

На правах рукописи



Шутемов Сергей Владимирович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДУЛЯ ЛИНЕЙНОГО
ВЕНТИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ПОГРУЖНЫХ
НЕФТЕДОБЫВАЮЩИХ НАСОСОВ**

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2018

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Шулаков Николай Васильевич

Официальные оппоненты: **Ганджа Сергей Анатольевич,**
доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО
«Южно-Уральский государственный
университет (национальный исследовате-
льский университет)», г. Челябинск, декан
Энергетического факультета;

Дмитриевский Владимир Александрович,
кандидат технических наук, ФГАОУ ВО
«Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
г. Екатеринбург, доцент кафедры
«Электротехника и электротехнологические
системы»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Курганский государственный
университет»

Защита диссертации состоится «25» апреля 2018 г. в 16 ч. 00 мин. на
заседании диссертационного совета Д 212.285.03 на базе ФГАОУ ВО
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, ауд.
И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ
ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента
России Б.Н. Ельцина»: <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?id=51&rid=276360>

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Зюзев Анатолий Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Увеличение добычи нефти на существующих скважинах РФ является важной государственной задачей. В связи с истощением нефтяных месторождений необходимо повышать эффективность добычи нефти. Используемые в настоящее время для мало- и среднедебитных, а также глубоких скважин, погружные плунжерные насосы с колонной насосных штанг, не удовлетворяют в полной мере запросам потребителей. В этой связи возникла необходимость разработки электропривода нового поколения на базе линейного вентильного двигателя для создания погружных плунжерных бесштанговых электронасосных агрегатов (ПБЭНА). Наличие колонны штанг в составе станка-качалки приводит к низкому КПД (25-47% при глубине более 2000 м) насосного агрегата из-за трения об насосно-компрессорные трубы (НКТ). При этом возникает опасность обрыва колонны штанг, так как с увеличением глубины добычи более 2000 метров их вес становится критическим. Использование плунжерного насоса, сочлененного с цилиндрическим линейным вентильным двигателем (ЦЛВД), позволяет снизить трение из-за отсутствия колонны штанг и повысить КПД добычного агрегата, по сравнению со станком-качалкой. Передача энергии к забою скважины в виде электрической энергии по кабелю намного эффективнее, чем механическая передача штангой. В этой связи разработка рекомендаций по проектированию ЦЛВД, а также разработка инженерных методик расчета его электромагнитных процессов является важной задачей.

Степень разработанности проблемы исследования. Неполное соответствие станков-качалок современным требованиям к электроприводу насосных агрегатов для добычи нефти привело к необходимости разработки принципиально новых конструкций электропривода. В качестве одного из вариантов для преодоления проблемной ситуации сегодня рассматривается использование электропривода на базе двигателя с возвратно-поступательным движением (ЦЛВД). На текущий момент единственным разработчиком таких двигателей в мировой практике пока является Китайская Народная республика (КНР), но информация об этих разработках не публикуется в открытой печати. По сведениям Шенлинской нефтяной корпорации (КНР) в сравнении с балансирным станком-качалкой электропривод нового поколения, на базе вентильных линейных двигателей, позволяет поднять эффективность добычи нефтяной жидкости. На кафедре электротехники и электромеханики Пермского Национального Исследовательского Политехнического Университета (ПНИПУ) впервые в РФ создан модуль опытно-экспериментального образца ЦЛВД, используемый в качестве привода для ПБЭНА. Данная работа основывается на разработках сотрудников кафедры в области линейных машин и дополняет их. Получены оригинальные результаты, которые подтверждены расчетами, моделированием, результаты апробированы. Изготовлены опытные образцы. 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).

Цель исследования: разработка модуля цилиндрического линейного вентильного электродвигателя, в качестве привода погружного плунжерного бесштангового электронасосного агрегата.

Для достижения данной цели требуется решить следующие исследовательские **задачи:** обосновать рациональность использования ЦЛВД в качестве привода ПБЭНА, в зависимости от дебита и глубины скважины; сформулировать требования к цилиндрическому линейному вентильному электродвигателю для мало- и среднедебитных, а также глубоких скважин; выбрать расчетную модель электромагнитных процессов ЦЛВД; разработать алгоритм расчета модуля ЦЛВД; обосновать выбор рациональной конструкции магнитной цепи элементов индуктора и вторичного элемента модуля ЦЛВД, с учетом необходимости получения

максимально возможной удельной тяги; спроектировать, изготовить и исследовать модуль ЦЛВД предложенной рациональной конструкции.

Областью исследования в работе определены специальные электрические машины и электромеханические устройства технологического назначения.

Объектом исследования является модуль цилиндрического линейного вентильного электродвигателя, используемый в качестве погружного привода плунжерного насоса для добычи нефти.

Научная новизна результатов исследований состоит в следующем:

Разработана идеализированная математическая модель электромагнитных процессов ЦЛВД, которая учитывает вариацию магнитного поля в двигателе по всем трем координатам.

Разработан алгоритм расчета электромагнитных процессов модуля ЦЛВД. Алгоритм совмещает численное моделирование электромагнитного поля на двухмерной полевой модели и геометрические размеры двигателя с трехмерной вариацией поля.

В работе рассмотрены различные варианты магнитных систем. Результаты анализа возможных конструкций элементов индуктора и вторичного элемента модуля ЦЛВД использованы для получения максимальной удельной величины тяги.

Разработана методика расчета эффекта тяжения модуля ЦЛВД при асимметрии положения вторичного элемента относительно индуктора.

Проработка поставленных задач осуществлена на качественно новом современном уровне, достигнуты цели диссертации и проведена выработка новых научных методик.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. В результате проведенных автором исследований раскрыты особенности применения ЦЛВД в качестве привода ПБЭНА для добычи нефти.

2. Разработана методика расчета модуля ЦЛВД и получено математическое описание электромагнитных процессов в двигателе.

3. Разработан алгоритм расчета модуля ЦЛВД, основанный на совместном применении преобразования трехмерной модели двигателя к двухмерной и расчета двухмерного (квазитрехмерного) электромагнитного поля методом конечных элементов.

4. Раскрыты особенности методики выбора рациональной конструкции магнитной цепи, элементов индуктора и вторичного элемента модуля ЦЛВД.

5. Экспериментально подтверждена работоспособность изготовленного модуля ЦЛВД предложенной рациональной конструкции, получены требуемые технические характеристики.

Методология и методы исследований. В теоретической части работы использованы оригинальные методы расчета на основе общеизвестной теории электромагнитного поля и теории нелинейных магнитных цепей. Математическая модель для расчета тягового усилия ЦЛВД построена на основе решения полевой задачи в двухмерной постановке. При этом происходит преобразование трехмерного распределения поля ЦЛВД к двухмерному. Поставленные задачи решены с использованием программных продуктов *ELCUT*, *ANSYS*. Методы компьютерного моделирования осуществляются с помощью математических пакетов *MATHCAD*, *MATLAB*. Экспериментальные методы исследования осуществлены на макетном образце модуля ЦЛВД.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Идеализированная математическая модель электромагнитных процессов ЦЛВД, которая учитывает распределение магнитного поля в двигателе по всем трем координатам и позволяет преобразовывать трехмерную модель к двухмерной.

2. Алгоритм расчета электромагнитных процессов модуля ЦЛВД.

3. Результаты анализа возможных вариантов конструкций элементов индуктора и вторичного элемента модуля ЦЛВД, с целью увеличения удельной тяги.

4. Результаты экспериментальных исследований опытного макета ЦЛВД.

5. Методика расчета эффекта тяжения модуля ЦЛВД для определения сил трения вторичного элемента об индуктор.

Достоверность полученных результатов подтверждается сравнением расчетов и экспериментов; выводы и рекомендации в диссертационной работе обосновываются удовлетворительным совпадением результатов теоретического и экспериментального исследований, полученных на опытном образце ЦЛВД.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно технических конференциях, семинарах, совещаниях. В том числе на II Международной научно-технической конференции «Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике». Пермь, ПНИПУ, 21-22 апреля 2016 г.; I Международной научно-технической конференции «Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике». Пермь, ПНИПУ, 24-25 сентября 2015 г.; XIV Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий». Екатеринбург, УрФУ, 17-20 марта 2014 г.; Краевой научно-технической конференция "Автоматизированные системы управления и информационные технологии". Пермь. ПНИПУ. 22 мая 2013 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 научных работ, из них в журналах, рекомендованных ВАК, - 5, в других изданиях - 9.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, библиографического списка используемых источников и 2 приложений общим объемом 139 страниц. Основной текст изложен на 133 страницах машинописного текста, иллюстрирован 43 рисунками, 14 таблицами. Библиографический список включает 98 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** показана актуальность темы диссертации, в нем 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 и публикациях.

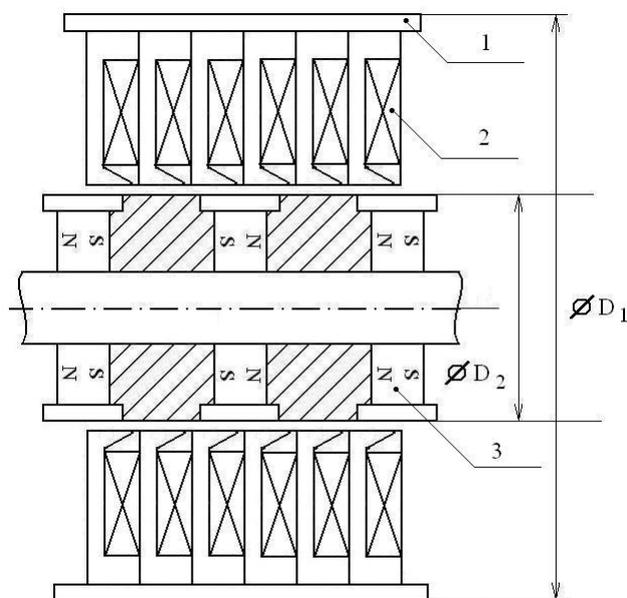


Рисунок 1 – Продольный разрез ЦЛВД

ЦЛВД работает следующим образом: индуктор создает возвратно-поступательные движения штока под управлением ПЧ, который находится на земной поверхности. Питание от ПЧ передается по длинному армированному кабелю. Движение штока прикладывается к плунжерному насосу, прокачивающему нефть в НКТ.

