

УДК 621.313.8

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЛИНЕЙНОГО ВЕНТИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ПОГРУЖНОГО БЕСШТАНГОВОГО НАСОСА****Шутемов С.В.***ГОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,  
Пермь, e-mail: shutemsv@yandex.ru*

В статье рассмотрено исследование цилиндрического линейного вентильного электродвигателя для погружного бесштангового насоса. Проведено определение сил трения вторичного элемента об индуктор при различных конструкциях индуктора. Трение вторичного элемента об индуктор возникает из-за наличия эффекта тяжения. Рабочим усилием цилиндрического линейного вентильного двигателя является осевое усилие, которое создает возвратно-поступательное движение бесштангового насоса, находящегося в скважине. Усилие тяжения возникает из-за смещения вторичного элемента цилиндрического линейного вентильного двигателя относительно оси индуктора. При этом зазор между индуктором и вторичным элементом неравномерен. В результате экспериментальных исследований выяснилось, что усилие тяжения, а значит, и трение, значительно и его необходимо учитывать в работе ЦЛВД. На основе опытных данных был сделан вывод о необходимости использования немагнитных центраторов, расположенных определенным образом, для снижения сил трения, а также необходимости изменения конструкции индуктора на осесимметричную.

**Ключевые слова:** цилиндрический линейный вентильный двигатель, постоянные магниты, магнитный зазор, вторичный элемент, индуктор, усилие тяжения, угловая статическая характеристика, привод

**INVESTIGATION OF CYLINDRICAL LINEAR VALVE ELECTRIC MOTORS FOR SUBMERSIBLE RODLESS PUMP****Shutemov S.V.***Perm National Research Polytechnic University, Perm, e-mail: shutemsv@yandex.ru*

The article deals with the study of the cylindrical linear motor valve for rodless submersible pump. A determination of the secondary element of the friction forces of the inductor at different inductor designs. The friction element of the secondary inductor arises because of the attraction effect. Operating force of the cylindrical linear motor valve is an axial force which generates the reciprocating movement without boom pump located downhole attraction force arises from the displacement of the secondary element of the linear cylindrical valve engine with respect to the axis of the inductor. At the same time the gap between the inductor and secondary element is uneven. As a result of experimental studies have shown that pulling force, and hence the friction considerably and it is necessary to consider the CLEM. On the basis of experimental data, it was concluded that the need to use non-magnetic centralizers arranged in a certain way, to reduce the friction forces, as well as the need to change the inductor design on a rotationally symmetrical.

**Keywords:** cylindrical linear valve engine, permanent magnets, magnetic gap, secondary element, inductor, pulling force, the static characteristic, drive

**Цилиндрический линейный вентильный электродвигатель (ЦЛВД)** можно использовать для электроприводов возвратно-поступательного движения различных общепромышленных механизмов, а также в нефтедобывающей промышленности для бесштанговой добычи нефти из скважин, в качестве альтернативы широко распространенных в настоящее время станков-качалок. Для этого ЦЛВД включают в состав «Погружного бесштангового электронасосного агрегата» (ПБЭНА) с целью добычи нефти из малодебитных скважин. Основным принципом действия штангового насоса является возвратно-поступательное движение поршня, связанного посредством штока с электродвигателем типа ЦЛВД.

С применением ПБЭНА становится возможна добыча нефти в скважинах глубиной более двух километров,

с большой кривизной, а также в горизонтальных скважинах. При использовании агрегата исчезает потребность подготовки фундамента под станок-качалку, что существенно снижает риски консервации таких скважин. Это позволит более тщательно производить отбор нефти из стареющих месторождений и, соответственно, повысить коэффициент извлечения нефти. Также применение ПБЭНА должно снизить затраты электроэнергии, что обусловлено отсутствием трения при необходимости подъема веса колонны штанг, что рассмотрено в [1].

ЦЛВД вместе с плунжерным насосом опускается в скважину, а на обмотку двигателя с помощью длинного кабеля подается трехфазное напряжение от преобразователя частоты (ПЧ), который находится на поверхности вблизи устья скважины.

ЦЛВД с постоянными магнитами конструктивно отличается от обычных электрических машин лишь тем, что магнитное поле перемещается по прямой, т.е. по направлению оси вторичного элемента. Но принцип действия, основанный на движении электромагнитного поля и создании электромагнитных сил, сохраняется и соответствует принципу действия обычного синхронного двигателя (СД).

