

На правах рукописи



Чирков Дмитрий Андреевич

**ПОВЫШЕНИЕ ТЯГОВОГО УСИЛИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО
ЛИНЕЙНОГО ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2021

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», на кафедре «Электротехника и электромеханика»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Шулаков Николай Васильевич,

кандидат технических наук, доцент **Коротаев Александр Дмитриевич**

Официальные оппоненты:

Ганджа Сергей Анатольевич,

доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск, заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники»

Мошкин Владимир Иванович, доктор технических наук, доцент ФГБОУ ВО «Курганский государственный университет», г. Курган, заведующий кафедрой «Энергетика и технология металлов»

Ведущая организация:

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург

Защита диссертации состоится 16 марта 2021 г. в 14 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.082.06, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», по адресу: 420066 г. Казань, ул. Красносельская 51, ауд. Д-224, тел./факс (843)519-42-55.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, с указанием контактных данных и заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, КГЭУ, Ученому секретарю диссертационного совета Д 212.082.06.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Казанского государственного энергетического университета и на официальном сайте КГЭУ: <https://kgeu.ru/Diss/Dissertant/273?idDiss=108>

Автореферат разослан «___» января 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ш.Г. Зиганшин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Основой данной работы является совершенствование электропривода погружных бесштанговых насосных агрегатов (ПБНА) для добычи нефти из мало- и среднедебитных скважин глубиной более 2000 м. Работа по созданию ПБНА для подъёма жидкости из средне- и малодобитных скважин ведётся ещё с 20-х годов прошлого века. Основным направлением по созданию ПБНА была разработка цилиндрических линейных асинхронных двигателей (ЦЛАД). Тем не менее практического применения электропривод на основе ЦЛАД не получил из-за низких энергетических характеристик таких двигателей и невозможности позиционирования вторичного элемента. В 80-х годах высказывалась идея использования для добычи нефти линейного вентильного двигателя с совмещенной (двухфункциональной) обмоткой. Не смотря на значительное преимущество в силе, из-за ряда существенных недостатков он тоже не получил практического применения. В связи с появлением высококоэрцитивных постоянных магнитов стало возможным создание цилиндрического линейного вентильного двигателя (ЦЛВД) для привода ПБНА. Теоретические и экспериментальные исследования ЦЛВД проводились в ряде вузов России и, в частности, в ВГТУ, АГНИ, БГАУ, ЮРГПУ (НПИ). Используя отечественные и зарубежные исследования в корпорации «Триол» и в компании ООО «Ойл Автоматика» были созданы установки плунжерного насоса с линейным вентильным электроприводом. В настоящее время они находятся на опытно-промышленных испытаниях. Но наибольшего прогресса в разработке линейного погружного электродвигателя с постоянными магнитами добились учёные из КНР. Параллельно с КНР разработкой ЦЛВД начали заниматься учёные кафедры ЭТиЭМ ПНИПУ, в их числе: профессор Н.В. Шулаков, доцент А.Д. Коротаяев, доцент А.Т. Ключников, С. В. Шутёмов и др. Опытные образцы двигателя, разработанные и построенные на кафедре ЭТиЭМ, имеют удельное тяговое усилие на метр длины статора не более 4000 Н/м. Для создания ПБНА необходим, ЦЛВД не превышающий длиной 8 метров, а такое возможно, только если он будет развивать удельное тяговое усилие 5000 Н/м. До сих пор КНР является основным поставщиком ПБНА на рынок РФ, что в свою очередь может угрожать экономической и энергетической безопасности Российской Федерации. Основными проблемами производства ПБНА в РФ стали отсутствие конкурентоспособной конструкции ЦЛВД и доступных методик расчёта ЦЛВД. Именно решению этих проблем и была посвящена диссертационная работа. В связи с этим выполненные исследования являются актуальными и имеют высокие теоретическую значимость и практическую ценность.

Цели исследования: разработка методик расчёта ЦЛВД и повышение его тягового усилия, что позволит использовать его в качестве электропривода

ПБНА для скважин глубиной более 2000 метров.

Для достижения поставленных целей в работе решаются следующие задачи:

1. Разработка математических моделей и методик расчёта ЦЛВД, учитывающих насыщение магнитной цепи и позволяющих рассчитать рабочие характеристики двигателя.
2. Определение зависимости тягового усилия от геометрии, параметров двигателя и материалов, используемых в нём.
3. Разработка варианта конструкции двигателя, которая будет создавать удельное тяговое усилие на единицу длины статора не менее 5000 Н/м.

Объект исследования: цилиндрический линейный вентильный двигатель с постоянными магнитами.

Предмет исследования: зависимость тягового усилия ЦЛВД от его конструкции.