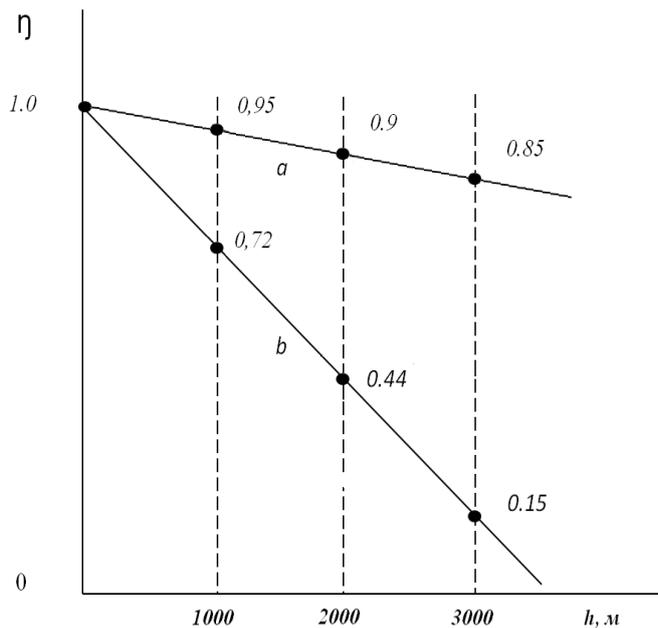
Таким образом, одним из новых путей совершенствования нефтедобывающего оборудования является создание бесштанговой установки с погружным ЦЛВД возвратно-поступательного движения. Выбор такой конструкции ПБЭНА связан с тем фактом, что

В **первой главе** описывается современное состояние вопросов электропривода в составе нефтедобывных агрегатов. Рассмотрены требования к модулю ЦЛВД. Нефтедобывной агрегат представляет собой плунжерный насос, что и определило основные требования к электроприводу.

Основным элементом привода является ЦЛВД, состоящий из трех основных частей, показанных на рис.1:

1. корпус;
2. цилиндрический индуктор с трехфазной обмоткой;
3. вторичный элемент с постоянными магнитами, совершающий возвратно-поступательное движение.

единственным эффективным вариантом для низко- и среднедебитных скважин остается погружной плунжерный насос.



Проведено исследование для обоснования преимуществ ЦЛВД в качестве привода ПБЭНА для добычи нефти, в зависимости от глубины и режима работы, по сравнению с обычными станками-качалками. Разрабатываемый привод ПБЭНА специальной конструкции является альтернативным вариантом, позволяющим устранить недостатки существующих станков-качалок. С увеличением глубины добычи увеличиваются потери на трение между колонной штанг и НКТ. Глубины эффективного использования станков-качалок ограничены в 2000 метров, так как при добыче на большей глубине происходит обрыв колонны штанг под действием собственного веса.

Рисунок 2 – КПД передачи энергии до забоя скважины для различных вариантов исполнения привода, в зависимости от глубины: *a* – по кабелю к ЦЛВД, *b* – штангой станка – качалки

При работе насосного агрегата на основе ЦЛВД необходимо учитывать, что передача энергии к забою скважины в виде электрической энергии по кабелю намного эффективнее, чем механическая передача штангой (рис.2). По наклону характеристик КПД видно, что при передаче энергии механической штангой (рис.2.б) в забой скважины, потери увеличиваются быстрее, чем при передаче электрической энергии по кабелю (рис. 2.а), при увеличении глубины. Анализ характеристик КПД показывает, что для штангового привода плунжерного насоса он снижается быстрее из-за механических потерь на трение штанги об НКТ, при увеличении глубины добычи, по сравнению с передачей электрической энергии по кабелю. Соответственно, в качестве альтернативы, представляется более конкурентоспособным использование насосного агрегата, основанного на зарекомендовавшем себя надежностью и характеристиками плунжерном насосе, в связке с погружным ЦЛВД возвратно-поступательного движения. Использование плунжерного насоса, сочлененного с ЦЛВД, позволяет устранить трение из-за отсутствия колонны штанг, использовать насосную установку в криволинейных скважинах, повысить КПД передачи энергии к плунжеру, по сравнению со станком-качалкой. Потери энергии ЦЛВД происходят в забое скважины, что на ряде месторождений дает дополнительное преимущество нефтяному агрегату с ЦЛВД. Потери энергии преобразуется в тепло в забое скважины и разогревают забой. На ряде месторождений происходит добыча вязкой нефти, нефти имеющей высокое содержание парафинов, что требует установки дополнительных электрических нагревателей в забой. Именно в таких случаях погружной скважинный насос с ЦЛВД будет наиболее выгоден.

Во второй главе описывается исследованная математическая модель электромагнитных процессов в модуле ЦЛВД. При использовании численных методов применительно к ЦЛВД возникает проблема трехмерности распределения электромагнитного поля по геометрии машины. Топология распределения магнитного поля ЦЛВД является трехмерной и значительно отличается от распределения поля обычных двигателей вращательного движения. Магнитное поле ЦЛВД является радиально-аксиальным (рис.1) и распределено по всем трем

пространственным координатам. Поле двигателя вращательного движения полагается двумерным, распределенным в поперечном сечении машины и однородным вдоль ее оси вращения.

В результате для расчета ЦЛВД приходится строить трехмерную сетку конечно-разностных элементов, что на несколько порядков снижает скорость машинного расчета. Приближенное решение поля ЦЛВД, с вполне достаточной инженерной точностью, может быть найдено путем сведения трехмерной задачи к двумерной. Задача считается двумерной, если нет изменения поля по третьей координате, т. е. поле по этой координате однородно. В результате если свести трехмерную задачу к двумерной, то можно значительно сократить трудоемкость вычислений. При численных методах двумерная задача решается на ЭВМ в течение нескольких минут, что является приемлемым для многовариантного расчета характеристик. Решение трехмерной задачи требует несколько десятков часов машинного времени для решения интегральных характеристик одной точки статической угловой кривой, что неприемлемо для многовариантных расчетов. Для быстрого расчета ЦЛВД требуется привести трехмерную геометрическую модель к двумерной. Для этого необходимо сделать анализ возможности геометрического преобразования трехмерной модели двигателя к двумерной.

Анализ магнитных полей ЦЛВД (рис.3.а) и двигателя вращательного движения производился (рис.3.в) по плоскости (YZ) воздушного зазора с учетом разбиения двигателей на отдельные геометрические участки. Если проанализировать положение отдельных геометрических участков двигателей относительно плоскости воздушного зазора, то можно сделать определенные выводы.

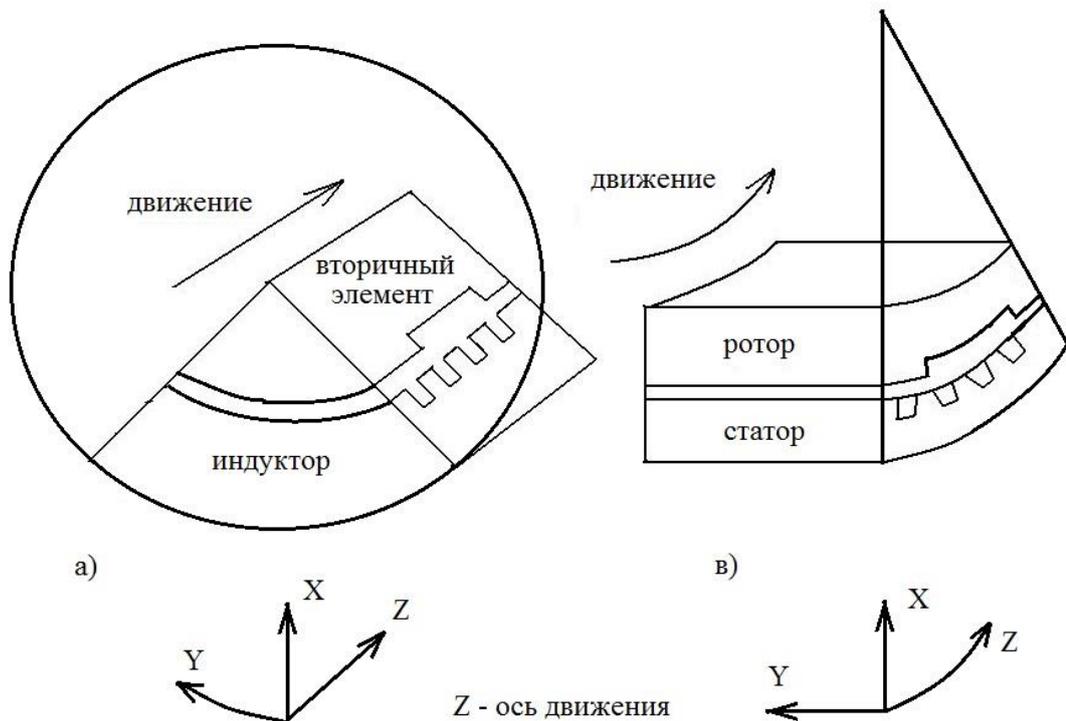


Рисунок 3 - Преобразование геометрии ЦЛВД с трехмерным радиально-аксиальным распределением поля (а) к сектору двигателя вращательного движения с двумерным распределением электромагнитного поля (в)

Магнитное поле отдельных участков ЦЛВД является радиально-аксиальным и распределено по всем трем пространственным координатам:

- Участки магнитопровода ЦЛВД с направлением силовых линий электромагнитного поля по оси X можно называть радиальными. Это связано с тем, что поле этих участков идет по радиусу, при этом по оси Y поле участков однородно.

- Участки магнитопровода ЦЛВД с направлением силовых линий электромагнитного поля по оси Z можно называть аксиальными. Это связано с тем, что магнитный поток этих участков направлен вдоль оси движения вторичного элемента. Поле двигателя вращательного движения полагается двумерным, распределенным в поперечном сечении машины по осям X , Z и однородным вдоль оси вращения машины Y .

