electronic motor of reciprocating motion]. *Informatsionno-izmeritelnye i upravliaiushchie sistemy*, 2015, vol. 13, no. 9, pp. 64-69.

6. Baibakov M.S., Kliuchnikov A.T., Korotaev A.D., Shutemov S.V. Algoritm upravleniia tsilindricheskim lineinym ventilnym dvigatelem s postoiannymi magnitami [The control algorithm of a cylindrical linear

permanent magnet valve motor]. *Avtomatizatsiia v elektroenergetike i elektrotekhnike*, 2015, vol. 13, no. 9, pp. 184-189.

7. Mirzin A.M., Beetreu S.A., Kliuchnikov A.T., Korotaev A.D. Upravlenie ventilnym dvigatelem bez datchika polozheniia [Controlling valve motor without position sensor]. *Innovatsionnye tekhnologii: teoriia, instrumenty, praktika (Innotech 2013). Materialy V Mezhdunarodnoi internet-konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov, studentov (30 November 2013)*. Perm: Permskii natsionalnyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2014, pp. 158-166.

8. Beetreu S.A., Kliuchnikov A.T., Korotaev A.D., Mirzin A.M., Shutemov S.V. Bez datchikovoie upravlenie ventil'nym dvigatelem [Valve motor sensorless control]. *Avtomatizirovannye sistemy upravleniia i informatsionnye tekhnologii. Materialy kraevoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii (Perm, 22 May 2013)*. Perm: Permskii natsionalnyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2013, pp. 352-360.

9. Korotaev A.D., Shutemov S.V., Kliuchnikov A.T. Modelirovanie tsilindricheskogo lineinogo ventil'nogo dvigatel'ia [Modeling of cylindrical linear electronic motor]. *Elektrotekhnika*, 2013, no. 11, pp. 14-17.

10. Korotaev A.D., Shulakov N.V., Shutemov S.V. Eksperimental'nye issledovaniia tsilindricheskogo lineinogo ventil'nogo elektrodvigatelea [Experimental research of a cylindrical linear electronic motor]. *Aktualnye problemy energosberegaiushchikh elektrotekhnologii APEET-2014. Materialy III Mezhdunarodnoi konferentsii (Ekaterinburg, 17-20 March 2014)*. Ekaterinburg: Uralskii federalnyi universitet imeni pervogo Prezidenta Rossii B.N. Eltsina, 2014, pp. 198-200.

11. Ogarkov E.M., Kliuchnikov A.T., Korotaev A.D., Chirkov D.A. Raschet elektromagnitnogo polia v nepodvizhnykh elektroprovodiashchikh izotropnykh sredakh [Calculation of the electromagnetic field in stationary electrically conductive isotropic medium]. *Fundamentalnye issledovaniia*, 2016, no. 12, part 1, pp. 91-95, available at: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41052>

12. Shutemov S.V. Issledovanie tsilindricheskogo lineinogo ventil'nogo elektrodvigatelea dlia pogruzhnogo besshtangovogo nasosa [Research of a cylindrical linear electronic motor for a submersible rodless pump]. *Fundamentalnye issledovaniia*, 2016, vol. 4, no. 12, pp. 800-805.

13. Shulakov N.V., Shutemov S.V. Perspektivy ispolzovaniia tsilindricheskogo lineinogo ventilnogo dvigatel'ia v kachestve privoda plunzhernykh neftedobychnykh agregatov [Prospects for the use of a cylindrical linear electronic motor as a drive for plunger oil production units]. *Fundamentalnye issledovaniia*, 2016, vol. 4, no. 12, pp. 795-799.

14. Vdovin E.Iu., Lokshin L.I., Semenov V.V., Korotaev A.D., Ogarkov E.M. Promyshlennoe ispolzovanie 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 oil fields of the Perm region]. *Avtomatizatsiia v elektroenergetike i elektrotekhnike. Materialy II Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii (Perm, 21-22 April 2016)*. Perm: Permskii natsionalnyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2016, pp. 212-222.