Научная новизна характеризуется следующими результатами:

1. Разработана математическая модель ЦЛВД, на основе которой создана новая методика расчёта на базе теории электрических и магнитных цепей, учитывающая насыщение магнитной цепи, что позволяет рассчитывать рабочие характеристики ЦЛВД и величину напряжения питания двигателя необходимую для достижения заданных скорости вторичного элемента и тягового усилия;
2. Впервые рассчитаны характеристики ЦЛВД с применением метода конечных элементов в цилиндрической системе координат, что позволяет рационализировать конструкцию ЦЛВД с целью получения большего тягового усилия и КПД и найти наиболее энергоэффективные алгоритм управления и способ питания двигателя;
3. В результате исследований получены основные закономерности зависимости тягового усилия от конструкции и основных параметров двигателя, что позволяет определить конструкцию ЦЛВД обладающую максимальным тяговым усилием и лучшими энергетическими характеристиками.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии теории расчёта и проектирования цилиндрических линейных вентильных двигателей с постоянными магнитами.

Практическая ценность работы. В результате исследования были:

1. Выявлены основные зависимости энергетических характеристик ЦЛВД от частоты питающего напряжения, что позволяет рационализировать алгоритм работы установки и повысить её энергоэффективность.
2. Разработаны рекомендации для проектирования ЦЛВД, обладающего наибольшими значениями тягового усилия и КПД.
3. Определена конструкция ЦЛВД развивающая удельное тяговое усилие на единицу длины статора 6350 Н/м, что позволяет создать погружной двигатель длиной 8 метров для добычи нефти из сверхглубоких скважин.

Проведенные исследования являлись частью научно-исследовательских и проектных работ, которые проводились в ФГБОУ ВПО «ПНИПУ» по заказу ОАО «Мотовилихинские заводы» (г.Пермь) 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). Также исследования выполнялись при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по государственному заданию FSNM-2020-0028. Результаты исследований реализованы при проектировании и расчетах цилиндрического линейного вентиляционного электродвигателя в качестве электропривода нового поколения для ПБНА в ООО «Ойл Автоматика» г. Уфа.

Методология и методы исследований. Теоретическая часть исследования основана на известных методах теоретической электротехники и теории электрических машин. Математическая модель ЦЛВД получена на базе теории электрических и магнитных цепей. Расчёты вариантов конструкции ЦЛВД проводились как с помощью математической модели ЦЛВД так и с помощью расчётной модели в цилиндрической системе координат в программе ANSYS Maxwell, основанной на использовании метода конечных элементов (МКЭ).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методика расчёта ЦЛВД методом конечных элементов в цилиндрической системе координат.
2. Рекомендации по выбору режимов работы ЦЛВД для получения наибольшего КПД.
3. Математическая модель ЦЛВД, основанная на теории электрических и магнитных цепей, учитывающая насыщение магнитной цепи.
4. Рекомендации по выбору параметров ЦЛВД для получения наибольших усилий.
5. Разработанная конструкция ЦЛВД, развивающая удельное тяговое усилие 6350 Н/м, что позволяет создать ПБНА для глубоких и сверхглубоких скважин.

Достоверность полученных результатов достигается использованием сертифицированной контрольно-измерительной аппаратуры и современных средств вычислительной техники, адекватностью полученных результатов и подтверждается соответствием проведённых расчётов по разным методам с экспериментальными данными.

Апробация работы. Основные результаты исследований и расчётов докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях:

- II Международная научно-техническая конференция «Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике» (Пермь, 2016 г.);
- Всероссийская научно-техническая конференция «Автоматизированные системы управления и информационные технологии» (Пермь, 2018 г.);

- Международная научная конференция «Высокие технологии и инновации в науке» (Санкт-Петербург, 2019 г.);
- Международная научно-практическая конференция «Радуга знаний: Теоретические и практические аспекты наук» (Ростов, 2019 г.);
- Международная научная конференция «Энергетика, экология и строительство» (Санкт-Петербург, 2019 г.);
- Международная научно-практическая конференция «Научно-практические исследования: технические науки» (Омск, 2020 г.).

Публикации. По теме данного диссертационного исследования опубликовано 11 научных работ, в том числе 4 публикаций в рецензируемых научных журналах, определённых ВАК по специальности 05.09.01, и 2 в журналах индексируемых в SCOPUS.

Личный вклад соискателя. Результаты, представленные в диссертации и отраженные в публикациях, получены при непосредственном участии соискателя. Автор сформулировал и разработал математическую модель ЦЛВД, основанную на теории электрических и магнитных цепей в цилиндрической системе координат. Разработал методику расчёта рабочих характеристик ЦЛВД методом конечных элементов в цилиндрической системе координат в программе ANSYS Maxwell. Исследовал зависимость тягового усилия от ширины, диаметра, материала магнитов, открытия паза, расчётного коэффициента полюсного деления, диаметра вторичного элемента на основании чего разработана конструкция двигателя, развивающего удельное тяговое усилие 6350 Н/м длины. Концептуальные положения работы, постановка задачи и анализ результатов обсуждались совместно с научным руководителем.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, библиографического списка используемых источников и приложений общим объемом 128 страниц. Основной текст изложен на 114 страницах машинописного текста, иллюстрирован 58 рисунками, 14 таблицами. Библиографический список включает 80 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** показана актуальность темы диссертации, сформулирована цель и поставлены задачи исследования. Описывается практическая ценность работы и ее новизна, утверждаются основные положения, выносимые на защиту. Приведены сведения об основных вопросах, рассмотренных в диссертации.