Сравнение ЦЛВД (рис.3.а) и двигателя вращательного движения (рис.3.в) показало, что магнитное поле обеих двигателей относительно плоскости воздушного зазора вдоль оси движения (Z) является распределенным, а поперек оси движения (Y) однородным. Анализ полей позволил сделать заключение о возможности преобразования трехмерной геометрической модели к двумерной относительно плоскости воздушного зазора (YZ). Для этого необходимо преобразовать геометрию ЦЛВД в геометрию двигателя вращательного движения относительно воздушного зазора. Равенство площадей и линейных размеров рабочей поверхности в воздушном зазоре моделей гарантирует эквивалентность сил между индуктором и вторичным элементом при преобразовании геометрии. Преобразование моделей осуществляется деформацией плоскости воздушного зазора по двум перпендикулярным осям. По оси Y моделей круговой воздушный зазор ЦЛВД (рис.3.а) распрямляется в линию оси двигателя вращательного движения. По оси Z моделей линейный воздушный зазор ЦЛВД сворачивается в круговой воздушный зазор двигателя вращательного движения (рис.3.в).

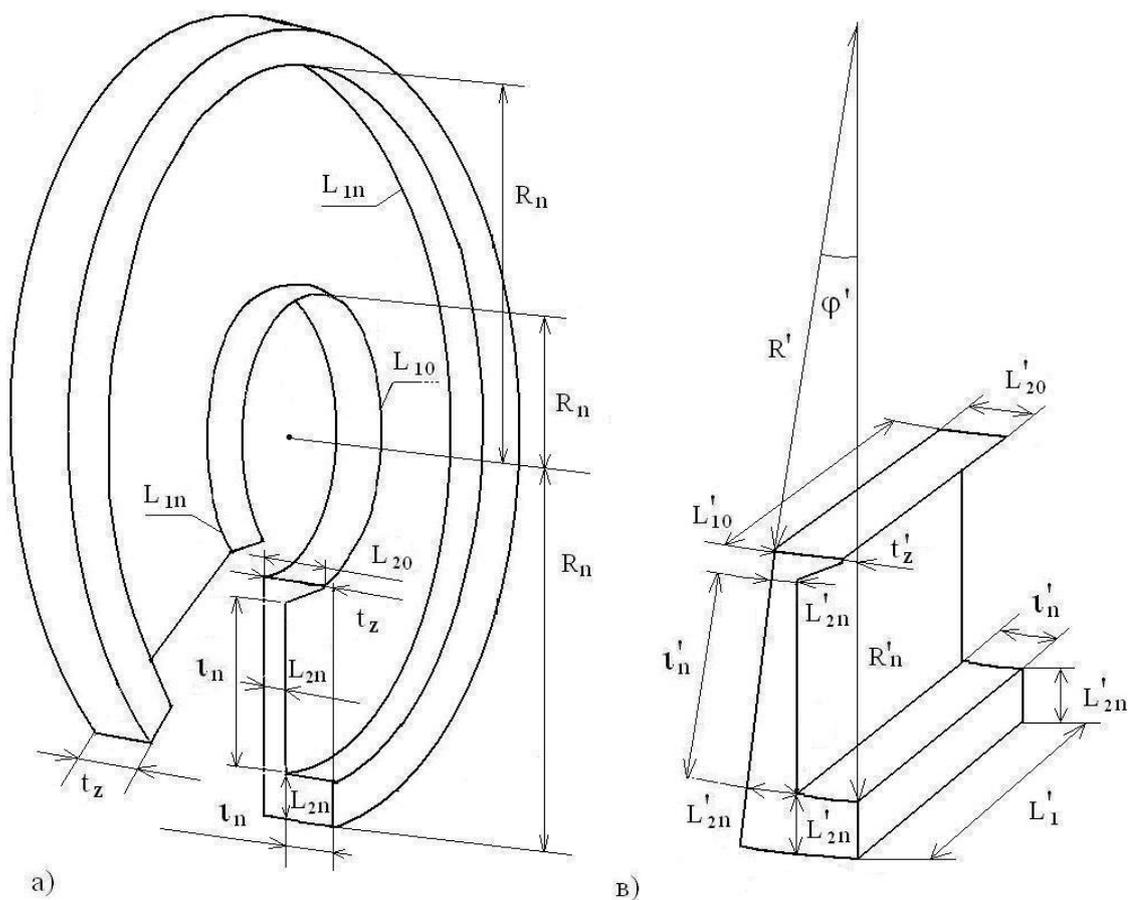


Рисунок 4 - Преобразование размеров разрезанного по радиусу зубцового деления индуктора с радиально-аксиальным полем (а) в двухмерное зубцовое деление с глубиной $L'_{10} = L_{10}$ (в)

Для преобразования геометрии одной модели к другой используем закон Ома для магнитной цепи. В пределах каждого участка геометрического преобразования магнитная цепь

должна быть однородной. При использовании этого условия все характеристики участков магнитных цепей в обеих моделях будут одинаковы. Математически это выражается в равенстве магнитных сопротивлений каждого участка трехмерной геометрической модели ЦЛВД (R_m) и двухмерной расчетной модели (R_m')

$$R_m = R_m', \quad (1)$$

Для рабочей поверхности индуктора необходимо выполнить условие равенства линейных размеров поверхностей воздушного зазора в обеих моделях для получения полной адекватности двух вариантов ($L_{10} = L_{10}'$, $L_{20} = L_{20}'$). При расчете производят преобразование одного зубцового деления индуктора, а далее выполняют преобразование геометрии вторичного элемента. При преобразовании необходимо учитывать, что в трехмерной модели возможно радиальное и аксиальное направление поля различных геометрических участков.

Уравнение (1) преобразуем через геометрические размеры участков моделей. Площади сечения каждого участка моделей зависят от линейных размеров. Так как в обеих геометрических моделях площади сечения представляют собой прямоугольные профили, то выражаем площади через геометрические линейные размеры для каждого участка моделей

$$\frac{l_n}{L_{1n} L_{2n}} = \frac{l_n'}{L_{10}' L_{2n}'}, \quad (2)$$

Полученное уравнение (2) используется для преобразования участков моделей с аксиальным направлением силовых линий поля. Для участков с радиальным направлением поля (по оси X) длина средней силовой линии не меняется при преобразовании трехмерной модели к двухмерной ($l_n = l_n'$). Таким образом, учитывая (2), можно рассчитать линейные размеры L_{10}' и L_{2n}' двухмерной геометрической модели по упрощенному уравнению.

$$L_{1n} L_{2n} = L_{10}' L_{2n}', \quad (3)$$

Уравнение (3) используется для преобразования участков моделей с радиальным направлением силовых линий поля, где длины силовых линий не меняются, и геометрически эквивалентно общеизвестному конформному преобразованию. Таким образом, конформное преобразование – частный случай расчета, когда длина силовых линий не меняется. Линейные размеры окружностей индуктора (L_{1n}) трехмерной модели находят через радиусы зубцового деления (R_n)

$$L_{1n} = 2\pi R_n, \quad (4)$$

Полученные уравнения (2, 3 и 4) позволяют провести преобразование трехмерной геометрической модели ЦЛВД к круговой двухмерной, показанное на рис.4 и рис.5.

После преобразования геометрической модели ЦЛВД, на следующем этапе, производят расчет двухмерной эквивалентной модели ЦЛВД методом конечно-разностных элементов.

Далее производят обработку результатов решения полевой задачи. В результате расчета программным комплексом ELCUT интегральных значений момента двухмерной модели при различных эквивалентных фазовых углах θ рассчитываются соответствующие им силы на штоке двигателя в соответствии с уравнением

$$F = \frac{M_{вр}}{R'}, \quad (5)$$

где F – усилие на штоке двигателя; $M_{вр}$ – расчетный момент двухмерной модели; R' – радиус рабочей поверхности статора двухмерной модели на рис.4.

В дальнейшем на основе полученных результатов решения полевой задачи и полученных усилий на вторичном элементе производят расчет электрических характеристик ЦЛВД.

В результате разработана идеализированная математическая модель электромагнитных процессов в модуле ЦЛВД, которая учитывает распределение магнитного поля в двигателе по всем трем координатам, и позволяет преобразовывать трехмерную модель к двухмерной. Модель совмещает численное моделирование электромагнитного поля на двухмерной полевой модели и геометрические размеры двигателя с трехмерной вариацией поля. Модель используется в алгоритме последовательности расчетов ЦЛВД. Пропорционально изменению пар полюсов ЦЛВД изменяется и сила на штоке двигателя. В дальнейшем на основе

полученных результатов решения полевой задачи и полученных усилий на вторичном элементе производят расчет электрических характеристик ЦЛВД.

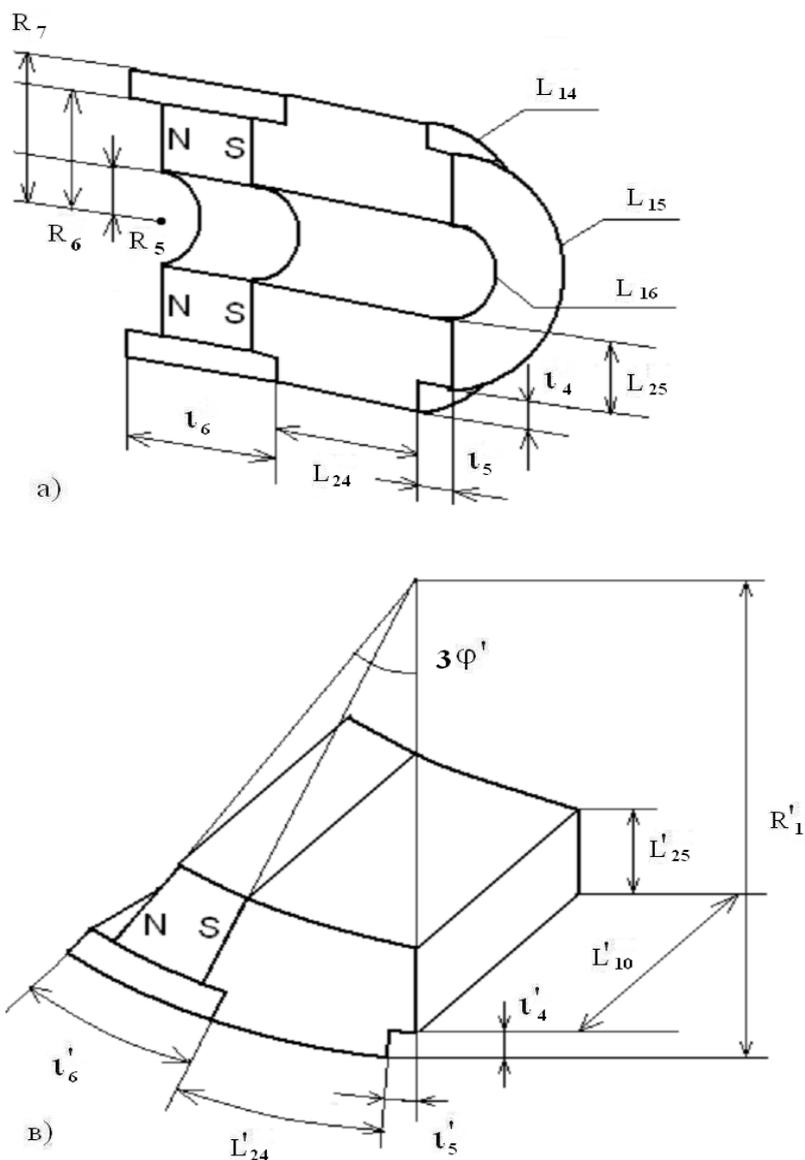


Рисунок 5 - Графическое представление преобразования размеров разрезанного по радиусу полюса вторичного элемента с радиально-аксиальным полем (а) в сектор полюса двухмерной модели глубиной $L'_{10} = L_{10}$ (б)

