

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Казанский государственный энергетический университет»

На правах рукописи



Чирков Дмитрий Андреевич

**ПОВЫШЕНИЕ ТЯГОВОГО УСИЛИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО  
ЛИНЕЙНОГО ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель –  
доктор технических наук, профессор  
Шулаков Николай Васильевич;  
кандидат технических наук, доцент  
Коротаев Александр Дмитриевич

Казань – 2020 г.

## Оглавление

Введение .....	4
Глава 1. Использование ЦЛВД для добычи нефти.....	13
1.1. Современные способы добычи нефти.....	13
1.2. Погружной бесштанговый насосный агрегат.....	19
1.3. Экспериментальные исследования ЦЛВД.....	26
1.4. Выводы по Главе 1.....	32
Глава 2. Электромагнитный расчёт цилиндрического линейного вентильного двигателя методом конечных элементов.....	33
2.1. Построение расчётной модели ЦЛВД в программном пакете ANSYS Maxwell.....	34
2.2. Расчёт угловой характеристики ЦЛВД.....	44
2.3. Расчёт рабочих характеристик ЦЛВД .....	48
2.4. Выводы по главе 2.....	53
Глава 3. Математическая модель ЦЛВД основанная на теории электрических и магнитных цепей.....	54
3.1. Расчёт магнитной цепи ЦЛВД.....	54
3.2. Расчёта электрической цепи ЦЛВД.....	67
3.3. Расчёт угловых и рабочих характеристик ЦЛВД по предлагаемой методике.....	76
3.4. Выводы по главе 3.....	82
Глава 4 Исследование и рационализация конструкции двигателя с целью увеличения тягового усилия.....	83
4.1. Исследование зависимости тягового усилия двигателя от параметров и геометрии магнитов .....	83

4.2. Исследование зависимости тягового усилия двигателя от коэффициента полюсного перекрытия, величины открытия паза и диаметра вторичного элемента.....	92
4.3. Рационализированная конструкция ЦЛВД.....	99
4.4. Экономическая оценка изменения конструкции ЦЛВД.....	101
4.5. Выводы по главе 4 .....	104
Заключение.....	105
Список используемой литературы.....	106
Приложения.....	114

## Введение

Рост потребления природных ресурсов и продуктов их переработки ставят всё новые задачи перед учёными и инженерами, что в свою очередь является постоянным двигателем технического прогресса. На сегодняшний день доля нефти и нефтепродуктов в мировой энергетике составляет более 46% [1], потребление нефтепродуктов при этом растёт с каждым годом.

Многие месторождения РФ имеют осложнённые условия добычи. А для использования истощенных месторождений требуется повышение глубины вновь вводимых скважин. [2- 5]. Для средне- и малодобитных скважин с осложнёнными условиями добычи наиболее подходящими являются насосы объёмного типа, в которых жидкая среда перемещается в результате периодического изменения объема занимаемой ею полости. Наиболее распространёнными в настоящее время насосами объёмного типа для добычи нефти являются плунжерные насосы с приводом от станка-качалки. Использование последних невозможно при добыче на глубине более 2000 метров из-за опасности обрыва штанг. Таким образом, эффективная разработка данных месторождений возможна только с помощью оборудования с совершенно новыми качественными показателями. Приводом плунжерного насоса может быть погружной линейный двигатель. Плунжерный насос с приводом от линейного двигателя образует собой погружной бесштанговый насосный агрегат (ПБНА), с помощью которого можно вести добычу в непрерывном режиме работы. Последнее является крайне важным при добыче нефти из малодобитных скважин, что подтверждено многочисленными исследованиями [5, 6].

Работа по созданию ПБНА для подъёма жидкости из средне- и малодобитных скважин ведётся ещё с 20-х годов прошлого века [7- 9]. В разное время были предложены разные варианты линейных приводов погружных агрегатов, в их числе погружные двигатели вращательного движения с редукторными системами, соленоид с подвижным массивным металлическим сердечником и линейные асинхронные двигатели (ЛАД). Приводы, содержащие

редуктор, показали низкий уровень надёжности. В итоге для реализации данного технического задания в начале двадцатого столетия были выбраны ЛАД [ 7, 10].

В советском союзе бесштанговые насосы для подъёма нефти на основе ЛАД были разработаны на базе первых в мире электробуров Харьковского политехнического института [8, 9]. Они получили простые по конструкции ПБНА, но имеющие длину до 10 м. Большая длина агрегатов осложняла их изготовление и эксплуатацию, кроме того они имели низкие энергетические показатели.