В **первой главе** представлены современное состояние нефтедобычных агрегатов РФ и достижения ПНИПУ по разработке ЦЛВД для ПБНА. На сегодняшний день на территории России преобладают два основных способа добычи нефти с помощью установок штанговых глубинных насосов (УШГН) и с помощью установок электроцентробежных насосов (УЭЦН). Наиболее распространённым видом механизированной добычи нефти являются УШГН,

которыми оборудовано более половины фонда эксплуатируемых нефтяных скважин. УШГН работают наиболее эффективно на низко- и среднедебитных скважинах. УШГН имеет ряд преимуществ перед другими механизированными способами добычи, основными из которых являются: относительно высокий КПД при низком или среднем дебите и объёмный тип насоса, подходящий к применению на скважинах с тяжёлой нефтью, на пескопроявляющих скважинах и при высоком газовом факторе. Помимо преимуществ УШГН имеют ряд существенных недостатков, наиболее существенным из которых является ограничение глубины добычи до 2000 метров из-за опасности обрыва колонны штанг. Следующим по распространённости способом добычи нефти является УЭЦН. Скважины, оборудованные УЭЦН, составляют около 35% всего фонда скважин. Основными преимуществами УЭЦН по сравнению со станками-качалками являются: малая металлоёмкость; возможность добычи на глубине более 2000 метров; возможность добычи в наклонно-направленных скважинах. Однако, УЭЦН имеет и свои недостатки, самый существенный из которых в том, что использование УЭЦН ограничивается лишь многодебитными скважинами. КПД при добыче менее $80 \text{ м}^3/\text{сут.}$ становится ниже 35%. Таким образом, УЭЦН невозможно использовать при дебите менее $40 \text{ м}^3/\text{сут}$ из-за чрезвычайно низкого КПД. Именно поэтому такие установки имеет смысл использовать исключительно на многодебитных скважинах. Практическая невозможность использования УШГН для глубоких скважин, а УЭЦН для средне- и низкодебитных скважин создала необходимость разработки принципиально новых конструкций агрегатов нефтедобычи. Проблема добычи нефти на средне- и малodeбитных скважинах глубиной от 2000 метров и более имеет на данный момент только одно практическое решение – погружной бесштанговый насосный агрегат (ПБНА) на основе цилиндрического линейного вентильного двигателя (ЦЛВД). ПБНА сочетает в себе преимущества УЭЦН и УШГН, а именно: малую металлоёмкость; возможность добычи на глубине более двух километров; возможность добычи в наклонно-направленных скважинах; относительно высокий КПД при низком или среднем дебите.

Во **второй главе** приводится электромагнитный расчёт цилиндрического линейного вентильного двигателя методом конечных элементов. Достоинством метода конечных элементов является возможность расчёта магнитного поля во всех точках ЦЛВД с учётом насыщения магнитной системы. Наиболее близким к поставленной задаче является метод расчёта ЦЛВД, разработанный Шутёмовым С.В.. Но этот метод подразумевает предварительные операции по приведению ЦЛВД к вращающейся синхронной машине, что значительно усложняет решение поставленной задачи. Кроме того, методика Шутёмова не подразумевает

расчёт рабочих характеристик двигателя. Поэтому мной была разработана собственная методика, не отстающая в быстродействии от методики Шутёмова и учитывающая реальную геометрию ЦЛВД на основе ANSYS Maxwell. Расчётная модель ЦЛВД, представленная на рис.1 состоит из: индуктора, включающего корпус 1, зубцы 2 с коронками 3, ядро 4, и катушек трёхфазной обмотки 5; также вторичного элемента, состоящего из штока 6, множества постоянных магнитов 7, полюсов 8 и немагнитных вставок 9. Двигатель находится в воздушной среде 10.

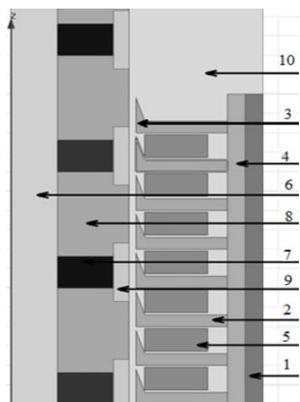


Рисунок – 1 Модель ЦЛВД

При исследовании и расчете электромагнитного поля на основе предложенной расчётной модели целесообразно принять следующие основные допущения: модель построена в двумерной осесимметричной цилиндрической системе координат RZ; статор модели имеет 4 пары полюсов; магнитное поле модели ЦЛВД ограничено наружной поверхностью корпуса ЦЛВД; реальная геометрия обмоток заменяется шинами/катушками с эквивалентным значением магнитодвижущей силы; механические потери на трение не учитываются; на внешней поверхности цилиндра, в который заключен ЦЛВД векторный потенциал принимается равным нулю. При перечисленных допущениях погрешности расчета магнитных полей машины можно уменьшить до минимума. Рабочие характеристики ЦЛВД (рис. 2-3) получены изменением приложенного фазного напряжения U_{ϕ} .