В третьей главе подробно описывается разработанный алгоритм последовательности расчетов ЦЛВД, состоящий из нескольких этапов. Производится сквозной расчет характеристик модуля линейного вентильного электродвигателя выбранной рациональной конструкции. Расчет одной точки статической угловой характеристики состоит из четырех этапов в соответствии с алгоритмом на рис. 6.

На первом этапе производится преобразование трехмерной геометрии ЦЛВД к круговой двухмерной модели.

Преобразование геометрии сводится к двум последовательным шагам:

1. Преобразование геометрии индуктора.
2. Преобразование геометрии вторичного элемента.

На втором этапе производится расчет магнитного поля круговой двухмерной модели методом конечных элементов с помощью программного комплекса.

Решение полевой задачи двухмерной модели сводится к нескольким последовательным шагам:

1. Создание геометрической модели (чертежа объекта) на основе полученных на первом этапе геометрических преобразований.
2. Задание свойств материалов (электропроводность, магнитная проницаемость, коэрцитивная сила магнитов и т.д.) отдельных частей геометрической модели.
3. Задание нагрузок (величины токов, различных фазовых углов θ и т.д.).

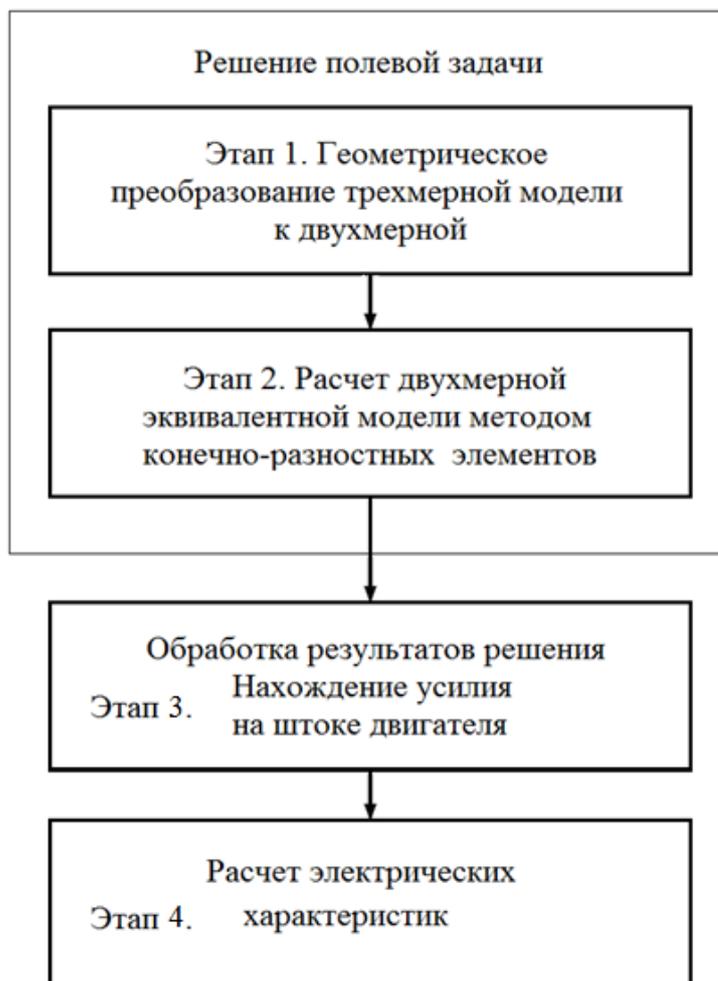


Рис. 6 Алгоритм расчета ЦЛВД.

4. Задание граничных условий (величины потенциалов поля на границе расчетной области, $A = 0$ и т.д.).

5. Построение сетки конечных элементов.

6. Решение задачи и обработка результатов (построение графиков и диаграмм изменения магнитной индукции по какому либо контуру, расчет интегральных значений момента двигателя при различных фазовых углах θ , расчет индуктивных сопротивлений фаз и т.п.)

На третьем этапе, после решения полевой задачи, по полученным интегральным значениям момента и индуктивности обмоток фаз L_d и L_q круговой двухмерной модели при различных эквивалентных фазовых углах θ , рассчитываются силы на вторичном элементе двигателя в соответствии с выражением (5), и магнитные сопротивления.

На четвертом этапе, находят электрические характеристики ЦЛВД и производят:

1. Расчет мощности потерь в двигателе.
2. Расчет полезной мощности двигателя.
3. Расчет напряжений (активных, реактивных, полных) потребляемых от источника при заданном токе.
4. Расчет КПД и $\cos \varphi$.

В **четвертой главе** рассматриваются возможные конструкции элементов индуктора и вторичного элемента модуля линейного вентильного электродвигателя. Производится выбор наиболее рациональной конфигурации магнитной системы с учетом получения максимальной величины тягового усилия.

На рис.7 представлены две конструкции элементов магнитной системы индуктора (а, б) и три конструкции вторичного элемента (в, г, д), которые были исследованы и проанализированы. Магниты на рисунке обозначены полюсами S-N, магнитомягкий ферромагнитный материал из Ст.3 обозначен штриховкой. Металлические части без штриховки выполнены из немагнитной аустенитной стали.

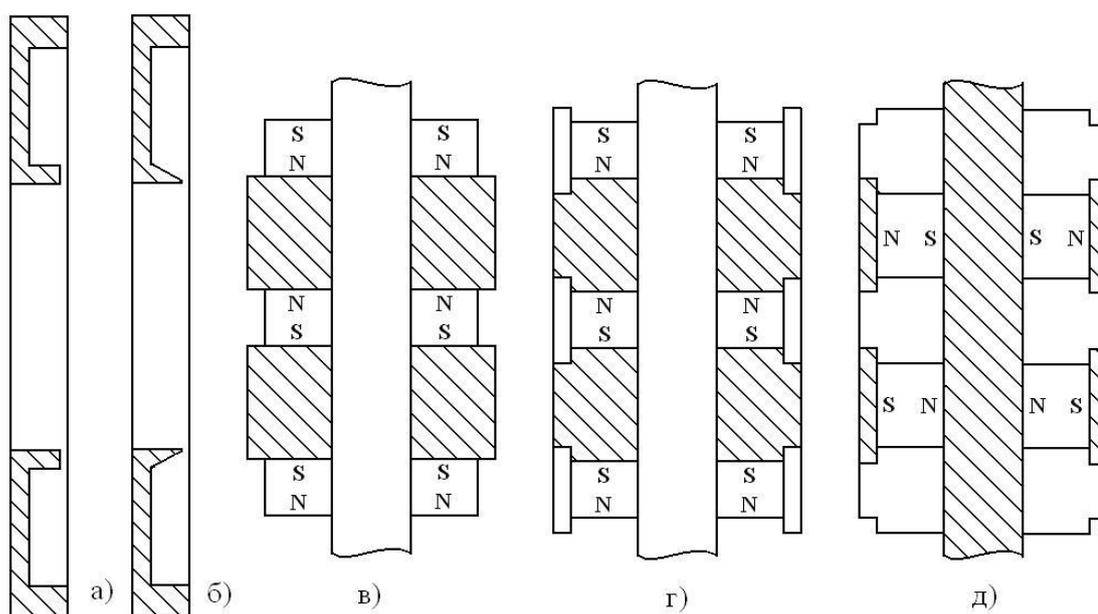


Рис. 7 - Варианты конструкций индуктора (а, б) и вторичного элемента (в, г, д) модуля ЦЛВД

Индуктор на рис. 7 представлен двумя конструкциями элементов магнитной системы:

- а) зубцовое деление без скоса при открытии паза.
- б) зубцовое деление со скосом при открытии паза.

Вторичный элемент на рис. 7 представлен тремя конструкциями элементов магнитной системы:

в) аксиальное расположение полюсов магнитов, магниты не прикрыты защитными кольцами из немагнитной (аустенитной) стали.

г) аксиальное расположение полюсов магнитов, магниты прикрыты защитными кольцами из немагнитной стали. Полюса выполнены из Ст.3. срезаны ступенькой для надежного крепления защитных колец. При этом уменьшается площадь полюсов относительно воздушного зазора машины.

д) радиальное расположение полюсов магнитов, магниты прикрыты защитными кольцами из ферромагнитной Ст.3. Межполюсные немагнитные участки сделаны из немагнитной стали, срезаны ступенькой для надежного крепления защитных колец. При этом увеличивается площадь полюсов относительно воздушного зазора машины.

Тяговое усилие для различных вариантов конструкции, показанных на рис. 7.1 рассчитывалось при одинаковых размерах диаметров индуктора, вторичного элемента и

полюсных делений. Ферромагнитные свойства материалов были идентичны для всех элементов конструкции.