Важность разработки и промышленного использования ПБНА была впервые публично отмечена в материалах решения научно-инженерной комиссии Президиума УССР в Киеве по проблеме повышения нефтеотдачи пластов по вопросу: «О перспективах создания и использования бесштангового плунжерного насоса с линейным электроприводом» в 1979 году. [7]

Основные работы по разработке ПБНА на основе цилиндрических линейных асинхронных двигателей (ЦЛАД) проводились в институте ПермНИПИнефть [11-23], в институте электродинамики АН УССР [24] и Особом конструкторском бюро линейных электродвигателей в Киеве [25, 26], а также в специальном конструкторском бюро магнитной гидродинамики в Риге.

Использование ПБНА несло в себе следующие преимущества:

- Уменьшение образования эмульсии добываемой нефти в насосно-компрессорных трубах (НКТ);
- Возможность добычи нефти в наклонно-направленных и кустовых наклонно-направленных скважинах;
- Уменьшение общей металлоёмкости нефтедобывающей установки и затрат на строительные и монтажные работы. Что, в свою очередь, является важным в зоне вечной мерзлоты на заболоченных площадях и на морских промыслах;
- Возможность использования электрических потерь в двигателе для нагрева добываемой жидкости;

- Увеличение диапазона регулирования числа качаний и возможность изменения длины хода плунжера. Это даёт возможность подбирать режим работы по мере изменения физических и геологических свойств добываемой жидкости и характера пласта.

В ходе исследований было установлено, что линейные двигатели привода плунжерного насоса обязаны удовлетворять следующим требованиям:

1. Активная часть должна двигаться плавно с регулируемым ускорением в начале и в конце хода плунжера глубинного насоса.

2. Длина и частота хода плунжера должны быть регулируемы.

3. Двигатель должен быть совместим с используемыми конструкциями глубинных насосов.

4. Коммутация силовых цепей и цепей управления должна осуществляться бесконтактно, что обосновано требованиями взрывобезопасности и отдалённостью баз обслуживания.

5. Массогабаритные показатели должны быть минимальными.

6. Двигатель обязан иметь высокую надёжность, в связи с отсутствием возможности для ревизии и осмотра двигателя находящегося в скважине.

7. Тяговое усилие должно быть достаточным для добычи нефти из скважин глубины более 2000 метров.

В открытой печати было опубликовано большое количество вариантов технических решений и авторских свидетельств по вопросу бесштанговой добычи нефти из скважин. Тем не менее практического применения электропривода на основе ЦЛАД не получили из-за низких энергетических характеристик таких двигателей и сложности управления асинхронными двигателями. Удельное усилие, которых составляет порядка (900÷1100) Н/м, поэтому для получения необходимого тягового усилия длину ЦЛАД нужно увеличивать до (25-40) метров, что технически осуществить не представляется возможным.

В 80-х годах высказывалась идея использования для добычи нефти линейного вентильного двигателя с совмещенной (двухфункциональной)

обмоткой [27, 28]. Такой двигатель принципиально и конструктивно позволяет получить скорость движения вторичного элемента в пределах 0,01-1,5 м/с, осуществлять позиционирование электропривода, а также производить электромагнитное удержание вторичного элемента в режиме покоя.

Цилиндрический линейный вентильный двигатель с совмещенной обмоткой по сравнению с ЦЛАД позволяет примерно в (1,5-2,0) раза увеличить удельное тяговое усилие, но имеет ряд существенных недостатков, ограничивающих возможность применения этого двигателя для бесштанговой добычи нефти из скважин. Главные недостатки двигателя с совмещенной обмоткой следующие:

1. Подача питания должна осуществляться шестижильным кабелем.
2. Сложность силовой схемы электронного коммутатора и системы управления двигателем.

По этой причине цилиндрические линейные вентильные двигатели с совмещенной обмоткой также не нашли применения при создании бесштангового электропривода погружных плунжерных насосов.

За последние двадцать лет в области промышленного производства высококоэрцитивных постоянных магнитов был совершён значительный прорыв [29,30], открывший новое направление линейного привода.

Наибольшего прогресса в разработке линейного погружного электродвигателя добились учёные из КНР. Ими был разработан линейный синхронный двигатель с частотным управлением, в составе вторичного элемента которого используются редкоземельные постоянные магниты. В настоящее время он проходит опытно-промысловые испытания (ОПИ) в ряде российских нефтедобывающих компаний таких как «Лукойл» и «РН-Няганьнефтегаз». [31]

Параллельно с КНР разработкой ЦЛВД на основе редкоземельных постоянных магнитов начали заниматься учёные кафедры Электротехники и электромеханики (ЭТ и ЭМ) Пермского национального исследовательского

политехнического университета, в их числе профессор Н.В. Шулаков, доцент А.Д. Коротаев, доцент А.Т. Ключников, С. В. Шутёмов и др.. [33-37].