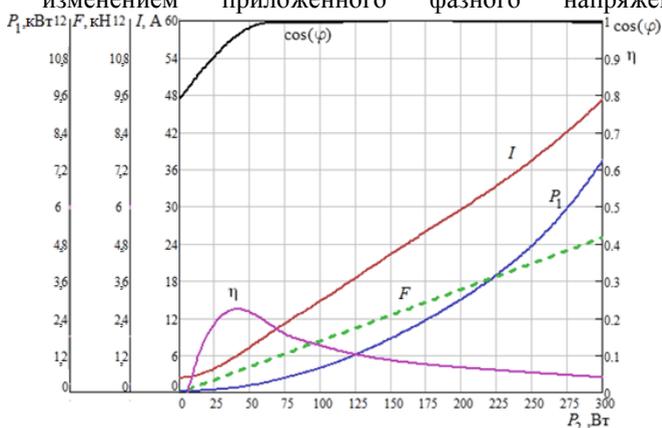


Рисунок – 2 Рабочие характеристики ЦЛВД при $f = 1$ Гц

Для продолжительного режима работы двигателя и при охлаждении его скважинной жидкостью номинальный ток равен 30 А. При частоте 1 Гц

$\cos(\varphi)$ двигателя, как показано на Рис. 2, приближается к 1. С увеличением частоты питающего напряжения (рис. 3) $\cos(\varphi)$ уменьшается и при максимальной частоте рабочего диапазона в 7 Гц и номинальном токе 30 А становится равным 0.935. Согласно рис. 2-3 с увеличением мощности P_2 КПД изменяется от нуля до максимального значения, а затем значительно уменьшается. Так при $f = 1$ Гц КПД при номинальном токе 30 А составляет 0.085 а при $f = 7$ Гц КПД равен 0.33.

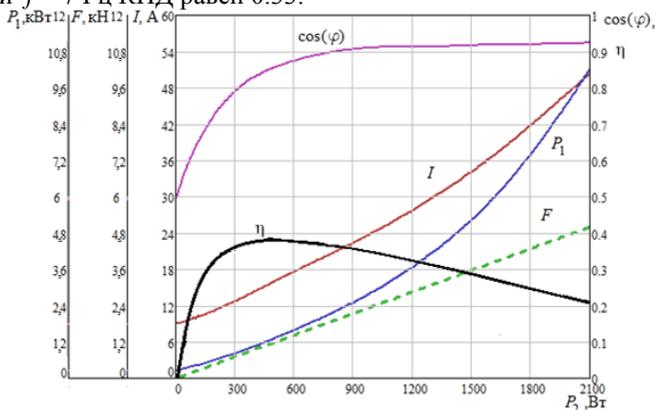


Рисунок – 3 Рабочие характеристики ЦЛВД при $f = 7$ Гц

КПД двигателя увеличивается по мере увеличения частоты питающего напряжения и скорости движения вторичного элемента, поэтому работа двигателя на более высоких скоростях вторичного элемента предпочтительней.

В **третьей главе** представлена математическая модель ЦЛВД основанная на теории электрических и магнитных цепей. При построении математической модели был принят ряд допущений: двигатель имеет бесконечное число пар полюсов, поэтому достаточно рассчитать магнитную цепь на одном полюсном делении; все магнитные потоки направлены либо перпендикулярно, либо параллельно оси двигателя. На схеме (рис.4.) изображена половина разреза рассматриваемой секции двигателя, а именно одно полюсное деление. $R_M, R_{\Pi}, R_{\delta}, R_{\sigma}, R_{\text{СК}}, R_z, R_{\text{ЯК}}$ – магнитные сопротивления: постоянного магнита, полюса, воздушного зазора, полюсного рассеяния, рассеяния по коронке зубцов, зубцов и ярма-корпуса соответственно. F_M и F_I – магнитодвижущие силы создаваемые магнитом и катушками с током соответственно. Расчёт магнитных сопротивлений участков цепи с радиальным направлением магнитного потока проведён в интегральной форме с учётом их увеличивающегося цилиндрического сечения. Поэтому расчёт магнитной цепи необходимо вести численным методом.

