

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЛИНЕЙНОГО ВЕНТИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Коротаев А.Д., Шулаков Н.В., Шутемов С.В.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, e-mail: [shutemsv@yandex.ru](mailto:shutemsv@yandex.ru)

**Аннотация** – Описана конструкция линейного вентильного электродвигателя для погружного электронасосного агрегата. Приведены результаты его исследований.

**Ключевые слова** – линейный вентильный двигатель, результаты эксперимента.

Цилиндрический линейный вентильный электродвигатель (ЦЛВД) разработан для погружного бесштангового электронасосного агрегата (ПБЭНА), для добычи нефти из малодебитных скважин. ПБЭНА должен выполнять функцию, аналогичную функции станка-качалки с приводом глубинного штангового плунжерного насоса. В основе работы насоса – возвратно-поступательное движение поршня, связанного посредством штока с электродвигателем типа ЦЛВД. С применением ПБЭНА становится возможна добыча нефти в скважинах 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. При использовании ПБЭНА должны снизиться затраты электроэнергии, что обусловлено отсутствием необходимости подъема колонны штанг.

ЦЛВД состоит из неподвижного круглого индуктора и штока с постоянными магнитами. Постоянные магниты группы 4МКГ46х21х8, имеющие следующие параметры:  $H_c = 1400$  кА/м,  $B_r = 1,0$  Тл. Продольный разрез ЦЛВД (статора и ротора) показан на рис. 1. На индукторе имеются зубцы и пазы, в которых находятся цилиндрические катушки статора. Полюсное деление  $\tau = 30$  мм, а зубцовое деление  $t_z = 10$  мм. Катушки трехфазной обмотки соединены последовательно и питаются от преобразователя частоты (ПЧ). Обмотка цилиндрического индуктора создает бегущее магнитное поле, скорость движения которого и направление изменяются с помощью ПЧ. Ротор имеет диаметр  $D_p = 53$ . Зазор  $\delta$  между статором и ротором составляет 1,5 мм по всей длине.

Известно, что скорость движения магнитного поля в воздушном зазоре ЦЛВД определяется частотой питающего напряжения –  $f$  и межполюсным расстоянием –  $\tau$ , которое неизменно в конкретном двигателе, и в нашем случае равно  $\tau = 0,03$  м.

В вентильном двигателе – ЦЛВД скорость магнитного поля определяется выражением

$$V_{эм} = 2 \cdot \tau \cdot f . \quad (1)$$

Так как в ЦЛВД скорость магнитного поля равна скорости штока, то максимальная частота питающего напряжения, подаваемого на обмотку статора двигателя, равна

$$f_{max} = \frac{V_{max}}{2 \cdot \tau} . \quad (2)$$

Напряжение источника энергии – преобразователя частоты определяется по закону

$$U = 2 \cdot R_1 \cdot I_{зад} + \Delta U \cdot f , \quad (3)$$

где:  $R_1$  – сопротивление обмотки статора;  $I_{зад}$  – ток статора прямого движения,  $\Delta U$  – добавка напряжения на один герц частоты

Для динамических испытаний работы привода ЦЛВД был изготовлен стенд. Общий вид этого стенда представлен на рис.2. Индуктор неподвижен, а шток совершает возвратно-поступательные движения с различной величиной хода и частоты. Одно направление движения штока является рабочим (перемещение вверх). В этом направлении перемещается груз наибольшей величины. В обратном направлении шток перемещается без груза в режиме холостого хода до исходного положения. Связь штока и груза осуществляется с помощью троса перекинутого через блок. Один конец троса соединен со штоком, а второй с платформой, на которой находится груз. Величину этого груза можно менять.

ЦЛВД питается от ПЧ, который в свою очередь управляется компьютером через кабельную связь RS-485. Управление электроприводом ЦЛВД позволяет регулировать число двойных ходов от 0,2-6 и ход штока в одном направлении в пределах от 1,2-2 м в соответствии с техническим заданием. Трос соединен со штоком ЦЛВД с помощью динамометра, по показаниям которого определяется сила подъема груза. Эту силу можно изменять с помощью тока ЦЛВД. При этом следует учесть, что электромагнитная сила превышает силу, зафиксированную динамометром, на величину сил трения штока в подшипниках.

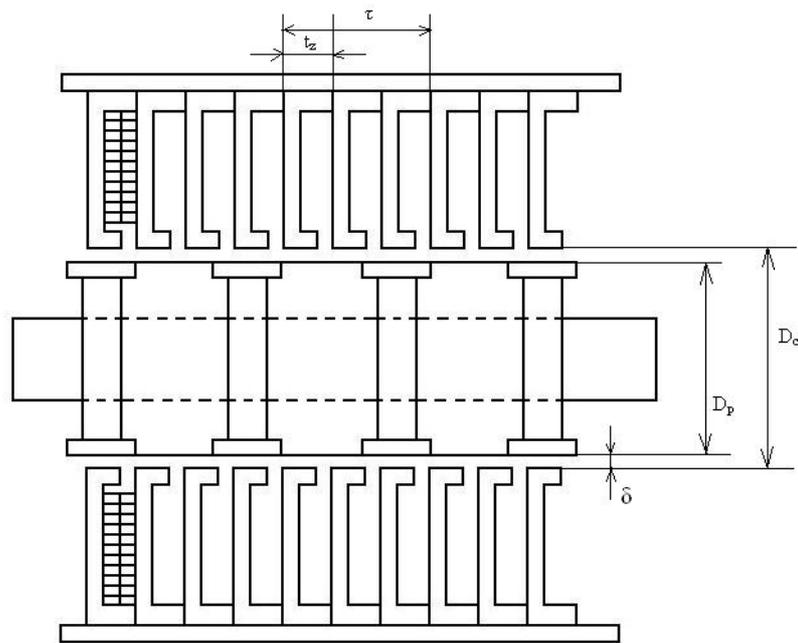


Рис.1. Продольный разрез статора и ротора



Рис.2. Стенд для динамических испытаний работы привода ЦЛВД

В таблице 1 приведены данные экспериментальных замеров усилий и тока двигателя.