При проектировании использовалась модульная структура построения индуктора ЦЛВД. На концах модуля расположены подшипники скольжения. Каждый модуль индуктора состоит из 96 зубцовых элементов. Все расчеты проводились для одного модуля ЦЛВД. Внешний диаметр индуктора ограничивался размером обсадных труб скважины. Внутренний диаметр индуктора выбирался из необходимого компромисса между максимальным диаметром вторичного элемента с магнитами, с одной стороны, и необходимостью уложить в элемент магнитопровода индуктора необходимое количество ампер-витков, с целью увеличения линейной токовой нагрузки и тягового усилия ЦЛВД.

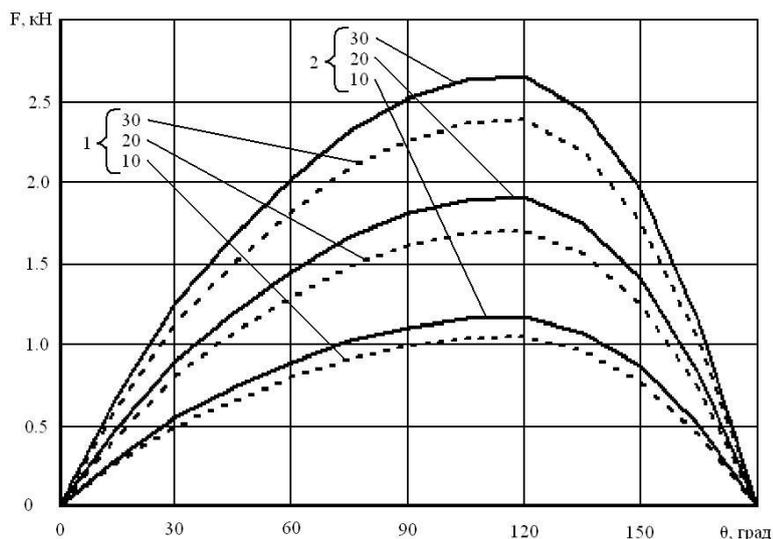


Рисунок 8 - Сравнение расчетных статических угловых характеристик для двух вариантов конструкций индуктора при токах 10, 20, 30 ампер (1 - пунктирной линией для конструкции на рис.7.а, 2 - сплошной линией для конструкции на рис.7.б)

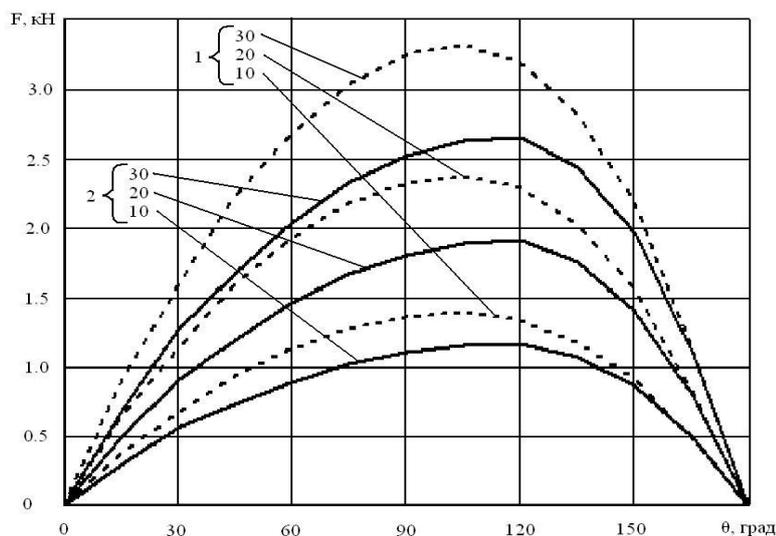


Рисунок 9 - Сравнение расчетных статических угловых характеристик для двух вариантов конструкций вторичного элемента при токах 10, 20, 30 ампер (1 - пунктирной линией для конструкции на рис. 7.г, 2 - сплошной линией для конструкции на рис. 7.в)

При расчетах модуля ЦЛВД сравнивались две конструкции зубцовых элементов, со скосом зубца при открытии паза (рис. 7.б) и без скоса (рис. 7.а). Конструкция вторичного элемента для обеих вариантов расчета представлена на рис. 7.в.

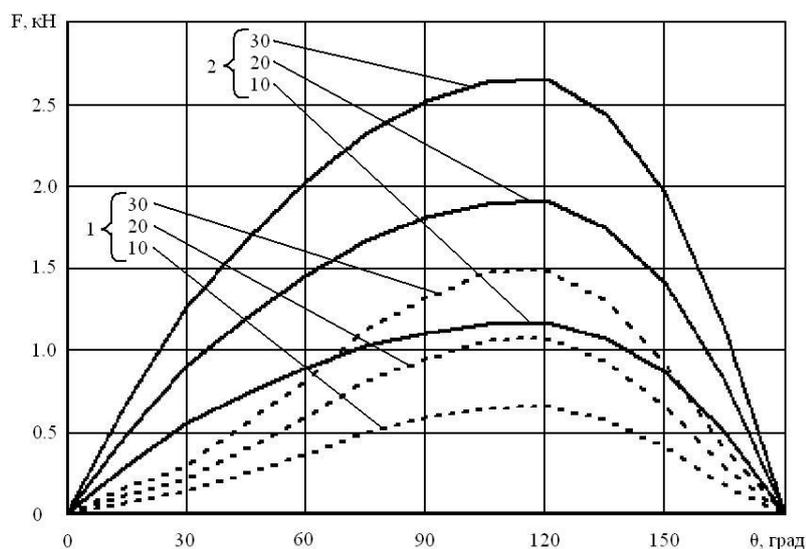
В результате расчетным путем получены тяговые усилия на вторичном элементе, для обеих этих вариантов. Расчет производился при токах обмоток индуктора в 10, 20, 30 ампер.

Сравнение статических угловых характеристик этих двух вариантов на рис. 8 показывает, что в варианте со скосом зубца, усилие возрастает на 12-14 процентов, из-за уменьшения замыкания магнитного поля индуктора через воздушный зазор между зубцами. В результате расчетов выяснено, что вариант со скосом обеспечивает большее тяговое усилие, он и был выбран для практической реализации в дальнейшем.

Ширина зубцового элемента индуктора определяет длину полюсного деления. Значение ширины зубцового деления выбирается при расчете ЦЛВД с точки зрения получения максимального тягового усилия. Линейному перемещению вторичного элемента на величину одного полюса соответствует 180 электрических градусов.

В результате многовариантных расчетов вели поиск рациональной конструкции вторичного элемента с использованием выбранной геометрии индуктора со скошенными зубцами (рис. 7.б). При расчетах различных конструкций вторичного элемента необходимо учитывать требование закрытия магнитов вторичного элемента металлом. Это необходимо для защиты магнитов от механических повреждений и позволяет сделать вторичный элемент гладким телом. Гладкое тело вторичного элемента позволяет уменьшить трение в подшипниках скольжения. Здесь возможны две конструкции, с аксиальным рис. 7.г и радиальным рис. 7.д направлением оси намагничивания магнитов. Необходимость обязательной целостности конструкции вторичного элемента, для его свободного перемещения, требует расширить или сжать полюсный наконечник для закрытия магнита металлом. В первой конструкции, с аксиальным (осевым) намагничиванием магнитов, элементы штока вторичного элемента, прикрывающие магниты выполнены в виде колец. Кольца выполнены из немагнитной нержавеющей стали. Во второй конструкции вторичного элемента, с радиальным намагничиванием магнитов, кольца прикрывающие магниты, выполнены из магнитной стали (Ст.3.). При этом ось штока также выполнена из немагнитной аустенитной стали, для предотвращения шунтирования магнитного поля между полюсами. Промежуточные кольца, разделяющие полюса, выполнены из немагнитной нержавеющей стали.

В результате расчетов и сравнения вариантов (7.в и 7.г) выяснилось, что в конструкции с аксиальным намагничиванием магнитов (рис. 7.г), у которого полюса скрепляются немагнитными кольцами, тяговое усилие больше, чем в конструкции без немагнитных колец (рис. 7.в). Это связано с тем, что в конструкции с немагнитными кольцами магнитное поле в зазоре приближается к синусоидальной (трапецеидальной) форме из-за срезов полюса, в которые устанавливаются немагнитные кольца, закрывающие магнит. Угловые статические характеристики усилия для этих двух вариантов приведены на рис. 9.



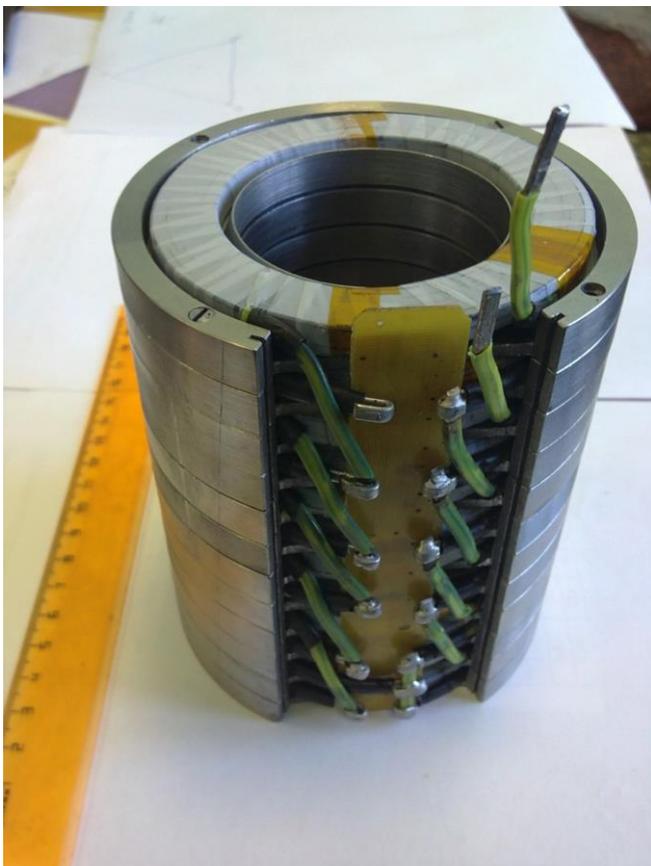
В конструкции вторичного элемента с радиальным намагничиванием магнитов (рис. 7.д) их закрывают кольца из магнитной стали. При этом из-за расширения полюса магнитное поле искажается и смещается внутри полюса. Значительная часть силовых линий старается замкнуться по кратчайшему пути и не участвует в создании тягового усилия. Магнитное поле, пространственно по поверхности полюса, распределяется заметно несинусоидально.