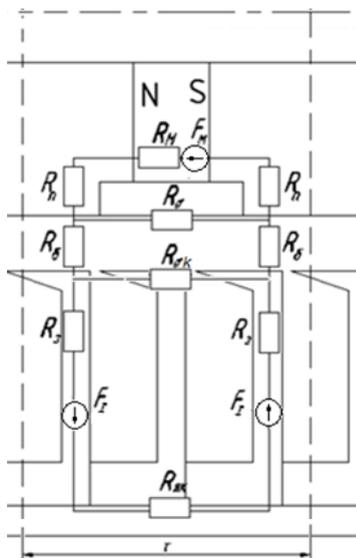


Рисунок – 4 Магнитная цепь ЦЛВД на одно полюсное деление

Для реализации данного расчёта можно воспользоваться любой программной средой. Математическая модель двигателя была построена в расчётной программе MathCAD. Для нахождения сопротивлений цепи решается система уравнений Кирхгофа, составленная согласно рис. 4, относительно магнитных потоков. Так как сопротивления участков цепи являются нелинейными функциями от проходящего через них магнитного потока, то аналитическое решение уравнений не представляется возможным. Поэтому решение ведётся итерационным методом. Количество итераций принято 20, что даёт погрешность не более чем 2 мкВб.

Магнитные сопротивление участка цепи, в которых магнитный поток перпендикулярен и параллелен оси двигателя, определяются по формулам (1) и (2) соответственно:

$$R_r = \int_{r_1}^{r_2} \frac{H(\Phi/S(r))dr}{\Phi}, \quad (1)$$

$$R_z = \frac{l \cdot H(\Phi/S)}{\Phi}, \quad (2)$$

где $H = H(B) = H(\Phi/S)$ – напряжённость магнитного поля на участке цепи (для R_z) или напряжённость магнитного поля на элементарном радиальном приращении dr участка магнитной цепи (для R_r); Φ – магнитный поток проходящий через участок цепи; S – поперечное сечение участка магнитной цепи ($S=S(r)$ для R_r); l – длина участка магнитной цепи; r_1 и r_2 радиальные координаты начала и конца участка магнитной цепи (для R_r).

Продольное и поперечное магнитные сопротивления находятся по отдельности как функции от тока двигателя $R_r(I)$, $R_q(I)$. Магнитный поток холостого хода Φ_0 , необходимый для последующих расчётов, определяется как магнитный поток в воздушном зазоре создаваемый постоянными магнитами, но при наличии насыщения магнитной цепи, полученной при итерационных расчётах. Из полученных магнитных сопротивлений находятся продольная и поперечная составляющие индуктивного сопротивления двигателя X_d и X_q . ЭДС холостого хода находим как:

$$E_0(f, I) = f \cdot e_0(I) = f \cdot 4.44 \cdot w \cdot \Phi_0(I) \cdot k_{об}, \quad (3)$$

где w – число витков фазы обмотки, $k_{об}$ – обмоточный коэффициент.

Активное сопротивление двигателя R_s находится согласно закону Ома. Имея активные и индуктивные сопротивления двигателя и ЭДС холостого

хода и задавшись углом между ЭДС и напряжением θ , тяговое усилие F_C рассчитывается как сумма основного F_ε и реактивного F_{dq} усилий:

$$F_C = F_\varepsilon + F_{dq}. \quad (4)$$

На рис. 5 построены графики зависимости тягового усилия от тока.

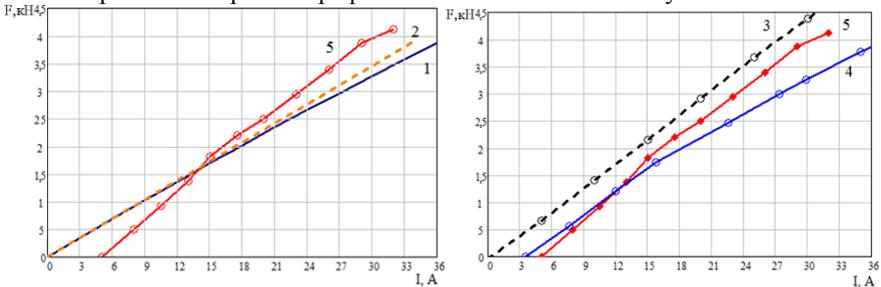


Рисунок – 5 Графики зависимости тягового усилия от действующего значения фазного тока

Графики зависимости тягового усилия от тока (рис. 5) соответствуют:

- 1) расчёту методом электрических и магнитных цепей с учётом насыщения;
- 2) расчёту методом электрических и магнитных цепей без учёта насыщения;
- 3) расчёту в ANSYS Maxwell magnetostatic при неподвижном вторичном элементе;
- 4) расчёту в ANSYS Maxwell transient при частоте работы двигателя 7 Гц;
- 5) эксперименту по замеру тягового усилия ЦЛВД.