### Проектирование ЦЛВД

При проектировании использовалась модульная структура построения ЦЛВД, все модули образуют в результате единый двигатель (рис. 1). Модули соединяются между собой в единый индуктор последовательно, для получения необходимой величины усилия на вторичном элементе. Между модулями расположены подшипники скольжения. Каждый модуль индуктора состоит из 96 зубцовых делений. Все расчеты проводились для одного модуля ЦЛВД. Внешний диаметр индуктора определялся размером обсадных труб скважины. Внутренний диаметр выбирали из необходимого компромисса между максимальным диаметром вторичного элемента с магнитами, с одной стороны, и необходимостью уложить в элемент магнитопровода индуктора как можно большее количество ампер-витков, для увеличения линейной токовой нагрузки и тягового усилия.

Толщина элемента магнитопровода определяет длину полюсного деления и рабочую частоту питающего напряжения. Значение толщины элементов магнитопровода оптимизируется при расчете, что было показано в [5].

Особенностью вентильного двигателя (ВД) является использование преобразователя частоты – коммутатора (ПЧ), работающего согласованно с датчиком положения вторичного элемента (ДП). При таком сочетании СД с преобразователем и датчиком положения электрическую машину можно называть бесконтактным двигателем постоянного тока или ВД, что рассмотрено в [3]. Таким образом, основой для расчета характеристик ЦЛВД является теория синхронных машин.

### Характеристики ЦЛВД

ЦЛВД состоит из неподвижного круглого индуктора и штока с постоянными магнитами. Постоянные магниты группы 4МКГ46×21×8 имеют следующие параметры:  $H_c = 1400$  кА/м,  $B_r = 1,2$  Тл. Продольный разрез ЦЛВД (индуктора и вторичного элемента) показан на рис. 2. На индукторе имеются зубцы и пазы, в которых находятся цилиндрические катушки индуктора. Полюсное деление  $\tau = 30$ , а зубцовое деление  $t_z = 10$ .