15. Semenov V.V., Chazov G.A. Perspektivy effektivnogo ispolzovaniia glubinno-nasosnogobesshtanogovogo porshneвого агрегата s lineinym dvigatelem [Prospects for the effective use of deep-pumping rod-type piston unit with a linear motor]. *Geologiya, razrabotka, burenie i ekspluatatsiia neftiannykh mestorozhdenii Permskogo Priuralia*. Moscow, 1978, pp. 90-95.

16. Vdovin E.Iu., Lokshin L.I. Ustanovka nasosnaia s lineinym privodom [Pumping unit with linear drive]. *Ekspozitsiia. Neft. Gaz*. Neftekamsk, 2016, no. 1, pp. 42-43.

17. Kliuchnikov A.T., Korotaev A.D., Shulakov N.V., Shutemov S.V. Tsilindricheskii lineinyi ventilnyi elektrodvigatel dlia pogruzhnogo besshtanogovogo nasosa [Cylindrical linear electronic motor for submersible rodless pump]. *Avtomatizatsiia v elektroenergetike i elektrotekhnike. Materialy I Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii (Perm, 24-25 September 2015)*. Perm: Permskii natsionalnyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2015, pp. 158-162.

18. Kliuchnikov A.T., Korotaev A.D., Chirkov D.A. Metod rascheta magnitnoi tsepi tsilindricheskogo lineinogo ventilnogo dvigatel'ia po skheme zameshcheniia [Cylindrical linear electronic motor magnetic circuit calculating method according to equivalent circuit]. *Informatsionno-izmeritelnye i upravliaiushchie sistemy*, 2010, vol. 14, no. 9, pp. 64-69.

19. Chirkov D.A., Korotaev A.D., Kliuchnikov A.T. Raschet osnovnykh parametrov tsilindricheskogo lineinogo ventilnogo dvigatelya po skheme zameshcheniia [Calculation of the cylindrical linear electronic motor main parameters according to equivalent circuit]. *Avtomatizatsiia v elektroenergetike i elektrotekhnikе. Materialy II Mezhdunarodnoi nauchnotekhnicheskoi konferentsii (Perm, 21-22 April 2016)*. Perm: Permskii natsionalnyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2016, pp. 144-149.

20. Vishniakov S.V., Gordiukhina N.M., Fedorova E.M. Raschet elektromagnitnykh polei s pomoshchiu programmnoho kompleksa ansys: uchebnoe posobie po kursu "Teoriia elektromagnitnogo polia" po napravleniiu "Informatika i vychislitel'naiia tekhnika" [The calculation of electromagnetic fields using the software package ANSYS: a manual for the course "Theory of the electromagnetic field" in the direction of "Computer Science and Computer Engineering"]. Ed. Iu.A. Kazantsev. Moscow: МЭИ, 2003. P. 100.

### **Сведения об авторах**

**Чирков Дмитрий Андреевич** (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: chirkov146@mail.ru).

**Ключников Анатолий Терентьевич** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: aklu2011@pstu.ru).

**Коротаев Александр Дмитриевич** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: lis@pstu.ru).

**Тимашев Эдуард Олегович** (Москва, Россия) – кандидат технических наук, директор департамента технического регулирования и развития Корпоративного научно-проектного комплекса НК «Роснефть» (119333, Москва, Ленинский пр. 55/1, e-mail: e-timashev@rosneft.ru).

### **About the authors**

**Chirkov Dmitrii Andreevich** (Perm, Russian Federation) is a Post-graduate of the Department of Electrical engineering and Electromechanics Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: chirkov146@mail.ru).

**Klyuchnikov Anatolii Terentevich** (Perm, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical engineering and Electromechanics Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: aklu2011@pstu.ru).

**Korotaev Alexander Dmitrievich** (Perm, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical engineering and Electromechanics Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: lis@pstu.ru).

**Timashev Eduard Olegovich** (Moskov, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Director of the Department of Technical Regulation and Development of the Corporate Scientific and Project Complex Oil Company “Rosneft” (119333, Moscow, 55/1, Leninsky pr., e-mail: e-timashev@rosneft.ru).

Получено 08.10.2018