Опытные образцы двигателя, разработанные на кафедре ЭТ и ЭМ, имеют удельное тяговое усилие на метр длины статора не более 4000 Н. [38, 39] Для создания ПБНА необходим ЦЛВД не превышающий длиной 8 метров, а такое возможно, только если он будет развивать удельное тяговое усилие 5000 Н/м. Помимо самой конструкции двигателя кафедрой была разработана новая методика расчета электромагнитного поля ЦЛВД, позволяющая рассчитать тяговое усилие двигателя [40-42]. Но эта методика содержит предварительные операции по приведению ЦЛВД к вращающейся синхронной машине, что значительно усложняет решение поставленной задачи. Кроме того данный метод не подразумевает расчёта рабочих характеристик двигателя.

Таким образом, не только усовершенствование конструкции ЦЛВД для привода ПБНА, но и создание комплекта методик для его расчета является очень важной и актуальной задачей.

**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 полученными 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 позволит 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 позволит 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 изначально 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 вентильного 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, 2018г.);
- 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, 2019г.)
- 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 публикации в рецензируемых научных журналах, определённых ВАК, и 2 в журналах индексируемых в SCOPUS.

**Личный вклад соискателя.** Результаты, представленные в диссертации и отраженные в публикациях, получены при непосредственном участии соискателя. Автор поставил цели и задачи исследования. 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 113 страницах машинописного текста, иллюстрирован 58 рисунками, 14 таблицами. Библиографический список включает 80 наименований.

## **Глава 1. Использование ЦЛВД для добычи нефти.**

### **1.1. Современные способы добычи нефти.**

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) [5].

Наиболее распространённым видом механизированной добычи нефти являются УШГН, которыми оборудовано более половины фонда эксплуатируемых нефтяных скважин [2, 43, 44]. УШГН так же называются станками-качалками.

Штанговый глубинный насос, изображённый на рис. 1.1, является насосом объёмного типа. Работа насоса объёмного типа поддерживается возвратно-поступательным движением плунжера 1, приводимого в движение наземным электродвигателем 2. Энергия с поверхности на плунжер передаётся через колонну штанг 3. Плунжер совершает возвратно-поступательные движения вверх-вниз по хорошо подогнанному цилиндру с частотой порядка 3-10 качаний в минуту. Конструкция плунжера включает два обратных шаровых клапана. Верхний клапан 4 называется также выкидным. Он пропускает жидкость при движении плунжера вниз и задерживает при движении вверх. Нижний клапан 5, он же – всасывающий, наоборот, пропускает жидкость при движении плунжера вверх и задерживает при движении вниз. Благодаря совместной работе клапанов поддерживается движение жидкости.

Самая верхняя штанга 6 называется сальниковым или полированным штоком. Проходя через сальник 7 на устье скважины, она соединяется с головкой балансира станка-качалки 8 с помощью траверсы и гибкой канатной подвески. Вся конструкция станка-качалки установлена на массивном основании 9.

Станки-качалки работают наиболее эффективно на низко- и среднедебитных скважинах. Они могут создавать высокий напор с диапазоном подачи от 5 до 50 м<sup>3</sup>/сут. При этом наибольшее значение КПД в 37% станки-качалки достигают при подаче, равной 35 м<sup>3</sup>/сут.

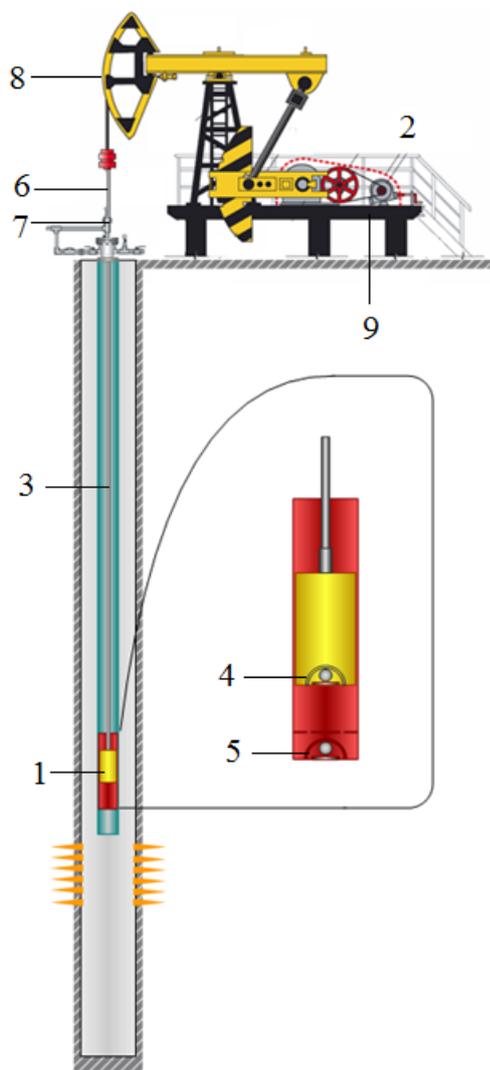


Рис. 1.1 Размещение УШГН на скважине

УШГН имеет ряд преимуществ перед другими механизированными способами добычи, а именно:

- ремонт УШГН можно производить непосредственно на нефтепромыслах;
- относительно высокий КПД при низком или среднем дебите;
- приводом станка-качалки могут служить разные электродвигатели;
- объёмный тип насоса даёт возможность применения на скважинах с тяжёлой нефтью, на пескопроявляющих скважинах и при высоком газовом факторе.

Помимо преимуществ УШГН имеют ряд существенных недостатков:

- высокая себестоимость, обусловленная наличием колонны штанг, изготовленной из дорогих легированных сталей, массивным основанием и общей высокой металлоёмкостью конструкции;
- колонны штанг подвержены коррозионно-усталостному разрушению, наиболее сильно это проявляется в наклонно направленных скважинах;
- из-за деформации колонны штанг, теряется длина хода плунжера насоса, от чего падает коэффициент заполнения насоса и его эффективность;
- утечка нефти через устьевой сальник;
- глубина добычи составляет не более 2000 метров из-за опасности обрыва колонны штанг;
- насосно-компрессорные трубы и колонна штанг подвержены механическому истиранию, что уменьшает долговечность и КПД установки;
- частота возвратно-поступательного движения плунжера ограничена из-за инертности конструкции;
- невозможность регулирования длины хода плунжера во время работы установки.

Следующим по распространённости способом добычи нефти является УЭЦН. [45, 46]. Скважины, оборудованные УЭЦН, составляют около 35% всего фонда скважин.

Расположение УЭЦН в скважине изображено на рис. 1.2. Маслозаполненный электродвигатель 1 приводит во вращение лопасти многоступенчатого центробежного насоса 2, обеспечивающие посредством центробежной силы напор жидкости в насосно-компрессорных трубах 3 (НКТ). Двигатель соединяется с насосом через звено гидрозащиты 4. Питание двигателя осуществляется через бронированный трехжильный кабель 5, который проходит через устьевую арматуру 6; и подключён к станции

управления 7 (СУ). Станция подключается к трёхфазной сети через трансформатор 8. УЭЦН снабжена системой телеметрии 9.

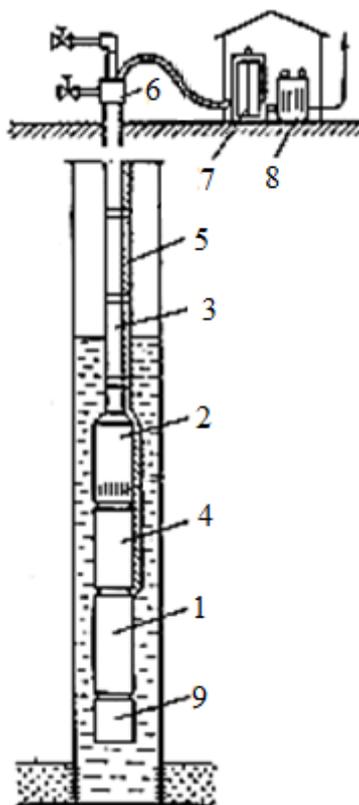


Рис. 1.2 Расположение УЭЦН на скважине

Преимуществами УЭЦН по сравнению со станками-качалками являются:

- малая металлоемкость;
- широкий диапазон регулируемых характеристик;
- высокий КПД при высоком дебите;
- большой межремонтный период с высоким показателем добычи;
- возможность добычи на глубине более двух километров;
- возможность добычи в наклонно-направленных скважинах.

Однако, УЭЦН имеет и свои недостатки, одним из которых является необходимость установки звена гидрозащиты для герметизации ведущего вала. Но самый существенный недостаток УЭЦН в том, что его использование ограничивается лишь многодебитными скважинами. КПД УЭЦН падает ниже

35% при дебите менее 80 м<sup>3</sup>/сут. Из-за этого УЭЦН нельзя использовать при объёме добычи ниже 40 м<sup>3</sup>/сут из-за чрезвычайно низкого КПД [47]. Исходя из этого, целевыми для УЭЦН являются многодебитные скважины [1, 3, 48].