Рисунок 10 - Сравнение расчетных статических угловых характеристик для двух вариантов конструкций вторичного элемента при токах 10, 20, 30 ампер (1 - пунктирной линией для конструкции на рис. 7.д, 2 - сплошной линией для конструкции на рис. 7.в)

Происходит сильное насыщение стержня штока вторичного элемента, диаметр которого мы не можем увеличить из-за конструктивных соображений. Кроме того, если проанализировать конструкцию рис. 7.д, то видно, что во вторичном элементе используется только часть площади полюсов магнита, в отличие от конструкции рис. 7.в, где используются площади обеих полюсов. Это связано с тем, что в конструкции рис. 7.д магнитное поле одного из полюсов замыкается на соседние магниты, что уменьшает теоретическую площадь полюсов в два раза. Магнитные силовые линии проходят через воздушный зазор только от одного полюса магнита, второй же полюс замыкается силовыми линиями на соседний магнит. В конструкции на рис. 7.в используются площади обеих полюсов магнитов, так как магнитные силовые линии обеих полюсов магнита проходят через воздушный зазор полюсов. Угловые статические характеристики усилия для этих двух вариантов приведены на рис. 10. В результате сравнения угловых статических характеристик из вышеизложенного видно, что при радиальном расположении магнитов усилие меньше почти в два раза.

В результате сравнительных расчетов была выбрана, для практической реализации, конструкция с аксиальным намагничиванием магнитов вторичного элемента, которая представлена на рис. 7.г и конструкция индуктора на рис. 7.б. Эти конструкции индуктора и вторичного элемента позволяют получить максимальное усилие на вторичном элементе. Остальные варианты не обеспечивают необходимого усилия из-за нерационального распределения электромагнитного поля. По варианту индуктора на рис.7.б и вторичного элемента на рис.7.г был разработан эскизный проект и изготовлен модуль ЦЛВД для проведения экспериментальных исследований, конструкция индуктора которого приведена на рис. 11, а вторичного элемента на рис.12, сам модуль в сборе представлен на рис.13.

В **пятой главе** описываются испытания модуля ЦЛВД в статическом и динамическом режимах. Проводится сопоставление экспериментальных характеристик ЦЛВД с расчетными.



Изготовленный ЦЛВД состоит из неподвижного круглого индуктора и вторичного элемента с постоянными магнитами. Постоянные магниты группы 4МКГ46х21х8, имеют следующие параметры: $H_c = 1400$ кА/м, $B_r = 1,0$ Тл. Продольный разрез ЦЛВД (индуктора и вторичного элемента) показан на рис.1. На индукторе имеются зубцы и пазы, в которых находятся цилиндрические катушки индуктора. Полюсное деление $\tau = 30$ мм, а зубцовое деление $t_z = 10$ мм. 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 и направление которого изменяются с помощью ПЧ. Вторичный элемент имеет диаметр $D_2 = 55$ мм.

Рисунок 11 - Часть индуктора с трехфазными обмотками

Зазор δ между индуктором и вторичным элементом составляет 1,5 мм по всей длине. Каждая секция обмоток состоит из 20 витков, по 10 в два ряда. Из таких секций состоит вся трехфазная обмотка индуктора модуля ЦЛВД (рис.11).



Рисунок 12 - Вторичный элемент в сборе



Рисунок 13 - Модуль ЦЛВД в сборе на испытательном стенде для снятия статических характеристик

Снятие статических характеристик осуществлялось на испытательном стенде, приведенном на рис.13, следующим образом. Метка фиксировалась в нулевом положении на линейке. Затем с помощью лебедки к вторичному элементу прикладывалось усилие, которое измерялось с помощью динамометра, а сдвиг вторичного элемента Δl являлся смещением метки от нулевого положения.

Угол рассогласования θ в градусах определялся по формуле

$$\theta = 6 \times \Delta l, \quad (6)$$

где Δl – перемещение вторичного элемента в мм.

Данные статического эксперимента сводятся в таблицу 1.

Установка позволяет снять семейство статических угловых характеристик при разных токах в обмотках индуктора.

При снятии угловой статической характеристики индуктор закрепляется неподвижно, вторичный элемент соединяется с динамометром марки ДПУ-0,5-2, а второй конец динамометра соединен с лебедкой.

Реальный режим работы ЦЛВД предполагает перемещение вторичного элемента, связанного с насосом, который обеспечивает подъем столба жидкость на поверхность и работу в динамическом режиме.

Таблица 1 – данные эксперимента по снятию угловой статической характеристики зависимости F_c от θ при токе 30А

Δl , мм	0	2	4	5	6	7	8	10	12	13	14	15
F_c , кН	0	0,25	0,55	0,60	0,85	1,05	1,35	1,65	2,10	2,55	3,00	3,50
Θ , град	0	12	24	30	36	42	48	60	72	78	84	90

Таблица 2 – данные экспериментальных замеров развиваемых динамических усилий в зависимости от тока двигателя

F_d , кН	0,50	0,95	1,40	1,85	2,15	2,40	2,65	2,80	2,95	3,10
I , А	8	10,5	13	15	17,5	20	23	26	29	32

В таблице 2 показана зависимость замеренного динамического усилия, которое равно разности электромагнитного усилия и силы трения, т.е.

$$F_d = F_{\text{Э}} - F_{\text{тр}}, \quad (7)$$

При снятии угловой статической характеристики модуля ЦЛВД было получено максимальное усилие $F_c = 3,50$ кН при токе 30А. При этом шток перемещался внешним усилием с помощью ручной тали. Статическое тяговое усилие равнялось сумме электромагнитного усилия ЦЛВД и сил трения, т.е.

$$F_c = F_{\text{Э}} + F_{\text{тр}}, \quad (8)$$



Максимальное тяговое усилие, полученное при динамических испытаниях, составило 3,0 кН при токе 30А, это усилие равно электромагнитному тяговому усилию за вычетом сил трения, согласно (7).

Электромагнитное усилие при статических и динамических испытаниях предполагается одинаковым, и соответственно можно приравнять уравнения (7) и (8) для нахождения сил трения

$$F_d + F_{\text{тр}} = F_c - F_{\text{тр}}, \quad (9)$$

Поэтому получаем

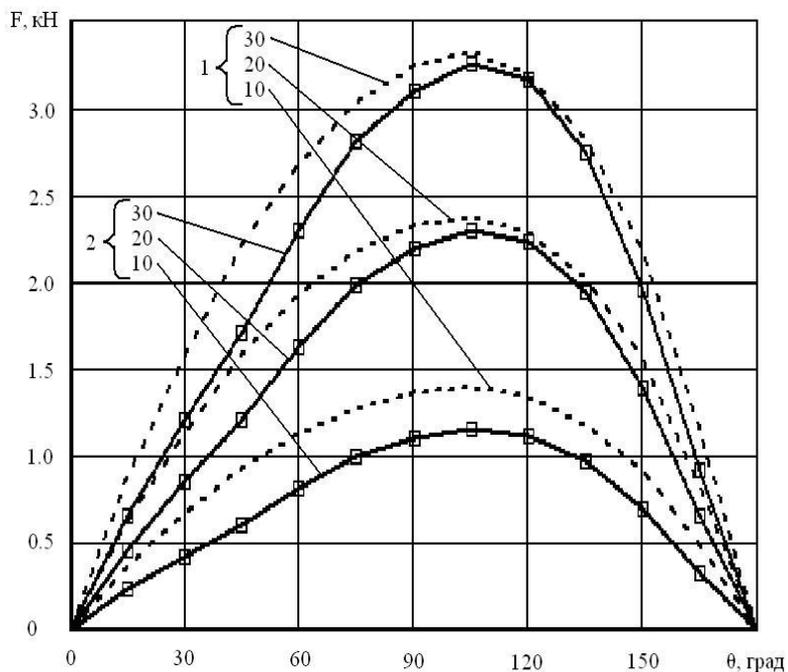
$$F_{\text{тр}} = (F_c - F_d) / 2 \\ = (3,5 - 3,0) / 2 = 0,25 \text{ кН.}$$

В результате проведенного экспериментального исследования получены результаты, необходимые для проверки адекватности математической модели ЦЛВД.

Рисунок 14 - Общий вид стенда для динамических испытаний

Результаты экспериментальной проверки, полученные с целью сравнения измеренных и вычисленных статических угловых характеристик, приведены на рис. 15.

В результате сравнения расчетных и измеренных угловых характеристик выяснили, что расчетное максимальное усилие оказалось выше на 5-20 процентов по сравнению с экспериментальными значениями в различных участках угловой характеристики.



Из сравнения кривых характеристик видно, что погрешность расчета и эксперимента растет при уменьшении рабочего тока и в целом не превышает 20 процентов. Выполненная экспериментальная проверка полученных результатов удовлетворяет инженерной точности. Существенные отклонения расчета и эксперимента на разных участках угловой характеристики связаны с возникновением эффекта тяжения, значительно влияющего на усилие вторичного элемента в зависимости от тока в обмотках.

Рисунок 15 - Сравнение расчетных и экспериментальных статических угловых характеристик при токах 10, 20, 30 ампер (1 – пунктирной линией для расчетных значений, 2 – сплошной линией для измеренных значений)

В шестой главе проведено исследование влияния тяжения между индуктором и вторичным элементом на усилие ЦЛВД. Глава рассматривает возможное изменение конструкции элементов модуля линейного вентильного электродвигателя для устранения влияния эффекта тяжения. Производится выбор наиболее рациональной конструкции ЦЛВД с учетом необходимости ослабления данного эффекта.

Вторичный элемент имеет симметричное положение относительно индуктора, т.е. горизонтальная ось вторичного элемента совпадает с осью индуктора, 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 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 неравномерности рабочего зазора. Неравномерность рабочего зазора приводит к появлению радиальных усилий притяжения вторичного элемента к индуктору. В результате вторичный элемент смещается, и зазор с одной стороны будет равен нулю, а с противоположной будет максимальным (рис. 16).

В этом случае силы трения между индуктором и вторичным элементом значительно увеличатся, так как они начинают соприкасаться, что приведет к уменьшению силы на выходе штока и возникнет дополнительный износ поверхностей индуктора и вторичного элемента. Поэтому расчет усилий тяжения и задача его устранения является важной для получения необходимых характеристик ЦЛВД.