Согласно рисунку 5 наиболее близкий к эксперименту результат показывает расчёт методом конечных элементов в ANSYS Maxwell magnetostatic, что обусловлено наиболее полным совпадением условий эксперимента и расчёта. Условия эксперимента были такие, что двигатель был не синхронным, а бесколлекторным двигателем постоянного тока. График 3 идёт параллельно экспериментальному 5 потому, как экспериментальная зависимость представляет разницу электромагнитного усилия двигателя и силы трения, когда расчётные методы силу трения не учитывали. Наиболее точные же результаты для расчёта ЦЛВД управляемого ПЧ с синусоидальной формой питающего напряжения дают метод электрических и магнитных цепей учитывающий насыщение магнитной цепи и расчёт методом конечных элементов в ANSYS Maxwell transient. Рабочие характеристики для частоты 7 Гц представлены на Рис. 6. Сравнение рабочих характеристик рассчитанных по методу электрических и магнитных цепей с характеристиками полученными в программном пакете ANSYS Maxwell выявило расхождение при номинальных токах в 30 А менее чем 2%, что подтверждает точность и адекватность расчётной модели по методу электрических и магнитных цепей. При этом время расчёта одной точки рабочей характеристики методом цепей составляет 1,5 с, когда расчёт МКЭ с теми же допущениями требует 5 с. Это показывает, что данная методика

математического моделирования может использоваться вместо МКЭ, как для построения характеристик, так и для проведения расчётов вариантов конструкции двигателя.

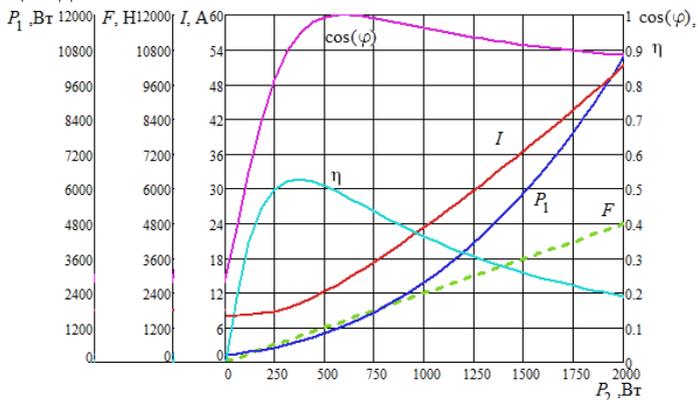


Рисунок – 6 Рабочие характеристики ЦЛВД для частоты 7 Гц

В четвёртой главе представлены меры по рационализации ЦЛВД. Для увеличения усилия тяги цилиндрического линейного вентильного двигателя были проведены многовариантные расчёты с целью получения зависимости максимального усилия развиваемого двигателем от следующих параметров: ширины, диаметра и материала магнитов, коэффициента полюсного деления, величины открытия паза и диаметра вторичного элемента. Для сравнения с текущей конструкцией, экспериментальный модуль ЦЛВД имеет магниты следующих параметров: ширина $h_m=8$ мм; диаметр $D_m=46$ мм; коэрцитивная сила $H_0=680$ кА/м; остаточная магнитная индукция $B_r=1$ Тл. Модуль ЦЛВД имеет расчётный коэффициент полюсного деления $\alpha_p=0,5$. Максимальное тяговое усилие, развиваемое модулем ЦЛВД, по направлению коронки зубца равняется 4400 Н на метр длины двигателя в расчёте Maxwell magnetostatic.

Результаты расчёта ЦЛВД, проведённого в программе Maxwell с существующими редкоземельными постоянными магнитами от разных производителей выявили, что наибольшее тяговое усилие двигатель имеет с магнитами с наибольшими значениями коэрцитивной силы H_c и остаточной индукции B_r . Современные технологии позволяют получить материалы с параметрами в широком диапазоне, поэтому были проведены расчёты для выявления отдельных зависимостей усилия от B_r и H_c . Эти зависимости представлены на рис. 7 а, б. На рис. 8 а) представлена зависимость тягового усилия, полученная при изменении диаметра магнита D_m . Наибольшее усилие достигается при наибольшем диаметре магнита. Однако, можно заметить что при диаметре магнита более 49 мм рост усилия не наблюдается. Это объясняется насыщением магнитной цепи. Уменьшить насыщение в стали

зубцов можно увеличив ширину зубца или используя материал с большей относительной магнитной проницаемостью.

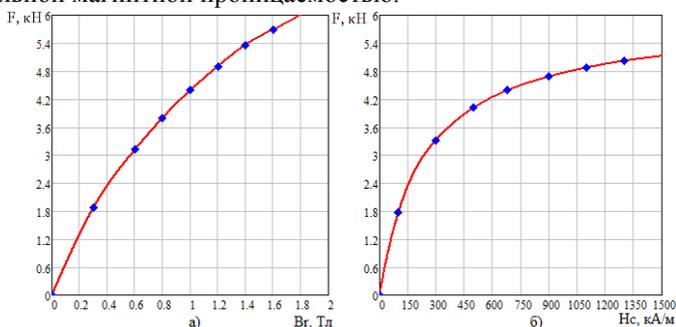


Рисунок – 7 Зависимости тягового усилия двигателя: а) от остаточной индукции B_r , б) от коэрцитивной силы H_c

Таким образом, замена материала зубцов необходима для достижения наибольшего тягового усилия ЦЛВД. В результате расчётов усилия ЦЛВД с разными значениями ширины магнита h_m получена зависимость рис. 8 б).