Менее распространённым вариантом добычи нефти из скважин является погружной бесштанговый насосный агрегат (ПБНА), состоящий из плунжерного насоса и погружного линейного двигателя. Попытки создания ПБНА начались ещё в прошлом веке на основе линейных асинхронных двигателей (ЛАД), но только с появлением мощных редкоземельных магнитов получилось создать ПБНА на основе линейного синхронного двигателя. ЦЛВД, рассматриваемый в данной работе, является таким двигателем. ПБНА на основе ЦЛВД сочетает в себе преимущества УЭЦН и УШГН, а именно:

- малая металлоемкость;
- широкий диапазон регулируемых характеристик;
- большой межремонтный период;
- возможность добычи на глубине более двух километров;
- возможность добычи в наклонно-направленных скважинах;
- высокий КПД при низком или среднем дебите;
- отсутствие устьевого сальника;
- отсутствие звена гидрозащиты.

На рис.1.3 показано расположение ПБНА на скважине. ЦЛВД 1 приводит в движение плунжер насоса 2, поднимающего жидкость в НКТ 3. Питание двигателя осуществляется через бронированный трехжильный кабель 4, который проходит через устьевую арматуру 5; и подключён к СУ 6. Станция подключается к трёхфазной сети через трансформатор 7. ПБНА снабжён системой телеметрии 8.

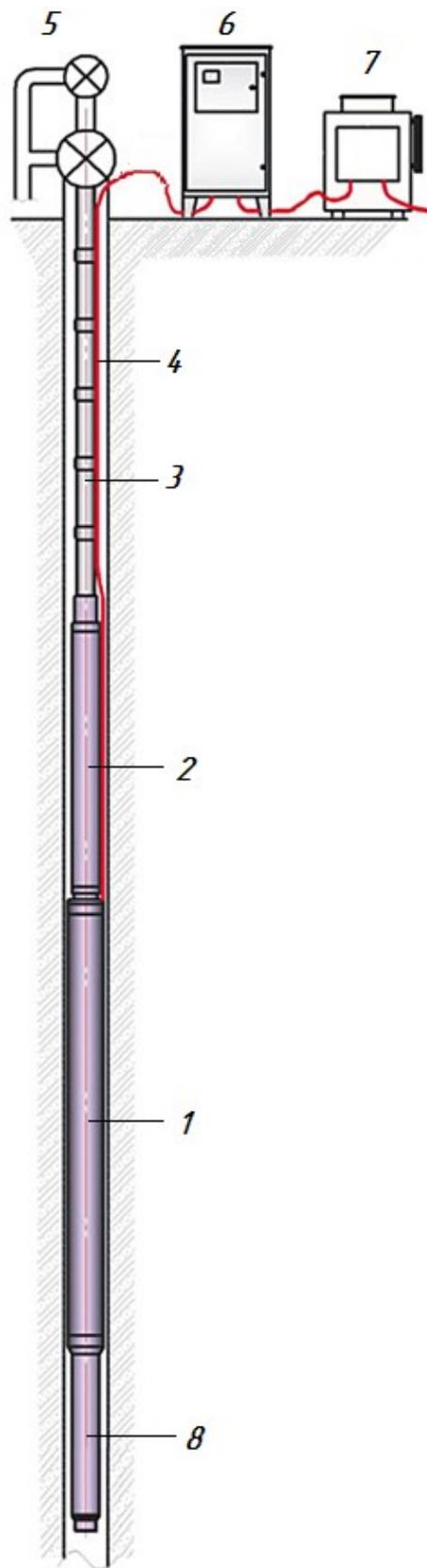


Рис. 1.3 Расположение ПБНА на скважине.

## 1.2 Погружной бесштанговый насосный агрегат

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 малодебитных скважинах с помощью станков-качалок глубиной от 2000 метров и более имеет на данный момент только одно практическое решение – ПБНА на основе ЦЛВД.

К приводу погружного бесштангового насосного агрегата предъявляются следующие требования:

1. Движение плунжера во время подъёма нефти должно быть плавным. Изменение скорости плунжера так же должно проходить плавно во время разгона и торможения плунжера при движении как вверх так и вниз.
2. Число двойных ходов плунжера и длина его хода должны иметь возможность изменяться без извлечения двигателя из скважины.
3. Их регулирование должно производиться отдельно и независимо.
4. На обратном ходу (при движении вниз) двигатель будет работать без нагрузки. Что значит, обратный ход необходимо производить на пониженном токе.
5. Усилие линейного двигателя не должно быть меньше 5000 Н/м, что бы при добыче нефти на глубине 3000 м длина ЦЛВД не превышала 8-ми метров.
6. Привод должен поддерживать низкую частоту качаний порядка 0-8 двойных ходов минуту для обеспечения непрерывной работы скважины.

На ряду с требованиями к приводу есть и общие требования к технологичности, надёжности и экономической целесообразности конструкции погружного бесштангового насосного агрегата [49, 50].