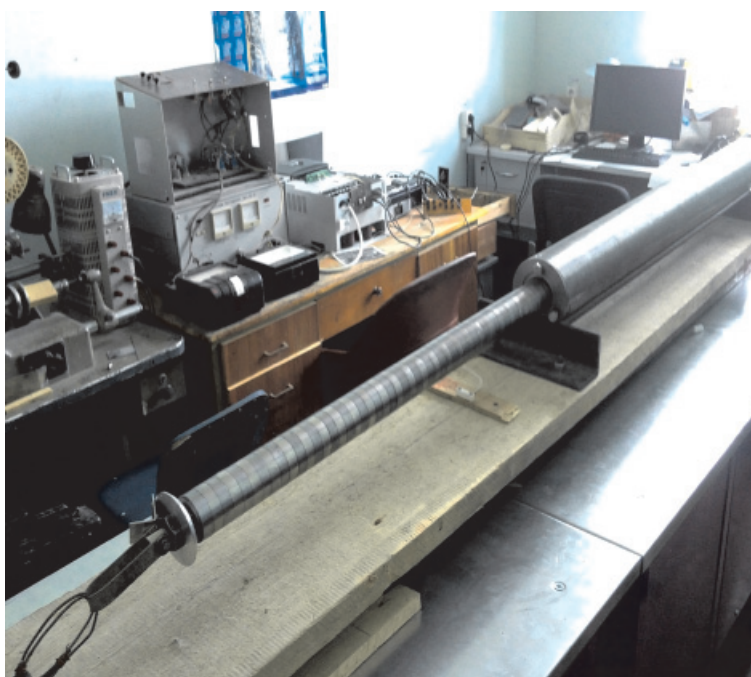


Рис. 1. Стенд для испытаний модуля ЦЛВД

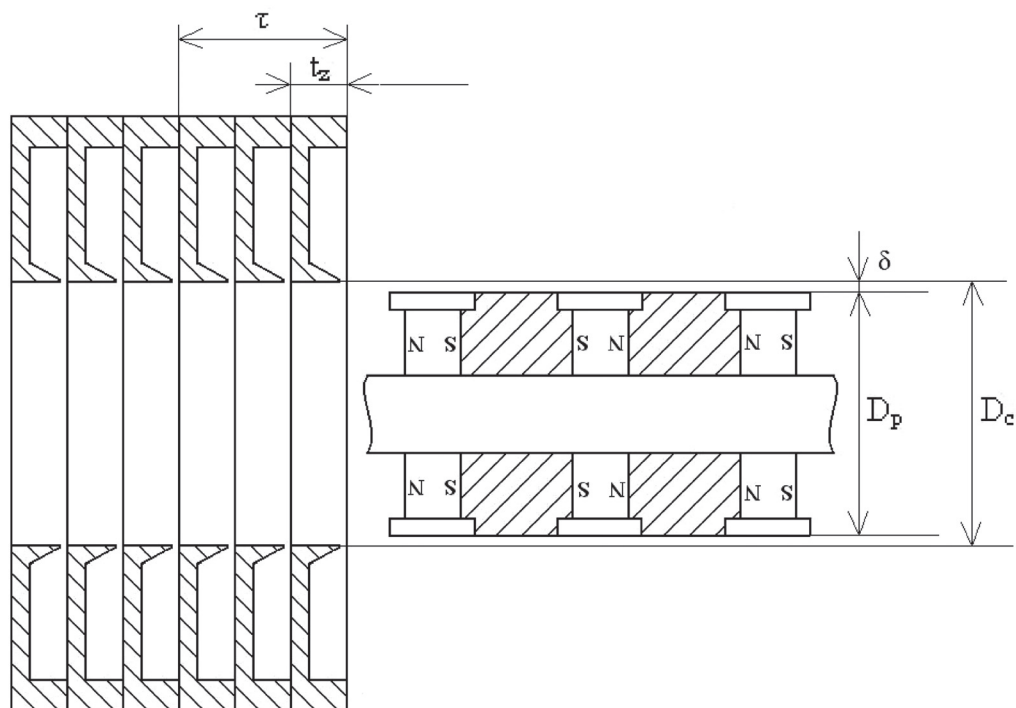


Рис. 2. Продольный разрез индуктора и вторичного элемента

Катушки соединяются последовательно на протяжении длины индуктора и образуют трехфазную обмотку, которая питается от преобразователя частоты (ПЧ). Обмотка цилиндрического индуктора создает бегущее магнитное поле, скорость движения которого и направление изменяются с помощью ПЧ, что описано в [4].

Вторичный элемент имеет диаметр  $D_p = 53$ . Зазор  $\delta$  между индуктором и вторичным элементом составляет 1,5 мм по всей длине. Ротор (вторичный элемент) имеет симметричное положение, т.е. горизонтальная ось проходит по середине штока, а зазор между индуктором и вторичным элементом составляет 1,5 мм по всей длине. В этом случае результирующее усилие тяжения между индуктором и вторичным элементом равно нулю. Концы штока вторичного элемента выступают за пределы цилиндрического индуктора с обеих сторон и закрепляются в подшипниках скольжения.

В случае износа подшипников зазор между индуктором и вторичным элементом может быть неравномерным, что приводит к появлению усилия тяжения к одной из поверхностей индуктора. Шток вторичного элемента изгибается, и этот факт приводит к еще большему изменению рабочего зазора.

Неравномерность рабочего зазора приводит к появлению радиальных усилий при-

тяжения вторичного элемента к индуктору, в результате чего зазор с одной стороны будет равен нулю, а с противоположной будет максимальным (рис. 3). В этом случае силы трения между индуктором и вторичным элементом значительно увеличатся, что приведет к уменьшению силы на выходе штока и возникнет дополнительный износ поверхностей индуктора и вторичного элемента.

Усилие тяжения приводит к значительным трудностям при сборке и эксплуатации ЦЛВД, когда вторичный элемент вставляется в индуктор. При одностороннем тяжении вторичный элемент становится на перекосяк и притягивается к индуктору, при этом возникают большие тормозные силы, которые с трудом приходится преодолевать.

Как показывает практика расчета магнитных систем с постоянными магнитами, магнит ведет себя как источник потока, аналогично источнику тока. Это связано с тем, что его внутреннее сопротивление значительно больше всех магнитных сопротивлений магнитной цепи. В этом случае влияние зазора на тяговое усилие не столь значительно по сравнению с другими типами двигателей. В связи с этим принимаем допущение, что расчет магнитной индукции производится при условии равномерного зазора по длине окружности, равной зазору расчетной секции.