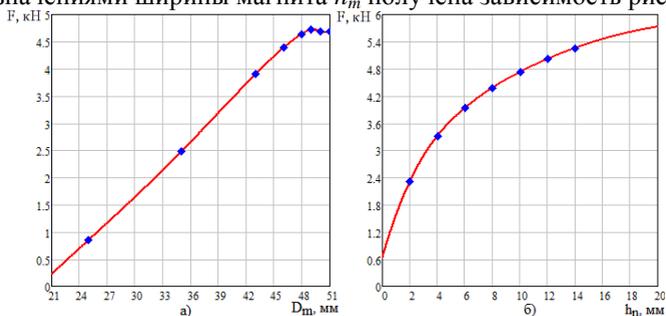


Рисунок – 8 Зависимость усилия расчётного модуля ЦЛВД от а) диаметра магнита D_m ; б) ширины магнита h_m

Наибольшее усилие достигается при наибольшем значении ширины магнита. Изменение α_p неоднозначно сказывается на сопротивлении магнитной цепи, поэтому существует оптимальное α_p при котором тяговое усилие максимально. Согласно рис. 9 а) при увеличении α_p от 0,3 до 0,7 тяговое усилие увеличивается до своего максимального значения при $\alpha_p=0,63$, а затем уменьшается, т.е. $\alpha_p=0,63$ является оптимальным значением коэффициента полюсного деления. Проведенные расчёты тягового усилия от величины открытия паза показали, что максимальное тяговое усилие ЦЛВД практически не зависит от величины открытия паза. Это означает, что производство ЦЛВД с открытым пазом значительных потерь тягового усилия за собой не повлечёт. Открытый паз позволит делать статорные чашки двигателя из шихтованной электротехнической стали, что сильно упростит технологию изготовления двигателя и позволит увеличить его тяговое

усилие. Расчёты зависимости тягового усилия от диаметра вторичного элемента показали, что при увеличении диаметра вторичного элемента на 4мм без увеличения магнитов и тем самым уменьшении сопротивления воздушного зазора, тяговое усилие увеличивается менее чем на 2%. Однако, если вместе с диаметром вторичного элемента увеличить диаметр магнита на 4 мм, то усилие увеличится на 16.8%. Дальнейшее увеличение диаметра вторичного элемента возможно только при сокращении количества витков в пазу. На рис. 9 б показаны график зависимости усилия ЦЛВД от диаметра вторичного элемента, выраженного числом витков в пазу.

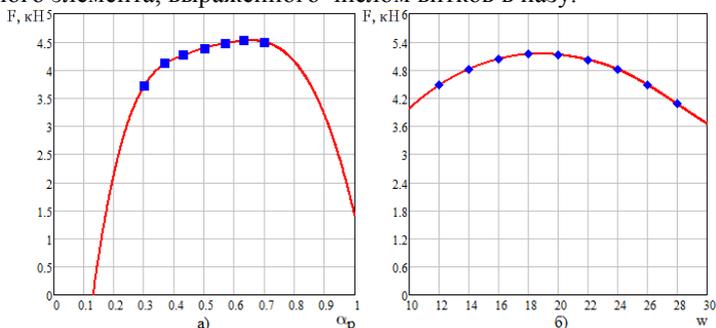


Рисунок – 9 Зависимость усилия расчётного модуля ЦЛВД от а) расчётного коэффициента полного перекрытия α_p ; б) числа витков в пазу w

Проанализировав график, можно сделать вывод, что число витков в пазу равное 18 позволяет развить то же тяговое усилие что и 20, при номинальном токе в 30 А и сечением обмоточного провода 3 мм². Таким образом, при меньшей МДС обмоток можно добиться такого же усилия, за счёт увеличения внешнего диаметра магнитов. Уменьшение числа витков снизит общее активное сопротивление обмотки статора и её тепловыделение на 10%. Таким образом, номинальный ток двигателя можно увеличить на 5% и тяговое усилие двигателя так же увеличится на 5% согласно графикам рис.5.

Используя все полученные данные, была создана и рассчитана новая рационализированная конструкция двигателя с открытым пазом, зубцами из шихтованной электротехнической стали и магнитами трёх разных марок. Число витков в пазу двигателя 18. Ток в обмотках статора 30 А. Данные расчёта представлены в таблице 1. Максимальное тяговое усилие, развиваемое рационализированной конструкцией двигателя с теми же магнитами, составляет 1685 Н или 6740 Н/м, что в 1.53 раза больше усилия текущей конструкции. Если использовать магниты индукцией 1.26 Тл, то максимальное тяговое усилие можно увеличить в 1.86 раза до значения в 8210 Н/м, а если магниты индукцией 1.47 Тл, то в 2,08 раза до значения 9140 Н/м. С увеличением усилия увеличивается и КПД двигателя. Так КПД ЦЛВД на частоте 7 Гц, в результате рационализации конструкции, может достичь значения в 51%.