В настоящее время возникла необходимость форсировать разработки электроприводов нового поколения в РФ, доведения их до промышленного внедрения и дальнейшего продвижения на мировой рынок. На сегодняшний день основным изготовителем и поставщиком ПБНА в мире является Китайская народная республика.

Работы по созданию ПБНА, проводившиеся в КНР, были засекречены и в открытую не публиковались. Работы велись 7-8 лет, за это время было создано несколько установок ПБНА, испытание которых проводилось с июня 2007 года на скважинах нефтепромыслов Дацин и Ляохэ в течение года. Установки быстро выходили из строя, время их непрерывной работы было непродолжительным. ПБНА извлекали из скважин для устранения неисправностей и доработки, после чего они вновь опускались в скважины. В результате ПБНА были доведены до пригодного к эксплуатации уровня. Учитывая высокую эффективность ПБНА, было решено увеличить их количество до 30 штук для испытаний на глубоких скважинах. Основное внимание в Шэнлинской нефтяной компании было затрачено на технологию изготовления и увеличения продолжительности безаварийной работы ПБНА. После долгого периода испытаний Шэнлинская нефтяная корпорация с 2009 года стала интенсивно рекламировать ПБНА как основное средство добычи нефти для средне- и низкодебитных скважин. Информация по созданию установок ПБНА в других странах отсутствует.

Для нефтяных компаний вопрос эффективной эксплуатации малодебитного фонда в настоящее время остается достаточно важным. Подбор техники и технологии для подъема жидкости из таких скважин является наиважнейшей задачей нефтедобычи. Для ее решения был выбран вариант использования ПБНА, поэтому по инициативе ООО «Центр ИТ» совместно с ООО «Лукойл-Пермь» и АО «РН-НяганьНефтегаз» были проведены опытно-промышленные испытания (ОПИ) ПБНА [31, 51].

Для проведения испытаний были закуплены шесть комплектов ПБНА производства КНР, которые были положены в основу для дальнейшего совершенствования и адаптации к условиям нефтедобычи на территории РФ.

Для оценки энергоэффективности закупленного оборудования, скважины подбирались исходя из наибольшей конкурентоспособности. Было принято решение сравнить ПБНА с наиболее эффективной технологией нефтедобычи – УЭЦН, работающей в периодическом режиме. ПБНА показал большее энергопотребление чем УЭЦН, что было обусловлено исключительно разницей во времени работы.

Чтобы провести более точную оценку энергопотребления, было принято сравнить ПБНА с другими способами добычи. Для испытаний были подобраны скважины с близкими значениями дебита и свойствами добываемой жидкости. Последующий анализ показал преимущество ПБНА над УЭЦН, эксплуатируемыми в режиме автоматического повторного включения. А так же безусловное превосходство над УШГН вне зависимости от глубины спуска в скважину [31]. Последнее обусловлено во многом тем, что коэффициент подачи плунжерного насоса ПБНА, за счет отсутствия колонны штанг и потерь на растяжение и сжатие, в два раза превосходит коэффициент подачи УШГН. За счет непрерывной эксплуатации и высокой степени заполнения насоса КПД ПБНА существенно повышается по сравнению с установками УШГН.

Основные преимущества эксплуатации скважины с использованием ПБНА выражены в значительном снижении суточного потребления электроэнергии вкупе с приростом дебита. За период эксплуатации ПБНА не отмечены случаи простоя скважины или срыва добычи по причине неисправности или отказа оборудования.

На основании полученных технических характеристик в процессе ОПИ сделаны выводы о необходимости работ по оптимизации погружных ЦЛВД с целью увеличения удельного тягового усилия, снижения длины и значительного увеличения надёжности ПБНА.

Известно, что теоретические и экспериментальные исследования ЦЛВД осуществляются в ряде вузов России и, в частности, в Воронежском государственном техническом университете [52-54]; Альметьевском государственном нефтяном институте [55, 56]; Башкирском государственном аграрном университете [57]; Южно-Российском государственном политехническом университете (НПИ) имени М.И. Платова [58].

Используя теоретические исследования, выполненные в ряде вузов и научных организациях России, а также за рубежом, в корпорации «Триол» (г. Москва) и на Лысьвенском заводе нефтяного машиностроения (г. Лысьва, Пермский край) были созданы установки плунжерного насоса с линейным вентильным электроприводом. В настоящее время эти установки проходят испытание на стендах и реальных скважинах.