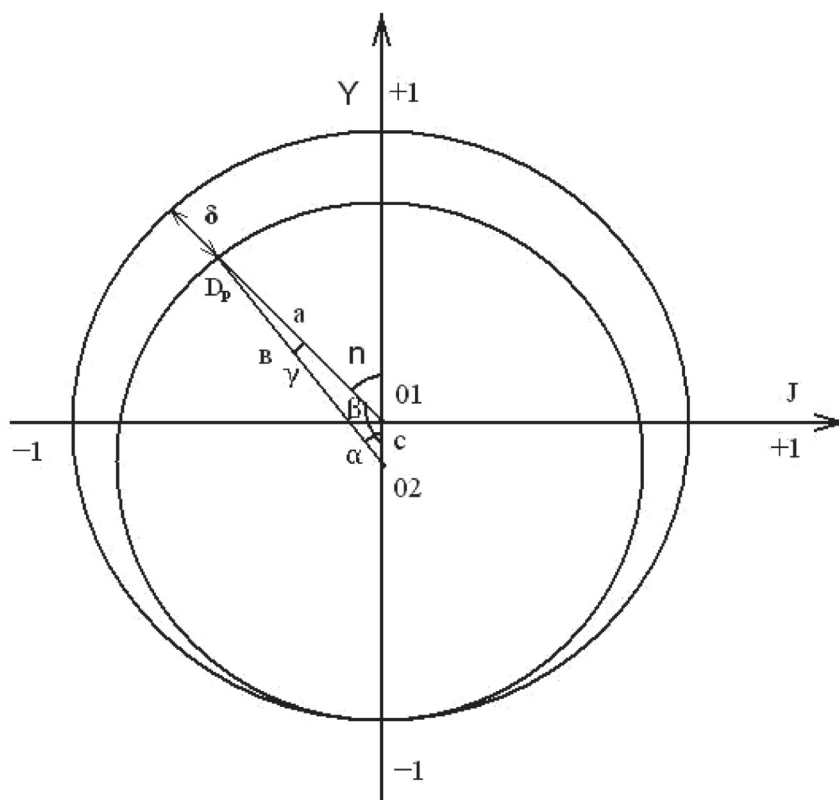


Рис. 3. Определение величины зазора  $\delta$  в поперечном сечении ЦЛВД

В результате расчетов получаем величину силы тяжения, необходимой для расчета трения вторичного элемента об индуктор. В результате расчета, приведенного ранее в [2], выяснилось, что усилие тяжения значительно и его необходимо учитывать для определения сил трения. На основе данного анализа был сделан вывод о необходимости использования немагнитных центраторов, которые устанавливаются на

вторичном элементе на определенном расстоянии друг от друга. Также возможен вариант применения осесимметричной конструкции индуктора, которая значительно уменьшает эффект тяжения.

#### Усилие на вторичном элементе ЦЛВД

Силу на вторичном элементе можно изменять с помощью тока ЦЛВД. При этом следует учесть, что электромагнитная сила

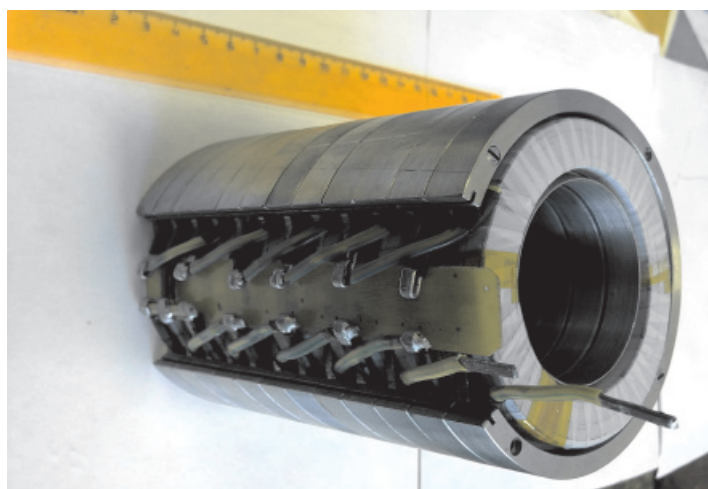


Рис. 4. Вариант индуктора с одним пазом под трехфазную обмотку



превышает силу, зафиксированную динамометром, на величину сил трения штока в подшипниках. Зависимость усилия, которое равно разности электромагнитного усилия и силы трения, равно

$$F = F_{\text{э}} - F_{\text{тр}}$$

Первая изготовленная конструкция не дала необходимого усилия в 4 кН на штоке. Усилие оказалось равно 3–3,5 кН. Это связано с асимметрией радиального магнитного поля между индуктором и вторичным элементом из-за наличия одного паза под концы соединяемых трехфазных обмоток (рис. 4).

