

## ОТЗЫВ

официального оппонента кандидата технических наук, доцента каф. ЭЭС УрФУ Дмитриевского Владимира Александровича на диссертацию Шутемова Сергея Владимировича «Разработка и исследование модуля линейного вентильного электродвигателя для погружных нефтедобывающих насосов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

**Актуальность темы.** Станки-качалки, применяемые при добыче нефти, не удовлетворяют существующим требованиям из-за существенных недостатков. На сегодняшний момент главной их проблемой является невозможность добычи нефти на средне- и малодобитных скважинах при глубинах от 2000 м и более. В диссертационной работе предложено альтернативное решение – это использование электропривода на базе линейных машин. В работе обосновывается создание такого электропривода с использованием цилиндрического линейного вентильного двигателя, предлагается и разрабатывается конструкция цилиндрического линейного вентильного двигателя, который является основным элементом привода погружного бесштангового электронасосного агрегата для добычи нефти.

Расчет параметров и характеристик цилиндрического линейного вентильного двигателя сталкивается с затруднениями из-за необходимости провести большое количество расчетов. Это связано с тем, что необходимо провести выбор рациональной конструкции всех элементов и узлов цилиндрического линейного вентильного двигателя с постоянными магнитами. Рациональная конструкция цилиндрического линейного вентильного двигателя позволяет получить максимальные мощность и тяговое усилие при малом диаметре скважины и ограниченной длине индуктора.

Оптимизация характеристик цилиндрического линейного вентильного двигателя требует проведения большого количества расчетов: необходимо провести выбор рациональной конструкции всех элементов и узлов цилиндрического линейного вентильного двигателя с постоянными магнитами. Оптимизированная конструкция цилиндрического линейного вентильного двигателя позволяет получить максимальные мощность и тяговое усилие при малом диаметре скважины и ограниченной длине индуктора.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций,** сформулированных в диссертации, достаточна, поскольку она подтверждаются математической моделью, расчётом и экспериментом. Математическая модель построена на подмене конструкции цилиндрического линейного вентильного двигателя двигателем вращательного действия с той же структурой зазора.

**Структура и объем диссертации** соответствуют требованиям, предъявляемым к работам на соискание ученой степени кандидата технических наук.

В первой главе представлен достаточный обзор существующих методов добычи нефти с использованием современного электропривода. Производится обоснование применения цилиндрического линейного вентильного двигателя в качестве привода погружного плунжерного электронасосного агрегата для нефтяных скважин в зависимости от глубины и режима работы. Описывается современное состояние электропривода в составе нефтедобычных агрегатов. В результате анализа сформулирована задача исследования и намечены пути ее решения.

Во второй главе описывается математическая модель электромагнитных процессов в модуле линейного вентильного электродвигателя. Описан алгоритм расчета цилиндрического линейного вентильного двигателя методом конечных элементов на основе идеализированной математической модели.

В третьей главе описано преобразование геометрии цилиндрического линейного вентильного двигателя от трехмерной к двухмерной, производится расчет характеристик модуля линейного вентильного электродвигателя.

В четвертой главе рассматриваются возможные конструкции элементов индуктора и вторичного элемента модуля линейного вентильного электродвигателя. Производится выбор наиболее рациональной конструкции цилиндрического линейного вентильного двигателя с точки зрения получения максимального тягового усилия.

В пятой главе описывается конструкция и технология сборки модуля цилиндрического линейного вентильного двигателя, стенды для его испытания в статическом и динамическом режимах, а также результаты испытаний. По результатам испытаний представлено сопоставление экспериментальных характеристик цилиндрического линейного вентильного двигателя с расчетными. В результате сравнения расчетных и измеренных угловых характеристик выяснено, что расчетное максимальное усилие оказалось выше на 5-20 процентов по сравнению с экспериментальными значениями в различных участках угловой характеристики. Различие между расчетом и экспериментом растет при уменьшении рабочего тока и не превышает 20 процентов. Выполненная экспериментальная проверка полученных результатов соответствует инженерной точности.

В шестой главе проведено исследование влияния тяжения между индуктором и вторичным элементом при нарушении однородности зазора на тяговое усилие цилиндрического линейного вентильного двигателя. Рассматривается возможное изменение конструкции элементов модуля линейного вентильного электродвигателя для уменьшения влияния эффекта тяжения. Производится выбор наиболее рациональной конструкции

цилиндрического линейного вентильного двигателя с учетом необходимости ослабления данного эффекта.