Таблица 1

F, кг	50	95	140	185	215	240	265	280	295	310
I, A	8	10,5	13	15	17,5	20	23	26	29	32

На рис.3 показана зависимость замеренного усилия, которое равно разности электромагнитного усилия и силы трения, т.е.

$$F = F_3 - F_{тр} . \quad (4)$$

Непрерывной линией показана зависимость тягового усилия от фазного тока. В начальной части (т. «а») кривой видна линейная связь замеренного усилия с током статора. При достижении значения усилия  $F_{ном} = 300$ кГ фазный ток равен 30А, что соответствует точке «в».

При снятии статической угловой характеристики модуля ЦЛВД было получено максимальное усилие  $F_3 = 350$  кГ. При этом шток перемещается внешним усилием с помощью ручной тали. Это усилие равнялось сумме электромагнитного усилия ЦЛВД и сил трения, т.е.

$$F_3 = F_3 + F_{тр} . \quad (5)$$

Электромагнитное усилие в этих двух случаях по формулам (4 и 5) предполагается одинаковым, т.е.

$$F_3 + F_{тр} = F - F_{тр} . \quad (6)$$

Поэтому получаем величину сил трения

$$F_{тр} = (F_3 - F) / 2 = (350-300) / 2 = 25 \text{ кГ} \quad (7)$$

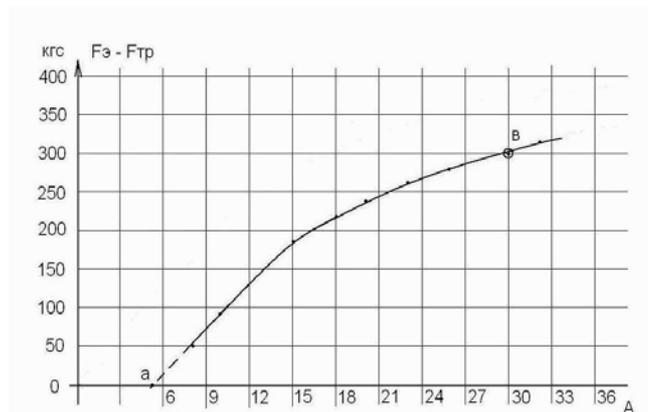


Рис.3. Усилие на штоке ЦЛВД в зависимости от тока

Причины снижения тягового усилия в верхней части зависимости  $F = f(I)$  следующие:

1. Насыщение рабочих ферромагнитных участков в статоре.

2. Возрастание сил трения внутри статора, обусловленное увеличением тока и индукции на участках воздушного зазора.

Известно, что силы радиального притяжения зависят от индукции в квадратичной зависимости. Эти силы можно существенно уменьшить, при условии, что зазор будет поддерживаться равномерно по окружности статора.

Для увеличения тягового усилия ЦЛВД необходимо завершить работы по созданию уточненного метода расчета рабочих характеристик, на базе которого провести многовариантные расчеты с целью оптимизации параметров и геометрических размеров модуля ЦЛВД. Оптимизацию целесообразно провести по следующим основным направлениям:

- заменить использованные магниты с индукцией 1 Тл на магниты с большей индукцией порядка 1,2 Тл, что позволит пропорционально увеличению индукции увеличить тяговое усилие;
- оптимизировать зубцовое деление и длину полюсного деления;
- с целью уменьшения усилий одностороннего тяжения, действующего на ротор, выполнить симметричную магнитную систему с расположением фазных каналов под углом  $120^\circ$  по окружности статора, и тем самым уменьшить силу трения;
- рассчитать усилия одностороннего тяжения и определить необходимость и число центраторов на единице длины;
- замена проводников обмотки статора с более высокой температурой изоляции, что позволит увеличивать токовую нагрузку и тяговое усилие.

Как показали эксперименты, максимальное тяговое усилие составляет 300 кГс, что соответствует току двигателя равному 30 А. Опускание груза в исходное состояние осуществляется небольшим усилием, для создания которого достаточен ток, который составляет 1/3 часть от номинального тока.

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).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ключников А.Т., Кортаев А.Д., Шутемов С.В. Моделирование цилиндрического линейного вентильного двигателя. – Электротехника, 2013, №11.
2. Овчинников И.Е., Адволоткин Н.П. Закономерности проектирования вентильных двигателей с постоянными магнитами для станков с чпу и других механизмов.- Электротехника, 1988, №7.
3. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным управлением. М.,: «Академия», 2006 - 272 с.
4. Шимчак И.В. Инновационные конструкции магнитных систем синхронных машин с постоянными магнитами.- Электричество, 2009, №9.