Таблица 1

Сравнение усилия рационализированного ЦЛВД

№	Конструкция ЦЛВД	Характеристики магнитов		F _в , Н	F _н , Н	F _{вм} , Н	F _{нм} , Н	КПД при f=7 Гц, %
		B _r , Тл	H _b , кА/м					
1	Рационализированная	1.47	1138	2285	2715	9140	10860	51
2	Рационализированная	1.26	900	2053	2337	8212	9348	48
3	Рационализированная	1	680	1685	1886	6740	7544	42
4	Существующая	1	680	1100	960	4400	3840	33

Неодимовые магниты индукцией 1,47 Тл имеют рабочую температуру 80 градусов цельсия, что не подходит для добычи нефти из глубоких скважин потому, что температура нефти в таких скважинах может достигать 150 градусов. Таким образом, для добычи нефти можно использовать только конструкцию 2 (таб. 1) с удельным тяговым усилием 8210 Н/м, в которой имеются неодимовые магниты с рабочей температурой 200 градусов.

Реальное рабочее удельное тяговое усилие ЦЛВД, управляемого преобразователем частоты, при номинальном токе в 30 А, рассчитанное с помощью ANSYS Maxwell transient и составляет 6350 Н/м.

Наиболее важным является то, что на основе данной конструкции можно создать двигатель длиной 8 метров, с которым можно будет вести добычу на глубине более 4000 метров, что намного превышает поставленные ожидания и способности существующих ПБНА и открывает новые возможности для нефтедобывающей промышленности. При этом себестоимость двигателя на пару полюсов вырастет в 2.04 раза. При нынешней рабочей частоте двигателя в 7 Гц разница стоимости окупится затратами на электроэнергию стоимостью 4 р./кВтч за счёт повышенного КПД в течение 243 суток. Благодаря шихтованному магнитопроводу данная конструкция двигателя может работать на более высоких частотах с более высоким КПД и соответственно разница стоимости окупится гораздо быстрее.

В **заключении** представлены выводы и обобщены основные результаты исследований, полученные в ходе выполненной диссертационной работы:

1. Разработана методика для расчёта рабочих характеристик ЦЛВД в цилиндрической системе координат методом конечных элементов в программе ANSYS Maxwell. Так же разработаны математическая модель и методика расчёта ЦЛВД, основанные на теории электрических и магнитных цепей, учитывающие насыщение участков магнитной цепи. Что позволяет рассчитывать рабочие характеристики двигателя и проводить многовариантные расчёты с целью рационализации конструкции. При этом время расчёта по данной методике меньше чем для расчёта методом конечных элементов, реализуемого в ANSYS Maxwell.

2. Путём расчётов вариантов конструкции ЦЛВД получены зависимости его тягового усилия от геометрических параметров. Анализ рабочих

характеристик ЦЛВД для разных рабочих частот показал, что максимальной энергоэффективности ЦЛВД в составе ПБНА достигает при максимальной частоте рабочего хода и минимальной обратного.

3. Рационализация конструкции ЦЛВД увеличила его удельное тяговое усилие до значения 6350 Н/м, что позволяет создать реальный двигатель длиной менее 8-ми метров для добычи нефти на глубоких и сверхглубоких скважинах.

Результаты исследования могут быть использованы для проектирования и создания высокотяговых цилиндрических линейных вентильных двигателей с постоянными магнитами. Реализация полученных методик находит и может найти дальнейшее применение при проектировании ЦЛВД и для создания наиболее энергоэффективных алгоритмов управления ЦЛВД.

**Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах
Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:**

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

2. Тимашев, Э.О. Рабочие характеристики цилиндрического линейного вентильного двигателя / Э.О. Тимашев, Д.А. Чирков, А.Д. Коротаев // Электротехника. – М.: Знак. - 2018. - № 11. - С. 27-31.

3. Сравнение методов расчёта электромагнитных процессов на примере цилиндрического линейного вентильного двигателя / Д.А. Чирков, А.Т. Ключников, А.Д. Коротаев, Э.О. Тимашев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – Пермь. - 2018. - № 28. - С. 76-91.

4. Оптимизация вторичного элемента цилиндрического линейного вентильного двигателя / Э.О. Тимашев, Д.А. Чирков, Н.В. Шулаков, А.Д. Коротаев // Вопросы электротехнологии. – Саратов: Изд-во СГТУ. – 2019. – № 1.

Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных базах данных SCOPUS

5. Timashev, E.O. Operating characteristics of cylindrical linear induction motor / E.O. Timashev, D.A. Chirkov, A.D. Korotaev // Russian electrical engineering. – 2018. – Vol. 89. – №11. – pp. 643-647.

6. Chirkov D.A. Efficiency of a submersible plunger pump linear motor / D.A. Chirkov, E.O. Timashev // E3S Web of Conferences. — 2019. – Vol. 140.

Подписано в печать 11.01.2021. Тираж 100 экз.
Усл. печ. л. 1,0. Формат 60×84/16. Заказ № 507/2021.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии издательства Пермского национального
исследовательского политехнического университета
614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, к. 113.
Тел.: (342) 219-80-33