**Основные результаты** диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Обосновано применение цилиндрического линейного вентильного двигателя в качестве привода погружного бесштангового электронасосного агрегата вместо станка-качалки.
2. Разработана математическая модель электромагнитных процессов, протекающих в модуле цилиндрического линейного вентильного двигателя.
3. Проведен анализ возможных конструкций элементов индуктора и вторичного элемента цилиндрического линейного вентильного двигателя. По результатам многовариантных расчетов проведен выбор наиболее рациональной конфигурации магнитной системы по параметру удельной величины тяги.
4. Различия расчётного значения тягового усилия и результатами экспериментального исследования модуля цилиндрического линейного вентильного двигателя равны 5% при максимальном токе. При уменьшении рабочего тока различия возрастают, но не превышает 20 процентов.
5. Исследование макета цилиндрического линейного вентильного двигателя при снятии угловых статических характеристик показало наличие зависящего от тока в обмотках эффекта тяжения вторичного элемента вследствие неоднородности зазора, значительно снижающего тяговое усилие на вторичном элементе. Устранение вредного эффекта тяжения реализовано за счет изменения конструкции индуктора. Изменению подверглась конструкция каналов в ярме индуктора для размещения соединительных проводов трехфазной обмотки. Изменение конструкции индуктора позволило достичь значительного роста усилий на штоке вторичного элемента.
6. Результаты данной работы использованы в ПНИПУ при разработке и создании конструкций цилиндрического линейного вентильного двигателя в составе привода погружного бесштангового электронасосного агрегата на ПАО «Мотовилихинские заводы». Подтверждена практическая возможность использования погружного модуля цилиндрического линейного вентильного двигателя в качестве привода плунжерного насоса.

**Научная новизна** заключается в следующем:

1. Разработана математическая модель и алгоритм расчёта электромагнитных процессов, протекающих в цилиндрическом линейном вентильном двигателе.
2. Результаты анализа магнитной цепи использованы при рассмотрении возможных вариантов конструкций элементов индуктора и вторичного элемента модуля линейного вентильного электродвигателя с целью увеличения удельной тяги.

3. Приведены результаты экспериментальных исследований опытного макета цилиндрического линейного вентильного двигателя.

4. Разработана методика расчета эффекта тяжения модуля цилиндрического линейного вентильного двигателя для определения сил трения вторичного элемента об индуктор.

**Достоверность результатов** диссертационной работы обоснована корректным использованием математического аппарата, законов электродинамики и магнитных цепей; достаточным совпадением результатов математического моделирования и экспериментальных данных, полученных при проведении стендовых испытаний цилиндрического линейного вентильного двигателя.

В публикациях автора достаточно полно отражены основные научные результаты данной диссертационной работы.

**Практическая ценность** результатов работы подтверждена успешной апробацией теоретических выводов работы. Результаты апробации докладывались и получили одобрение на научно-техническом совете с участием главных специалистов ПАО «Мотовилихинские заводы». Результаты данной работы использованы в ПНИПУ при разработке и создании конструкций цилиндрического линейного вентильного двигателя в составе привода погружного бесштангового электронасосного агрегата. Подтверждена практическая возможность использования погружного модуля цилиндрического линейного вентильного двигателя в качестве привода плунжерного насоса. Как указывается в актах внедрения результатов работы, спроектированные и изготовленные образцы удовлетворяют поставленным требованиям технического задания. Цилиндрический линейный вентильный двигатель в составе привода погружного бесштангового электронасосного агрегата может быть эффективно использован для отбора жидкости из скважин на большой глубине.

**Замечания** по диссертационной работе Шутемова С.В. заключаются в следующем:

1. Работа содержит некоторое количество опечаток, например, согласование падежей: «согласно формулы».
2. Целесообразно было бы использовать осесимметричную модель с азимутальной составляющей векторного магнитного потенциала  $A_\varphi$  в качестве независимой переменной поля.
3. Утверждается, что работа цилиндрического линейного вентильного двигателя на максимальной скорости увеличивает КПД, поскольку «потери в двигателе не изменяются в зависимости от частоты ПЧ и скорости движения вторичного элемента, а вот полезная мощность пропорционально зависит от скорости движения штока и соответственно частоты ПЧ». Необходимо уточнить, какой режим имеется в виду —

при одной и той же амплитуде напряжения, тока, при одном и том же моменте и т.п.  
До какой скорости сохраняется эта тенденция?

4. К сожалению, работа не содержит оценки вихревых и гистерезисных потерь в сплошных нешихтованных сердечниках.

### Заключение

Диссертационная работа Шутемова С.В. выполнена на высоком научном уровне, её содержание соответствует паспорту специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты, а результаты представляют значительный интерес в данной технической области. Замечания не влияют на положительную оценку диссертационной работы. Автореферат отражает основное содержание диссертации и полностью соответствует ей.

Диссертация «Разработка и исследование модуля линейного вентильного электродвигателя для погружных нефтедобывающих насосов» является законченной научно-квалификационной работой. В ней решена научная задача, имеющая большое значение для электромашиностроительной промышленности, для развития направления линейных вентильных машин.

Диссертационная работа удовлетворяет требованиям п.9 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым ВАК России к кандидатским диссертациям. Автор Шутемов Сергей Владимирович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты.

Официальный оппонент:

Дмитриевский Владимир Александрович

Канд. техн. наук (05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты),

доцент кафедры «Электротехника и

электротехнологические системы» ФГАОУ ВО

«Уральский федеральный университет имени первого

Президента России Б.Н. Ельцина».

620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19.

Тел.: +7 (343) 374-38-84

E-mail: vdmित्रievsky@gmail.com

Подпись Дмитриевского В. А. заверяю:

*Ученый секретарь УрФУ*

В.А. Дмитриевский