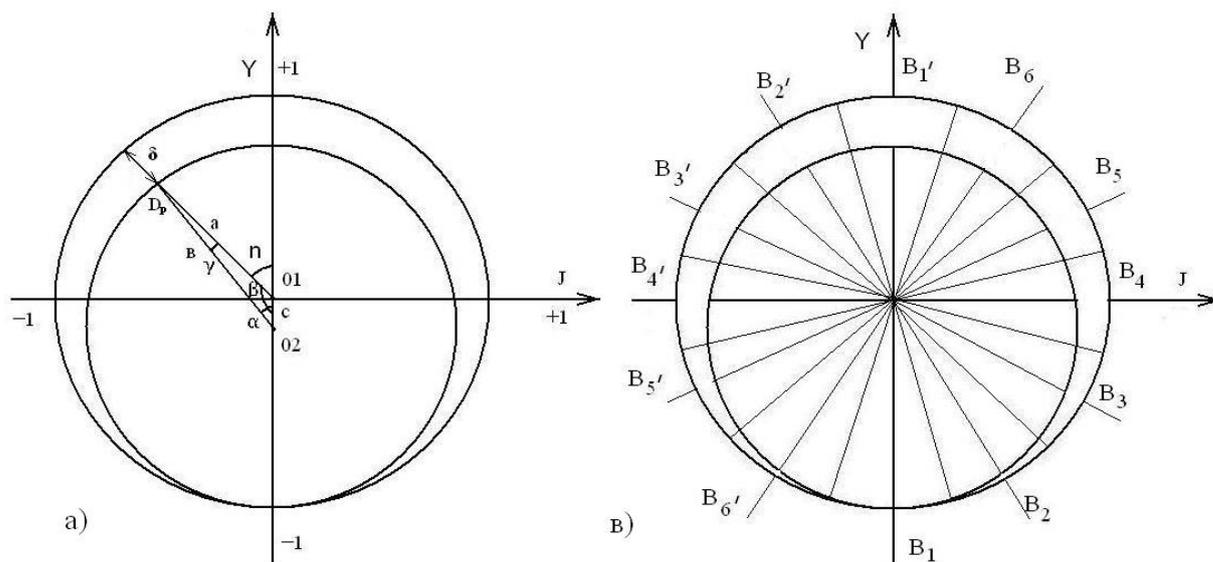


Рисунок 16 - Определение величины зазора δ в поперечном сечении ЦЛВД (а) и разбивка диаметра индуктора на сектора (в)

Произведем расчет усилия тяжения, обусловленного неравномерностью зазора между индуктором и вторичным элементом.

На рис. 16.а показано сечение ЦЛВД в поперечном направлении, когда вторичный элемент полностью притянут к индуктору и зазор $\delta_{\min}=0$, а зазор $\delta_{\max}=3\text{мм}$, т.е. вторичный элемент лежит на поверхности индуктора. Радиус индуктора $R_c=58$, а вторичного элемента $R_p=55$, при этом центры радиусов $O1$ и $O2$ будут сдвинуты на $C=1,5\text{мм}$ по оси Y . Зазор δ в зависимости от угла π будет определяться из треугольника $O1, O2, D_p$, стороны которых обозначены $R_p=b$, a , c , и углы α , β , γ .

Согласно теоремы синусов имеем
$$\frac{c}{\sin\gamma} = \frac{b}{\sin\beta} = \frac{a}{\sin\alpha} \quad (10)$$

где $\beta = 180^\circ - \pi$, из (1) имеем
$$\sin\gamma = \frac{c \times \sin\beta}{b} \quad (11)$$

$$\alpha = 180^\circ - \gamma - \beta \quad (12)$$

$$k = \frac{b}{\sin\beta} \quad (13)$$

$$a = \sin\alpha \times k \quad (14)$$

Из геометрии согласно рис. 16.а получаем зазор между индуктором и вторичным элементом в зависимости от угла π
$$\delta = R_c - a \quad (15)$$

На рис. 16.в показаны сектора, на которые разбит диаметр индуктора, всего 12 секторов. Угол π отсчитывается от оси Y и разбивается на 6 значений: $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$, которые определяют сектора разбивки индуктора. На протяжении дуги сектора считаем зазор неизменным. Эти зазоры рассчитываются по формулам (10-15), для каждой разбивки, и показаны на диаметре индуктора. Магнитные индукции в зазоре каждого сектора разбивки считаются неизменными. Относительная магнитная проницаемость индуктора и вторичного элемента принимается равной бесконечности, так как кривая размагничивания современных коэрцитивных магнитов с большой зоной линейного участка, расположенной во втором квадранте кривой размагничивания, может быть

заменена прямой вплоть до пересечения с осью Н. Значение H_0 дается в справочнике и прямая проводится по двум точкам H_0 и B_r . Упрощений, но достаточный для практических рекомендаций расчет можно вести в соответствии с МДС магнита. Рассчитаем через МДС силы в каждом секторе, в соответствии с разбивкой на рис.16.в, и сведем решение в табл.3.

Таблица 3 – расчет величины сил тяжения ЦЛВД

Оси сектора	Индукция на концах осей, Вс		Угол оси α , (градусы)	Силы на концах осей, Н		Результирующие силы по осям, F_{cp} , Н	Результирующая сила по оси Y, F_{yn} , Н
	n	n'		$F_{вn}$	$F_{вn'}$		
B1-B1'	0,836	0,615	0	3730	2017	1712,4	1712,4
B2-B2'	0,794	0,628	30	3362	2175	1187	1057,5
B3-B3'	0,756	0,66	60	3048	2323	725	426
B4-B4'	0,71	0,71	90	2020	2020	0	0
B5-B5'	0,66	0,756	120	2323	3048	725	426
B6-B6'	0,628	0,794	150	2175	3362	1187	1057,5
Итого						F_T ,	4679,4 Н

Силы, действующие на концах осей, направлены в разные стороны, поэтому в соответствии с системой уравнений результирующие силы на каждой оси равны

$$\begin{aligned}
 F_{c1} &= F_{в1} - F_{в1'} ; & F_{c2} &= F_{в2} - F_{в2'} ; \\
 F_{c3} &= F_{в3} - F_{в3'} ; & F_{c4} &= F_{в4} - F_{в4'} ; \\
 F_{c5} &= F_{в5} - F_{в5'} ; & F_{c6} &= F_{в6} - F_{в6'} ;
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

Составляющая усилия секции F_c по оси Y

$$F_{yn} = F_{cn} \times \cos(\alpha) \tag{17}$$

В результате находим силу тяжения F_m ЦЛВД, возникающую по оси y в соответствии с уравнением

$$F_m = \sum_1^n F_{yn} \tag{18}$$

Расчет показал, что величина силы тяжения доходит до значения 4,7 кН, так что даже при незначительном касании вторичного элемента и индуктора между собой возникают значительные силы трения, приводящие к резкому падению усилия на вторичном элементе.

Изменение зазора между индуктором и вторичным элементом является только одной из причин появления усилий тяжения. Также к увеличению эффекта тяжения приводит и несимметрия конструкции индуктора, что вызвано необходимостью изготовить продольный канал в ярме индуктора, где соединяются катушки между собой, образуя трехфазную систему (рис. 11).

Известно, что силы радиального притяжения зависят от индукции (от тока) в квадратичной зависимости. Эти силы можно существенно уменьшить, при условии, что зазор будет поддерживаться равномерно по окружности индуктора. С целью уменьшения усилий одностороннего тяжения, действующего на вторичный элемент, необходимо произвести ряд мероприятий:

- выполнить симметричную магнитную систему с расположением фазных каналов под углом 120° по окружности индуктора, и тем самым уменьшить силу трения;
- рассчитать усилия одностороннего тяжения и определить необходимость и число центраторов на единице длины;

Такое изменение конструкции необходимо для более равномерного распределения радиального магнитного поля. Это устраняет асимметрию поля и уменьшает силу тяжения. При несимметричной конструкции индуктора с одним каналом под трехфазную обмотку происходят искажения магнитных потоков по радиальной оси симметрии, что приводит к появлению дополнительной силы тяжения. В связи с этим от такой конструкции решено было отказаться, сделав новую конструкцию с тремя каналами для соединения катушек двигателя.

Также необходимо учитывать, что сила тяжения, действующая на вторичный элемент, изменяется в зависимости от тока ЦЛВД. Чем больше усилие на вторичном элементе и ток в обмотках, тем больше и сила трения между индуктором и вторичным элементом.



Рис. 17 - Вариант индуктора с тремя симметричными пазами, каждый под свою фазу

По данным экспериментов были построены зависимости тяговых усилий для модуля ЦЛВД приведенных двух конструкций F и F' , в зависимости от тока в обмотках индуктора. F – тяговое усилие модуля ЦЛВД без промежуточного подшипника (рис. 11), с одним каналом для фаз; и вариант модуля ЦЛВД с одним промежуточным подшипником F' (рис.17), с тремя симметричными каналами, для трех фаз. Применение новой конструкции индуктора позволило достичь значительного роста тягового усилия за счет уменьшения тяжения и сил трения. Экспериментально измеренная разница тяговых усилий для двух приведенных конструкций при токе 30 А составляет 1 кН. При этом на рис.18 видно, что существенная

разница усилий F и F' возникает при токах более 16 А. Уменьшение эффекта тяжения, за счет введения промежуточных подшипников и применения трех каналов под фазы индуктора, позволяет увеличить тяговое усилие, но есть и другие способы. Наиболее рациональным видится увеличение электромагнитной тяги на вторичном элементе.