Параллельно с КНР разработкой ЦЛВД начали заниматься учёные кафедры электротехники и электромеханики (ЭТиЭМ) Пермского национального исследовательского политехнического университета (ПНИПУ). Учёными кафедры был спроектирован и изготовлен экспериментальный ЦЛВД, детали которого изображены на рис. 1.4-1.6. При общей длине двигателя в 1 метр и фазном токе 30 А, его тяговое усилие составило 3185 Н [38]. Опытный образец погружного ЦЛВД же будет сборным и состоять из отдельных модулей, длина которых будет не более одного метра. В зависимости от необходимого тягового усилия определяется число модулей и длина реального погружного ЦЛВД. Область применения ЦЛВД не ограничивается добычей нефти, он может использоваться в качестве возвратно-поступательного электропривода многих общепромышленных механизмов. На рис. 1.4 представлен статор прототипа ЦЛВД, основными элементами которого являются статорные чашки и катушки. Чашка и катушка, показаны на рис.1.5. На рис. 1.6 показан вторичный элемент ЦЛВД в сборе, состоящий из чередующихся стальных полюсов и кольцевых магнитов.



Рис. 1.4 Магнитная система статора с обмотками прототипа ЦЛВД.

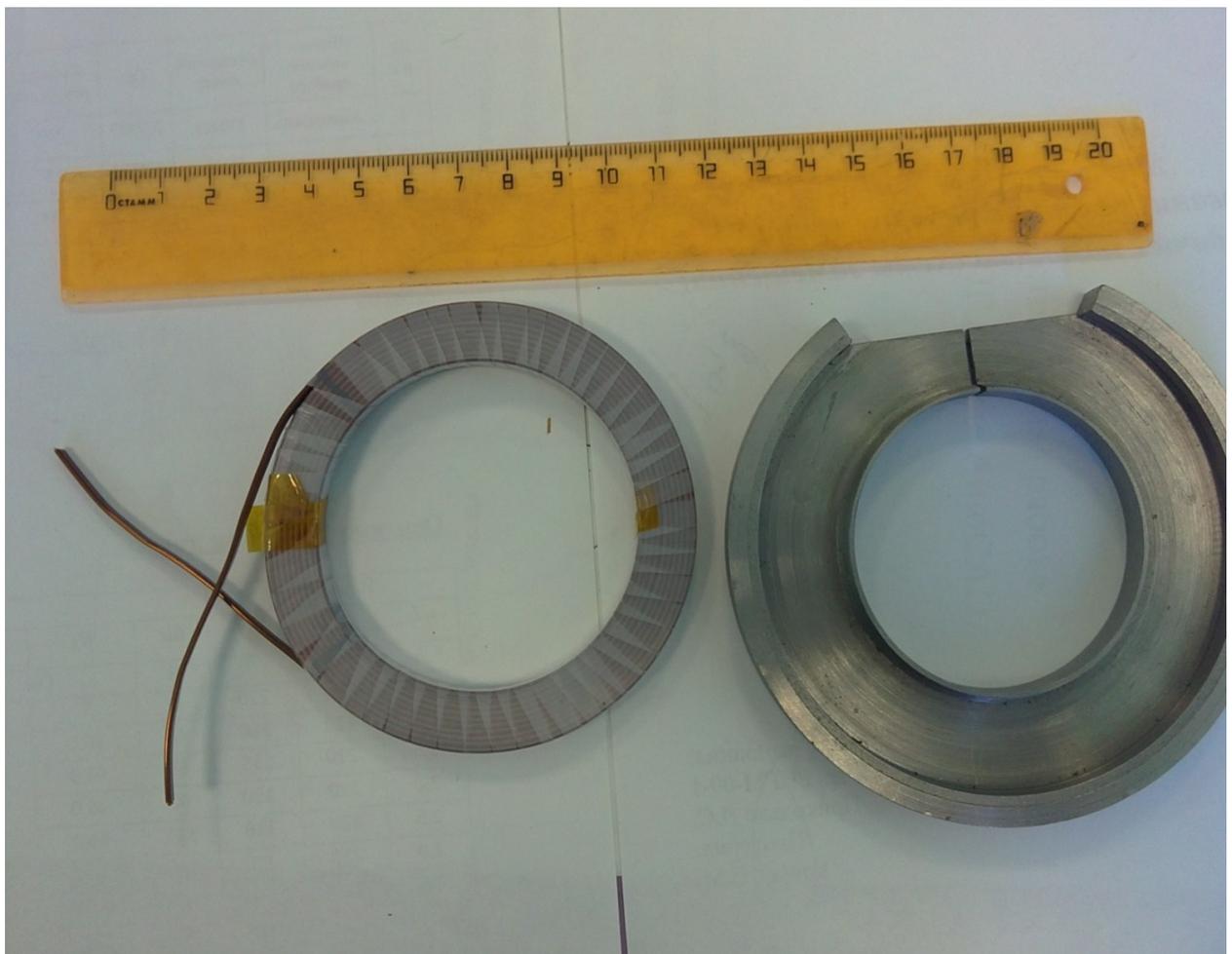


Рис. 1.5 Чашка и катушка статора прототипа ЦЛВД.