Из-за асимметрии радиального магнитного потока вторичный элемент притягивался к индуктору, создавая дополнительное механическое трение, уменьшавшее полезное усилие.

Для устранения этого вредного эффекта была изменена конструкция индуктора. Для уменьшения трения и центрирования вторичного элемента в модуле был добавлен промежуточный подшипник скольжения.

Кроме того изменили конструкцию пазов индуктора для размещения концов трехфазной обмотки. Сделали три симметричных выреза через 120 градусов, в каждый из которых уложили концы своих фаз (рис. 5).

В таблице приведены данные экспериментальных замеров усилий и тока двигателя для этих двух вариантов. Для варианта индуктора с одним пазом под трехфазную обмотку (1×3ф) и варианта индуктора с тремя симметричными пазами, каждый под свою фазу (3×1ф). Сравнение вариантов позволяет выбрать искомую конструкцию с максимальным усилием на вторичном элементе.

Проведенные исследования по проблеме эффекта тяжения и методах его устранения за счет изменения конструкции ЦЛВД позволило решить ряд важных теоретических и практических проблем, достичь расчетных усилий, предусмотренных техническим заданием.

### Заключение

В результате исследований получили величины сил трения вторичного элемента об индуктор для различных конструкций ЦЛВД. Выяснилось, что трение значительно и его необходимо учитывать при работе ЦЛВД. На основе анализа величин сил тяжения и трения был сделан вывод о необходимости использования немагнитных центраторов для снижения сил трения. Для уменьшения трения и центрирования вторичного элемента в модуле был добавлен промежуточный подшипник скольжения.



Рис. 5. Вариант индуктора с тремя симметричными пазами, каждый под свою фазу

1×3ф	F	50	95	140	185	215	240	265	280	295	310
3×1ф	F	50	95	140	185	225	255	300	345	395	420
	I, A	8	10,5	13	15	17,5	20	23	26	29	32

Для устранения вредного эффекта тяжения была изменена конструкция индуктора. Изменению подверглась конструкция пазов индуктора для размещения концов трехфазной обмотки. В результате конструкция индуктора стала осесимметричной. Такое изменение конструкции необходимо для более равномерного распределения радиального магнитного поля. Изменение конструкции индуктора позволило достичь значительного роста усилий на штоке вторичного элемента, которое не может быть объяснено устранением сил тяжения. Такой рост усилия на штоке вторичного элемента связан с ослаблением эффекта насыщения магнитопровода с ростом тока. Скорей всего, это происходит за счет более равномерного распределения магнитного потока.

*Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «ПНИПУ» при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 02.G25.31.0068 от 23.05.2013 г. в составе мероприятия по реализации постановления Правительства РФ № 218).*

#### Список литературы

1. Ключников А.Т., Коротаев А.Д., Шутемов С.В. Моделирование цилиндрического линейного вентильного двигателя // Электротехника. – 2013. – № 11. – С. 14–17.
2. 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. – 2013. – № 6; URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=11637>.
3. 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.
4. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным управлением. – М.: Академия, 2006 – 272 с.
5. Шулаков Н.В., Шутемов С.В. Метод расчета электромагнитных процессов в цилиндрическом линейном вентильном двигателе // Электротехника. – 2014. – № 11. – С. 18–22.

#### References

1. Kljuchnikov A.T., Korotaev A.D., Shutemov S.V. Modelirovanie cilindricheskogo linejnogo ventilnogo dvigatelja // Jelektrotehnika. 2013. no. 11. pp. 14–17.
2. Mirzin A.M., Korotaev A.D., Shutemov S.V. Usilie tjazhenija cilindricheskogo linejnogo ventilnogo dvigatelja s postojannymi magnitami mezhdu statorom i vtorichnym jelementom // Sovremennye problemy nauki i obrazovanija. 2013. no. 6; URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=11637>.
3. Ovchinnikov I.E., Advolotkin N.P. Zakonomernosti proektirovanija ventilnyh dvigatelej s postojannymi magnitami dlja stankov s CHPU i drugih mehanizmov // Jelektrotehnika. 1988. no. 7. pp. 59–65.
4. Sokolovskij G.G. Jelektroprivody peremennogo toka s chastotnym upravleniem. M.: Akademiya, 2006 272 p.
5. Shulakov N.V., Shutemov S.V. Metod rascheta jelektromagnitnyh processov v cilindricheskom linejnom ventilnom dvigatele // Jelektrotehnika. 2014. no. 11. pp. 18–22.