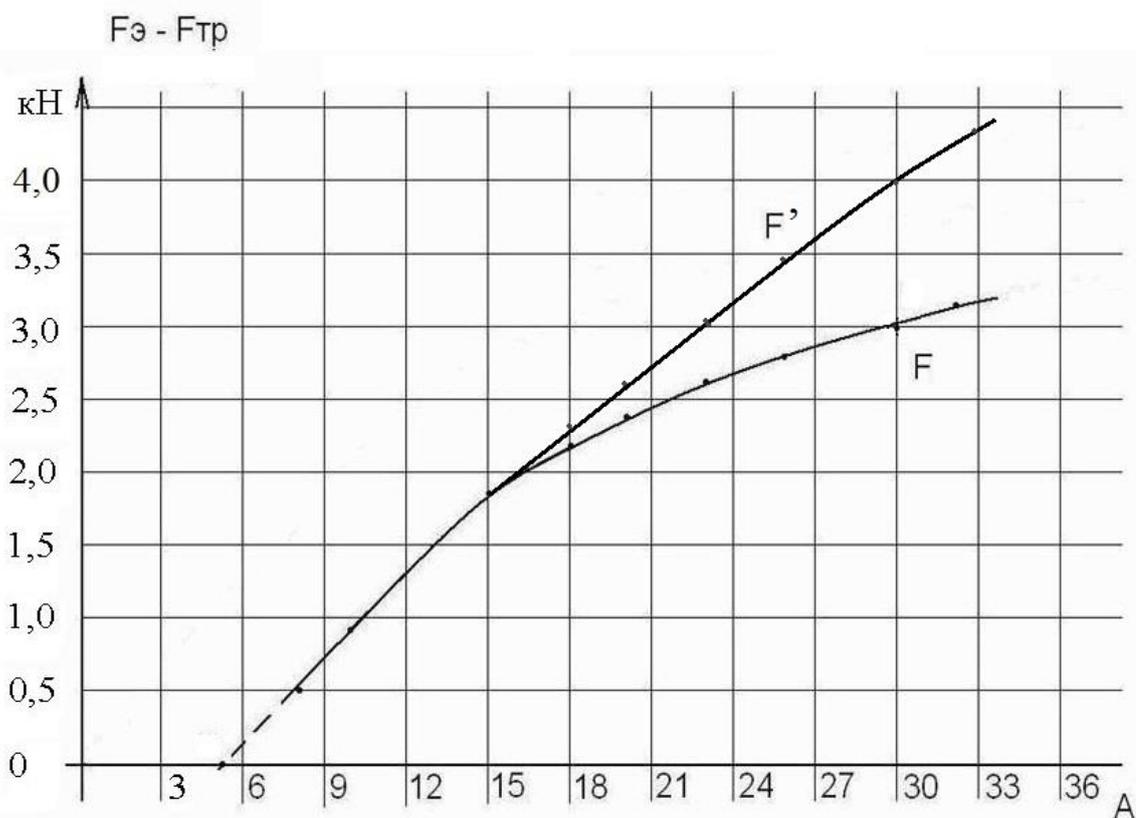


Рис. 18 - Усилие на вторичном элементе для двух конструкций: F и F'

В **заклучении** приведены основные выводы по результатам работы.

1. Обоснованы преимущества применения ЦЛВД в качестве привода плунжерного насоса, вместо станка-качалки, в нефтедобычных агрегатах.

2. Разработана математическая модель электромагнитных процессов в модуле ЦЛВД. Модель учитывает распределение магнитного поля в двигателе по всем трем координатам и позволяет преобразовывать трехмерную геометрическую модель к двухмерной по предложенным уравнениям.

3. Разработан алгоритм расчета электромагнитных процессов модуля ЦЛВД. Алгоритм совмещает численное моделирование электромагнитного поля на двухмерной полевой модели (однородной по третьей оси) и геометрические размеры двигателя с трехмерным распределением поля.

4. Проведен анализ возможных конструкций элементов индуктора и вторичного элемента ЦЛВД. В результате сопоставления различных вариантов, была выбрана конструкция индуктора и вторичного элемента, позволяющая получить максимальное тяговое усилие, при заданном номинальном токе обмоток.

5. Сравнение расчетных и измеренных угловых статических характеристик показало, что расчетное максимальное усилие оказалось выше на 5-20 процентов по сравнению с экспериментально полученным в модуле ЦЛВД. Погрешность расчетной модели и созданного модуля ЦЛВД растет при уменьшении рабочего тока. При максимальном рабочем токе погрешность равна 5%. При уменьшении рабочего тока она возрастает и не превышает 20%.

6. Исследование ЦЛВД показало наличие эффекта одностороннего тяжения, при котором вторичный элемент притягивается к индуктору. При этом возникают дополнительные силы трения, которые уменьшают тяговое усилие при номинальном токе на 25% (рис.18). Ослабление вредного эффекта тяжения реализовано за счет изменения конструкции индуктора ЦЛВД и установки дополнительных подшипников скольжения (центраторов) через каждые полметра по длине индуктора. Подшипники скольжения препятствуют прилипанию вторичного элемента к индуктору и уменьшают силы трения.

7. Результаты данной работы использованы при разработке и создании ЦЛВД в составе ПБЭНА на ПАО «Мотовилихинские заводы». Изготовленные образцы удовлетворяют поставленным требованиям технического задания (акт внедрения). В настоящее время опытный образец ЦЛВД длиной 8 метров подготавливается к опытно-промышленным испытаниям.

**Основное содержание работы отражено в следующих публикациях:
Статьи в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:**

1. Шутемов, С.В. Метод расчета электромагнитных процессов в цилиндрическом линейном вентильном двигателе / Н. В. Шулаков, С. В. Шутемов // *Электротехника*. 2014. № 11. С. 18-22. (0,6 п.л./0,4 п.л.)

Shutemov, S.V. A method for calculating the electromagnetic processes in a cylindrical linear electronic motor / N.V., Shulakov, S.V. Shutemov // *Russian Electrical Engineering*. 2014, Volume 85, Issue 11, pp. 663–667. (0,6 п.л./0,4 п.л.) (*индексирована в Scopus*)

2. Шутемов, С.В. Определение главных размеров линейных асинхронных электродвигателей с односторонним индуктором / Е. М. Огарков, С. В. Шутемов, А. М. Бурмакин // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. 2014. №4. С. 97-100. (0,6 п.л./0,1 п.л.)

3. Шутемов, С.В. Усилие тяжения цилиндрического линейного вентильного двигателя с постоянными магнитами между статором и вторичным элементом / А. М. Мирзин, А. Д. Коротаев, С. В. Шутемов // *Современные проблемы науки и образования (электронный журнал)*. 2013. № 6. 883. (0,7 п.л./0,3 п.л.)

4. Шутемов, С.В. Разработка преобразователя частоты каскадного типа для двигателя погружного насоса / И. В. Милюша, А. М. Мирзин, А. Д. Коротаев, С.В. Шутемов // *Современные проблемы науки и образования (электронный журнал)*. 2013. № 6. 882. (0,7 п.л./0,2 п.л.)

5. Шутемов, С.В. Моделирование цилиндрического линейного вентильного двигателя / А.Т. Ключников, А.Д. Коротаев, С.В. Шутемов // *Электротехника*. 2013. № 11. С. 14-17. (0,4 п.л./0,2 п.л.)

Shutemov, S.V. Modeling of a cylindrical linear AC electronic motor / A. T. Klyuchnikov, A. D. Korotaev, S. V. Shutemov // *Russian Electrical Engineering*. 2013, Volume 84, Issue 11, pp. 606–609. (0,4 п.л./0,2 п.л.) (*индексирована в Scopus*)

Другие публикации:

6. Шутемов, С. В. Исследование цилиндрического линейного вентильного электродвигателя для погружного бесштангового насоса. / С. В. Шутемов // *Фундаментальные исследования* 2016. № 12. Т. 4. С. 800-805. (0,7 п.л./0,7 п.л.)

7. Шутемов, С.В. Перспективы использования цилиндрического линейного вентильного двигателя в качестве привода плунжерных нефтедобычных агрегатов. / Н. В. Шулаков, С. В. Шутемов // *Фундаментальные исследования* 2016. № 12. Т. 4. С. 795-799. (0,7 п.л./0,3 п.л.)

8. Шутемов, С.В. Система управления цилиндрического вентильного двигателя возвратно-поступательного движения / М.С. Байбаков, А.Д. Коротаев, А.Т. Ключников, С. В. Шутемов //

Информационно-измерительные и управляющие системы. 2015. Т. 13. № 9. С. 64-69. (0,5 п.л./0,1 п.л.)

9. Шутемов, С. В. Применение цилиндрического линейного вентильного двигателя в качестве привода плунжерных нефтедобывающих агрегатов / Н. В. Шулаков, С. В. Шутемов // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике: сборник материалов II Международной научно-технической конференции, 21-22 апреля 2016 г., Пермь. Пермь, 2016. С. 161-167. (0,5 п.л./0,3 п.л.)

10. Шутемов, С. В. Метод расчета электромагнитных процессов в цилиндрическом линейном вентильном двигателе / Н. В. Шулаков, С. В. Шутемов // I Международная научно-техническая конференция «Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике», 24-25 сентября 2015 г., Пермь. С. 163-169. (0,4 п.л./0,2 п.л.)

11. Шутемов, С.В. Цилиндрический линейный вентильный электродвигатель для погружного бесштангового насоса / Ключников А.Т., Коротаев А.Д., Шулаков Н.В., Шутемов С.В // I Международная научно-техническая конференция «Автоматизации в электроэнергетике и электротехнике», 24-25 сентября 2015 г., Пермь. С. 158-162. (0,4 п.л./0,1 п.л.)

12. Шутемов, С.В. Алгоритм управления цилиндрическим линейным вентильным двигателем с постоянными магнитами / Байбаков М.С., Ключников А.Т., Коротаев А.Д., Шутемов С.В. // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике. 2015. Т.13. № 9. С.184-189. (0,4 п.л./0,1 п.л.)

13. Шутемов, С.В. Экспериментальные исследования цилиндрического линейного вентильного электродвигателя / А. Д. Коротаев, Н. В. Шулаков, С.В. Шутемов // XIV Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий», 17-20 марта 2014 г., Екатеринбург. С. 198-200. (0,4 п.л./0,2 п.л.)

14. Шутемов, С.В. Бездатчиковое управление вентильным двигателем / С.А. Бэтрэу, А.Т. Ключников, А.Д. Коротаев, А.М. Мирзин, С.В. Шутемов // Материалы краевой научно-технической конференции "Автоматизированные системы управления и информационные технологии", 22 мая 2013 г. - Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2013. С. 352-360. (0,5 п.л./0,1 п.л.)

Подписано в печать 20.02.2018. Тираж 100 экз.
Усл. печ. л. 1,5. Формат 60×84/16. Заказ № 644/2018.

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