Статорные чашки изготовлены из стали 3. Концентрические катушки содержат по 20 витков обмотки, изготовленной из медной шины сечением 3 мм<sup>2</sup>. Кольцевые магниты Sm-Co расположены на немагнитном штоке из нержавеющей стали.



Рис. 1.6 Вторичный элемент в сборе.

В ПНИПУ была разработана система управления для реализации возвратно-поступательного движения вторичного элемента ЦЛВД. Её функциональная схема изображена на рис. 1.7 и содержит следующие элементы:

ПК – персональный компьютер, на который вводятся исходные данные и который осуществляет управление;

ДТ – датчик температуры обмотки статора, встроенный в прототип ЦЛВД и служащий для предотвращения перегрева двигателя;

ДП – датчик нулевого положения вторичного элемента;

ПЧ – преобразователь частоты.

ЦЛВД – прототип ЦЛВД;

Управление прототипом ЦЛВД с помощью ПЧ осуществлялось на частотах питающего напряжения (0.5÷6) Гц. Прототип ЦЛВД укомплектован датчиком температуры обмотки статора и датчиком положения.

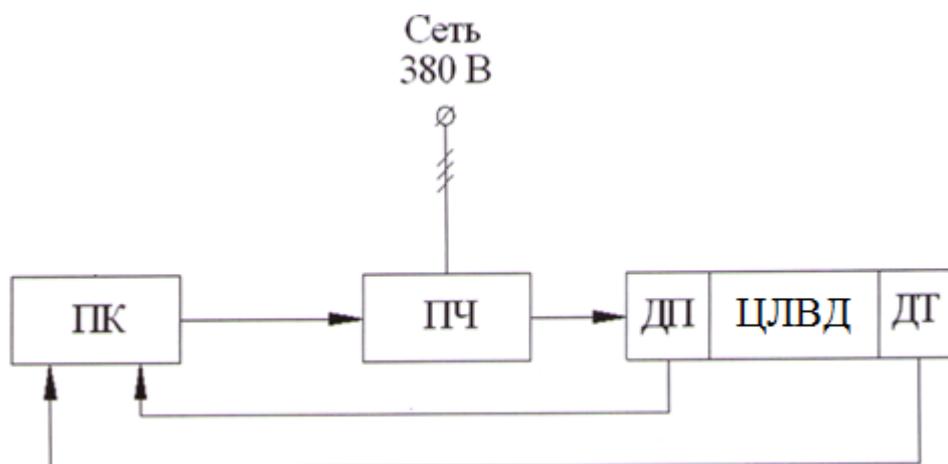


Рис. 1. 7. Система управления приводом на базе ЦЛВД.

Датчик температуры отслеживает изменение температуры обмотки двигателя и отвечает за экстренное отключение двигателя при превышении её критического значения. Программное обеспечение системы управления реализовано на языке C+ и подходит для использования на персональном или промышленном компьютере. ПК осуществляет управление ПЧ через преобразователь интерфейсов RS-485/USB. На базе протокола передачи данных ModBus [59-64].

Необходимо отметить, что в послании Президента РФ В.В. Путина от 03.12.2015 г. одной из задач, поставленной перед учеными – это работа на опережение и на импортозамещение. В этом ключе в Пермском национальном исследовательском политехническом университете в последние годы форсировались научно-исследовательские работы по созданию и разработке ЦЛВД [32-42,59-64]. До сих пор КНР является основным поставщиком ПБНА на рынок РФ, что в свою очередь может угрожать экономической и энергетической безопасности Российской Федерации. Выпустив, свою линейку

погружных насосов Россия вполне может стать мировым лидером по экспорту ПБНА.

### 1.3 Экспериментальные исследования прототипа ЦЛВД

Программа управления позволяет изменять величину и фазу напряжения преобразователя в диапазоне частоты от 0.5 Гц до 7 Гц, что позволило реализовать возвратно-поступательный режим работы ЦЛВД [59] на испытательном стенде рис. 1.8.



Рис. 1.8 Испытательный стенд ЦЛВД с преобразователем частоты и СУ.

Стенд для снятия статических характеристик представлен на рис. 1.9. Как показано на этом рисунке вторичный элемент ЦЛВД сочленяется с динамометром марки ДПУ-05-2. По обмоткам протекает постоянный ток  $I$  от трёхфазного двухполупериодного выпрямителя D1-D6, схема которого

изображена на рис. 1.10. Конденсатор С служит для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения. Величина выпрямленного напряжения и тока  $I$  регулируется с помощью трехфазного лабораторного автотрансформатора в пределах от 0 до 50 А. В этом случае токи в обмотках будут неизменными во времени и иметь значения  $i_a=I$ ,  $i_b=i_c=-I/2$ .

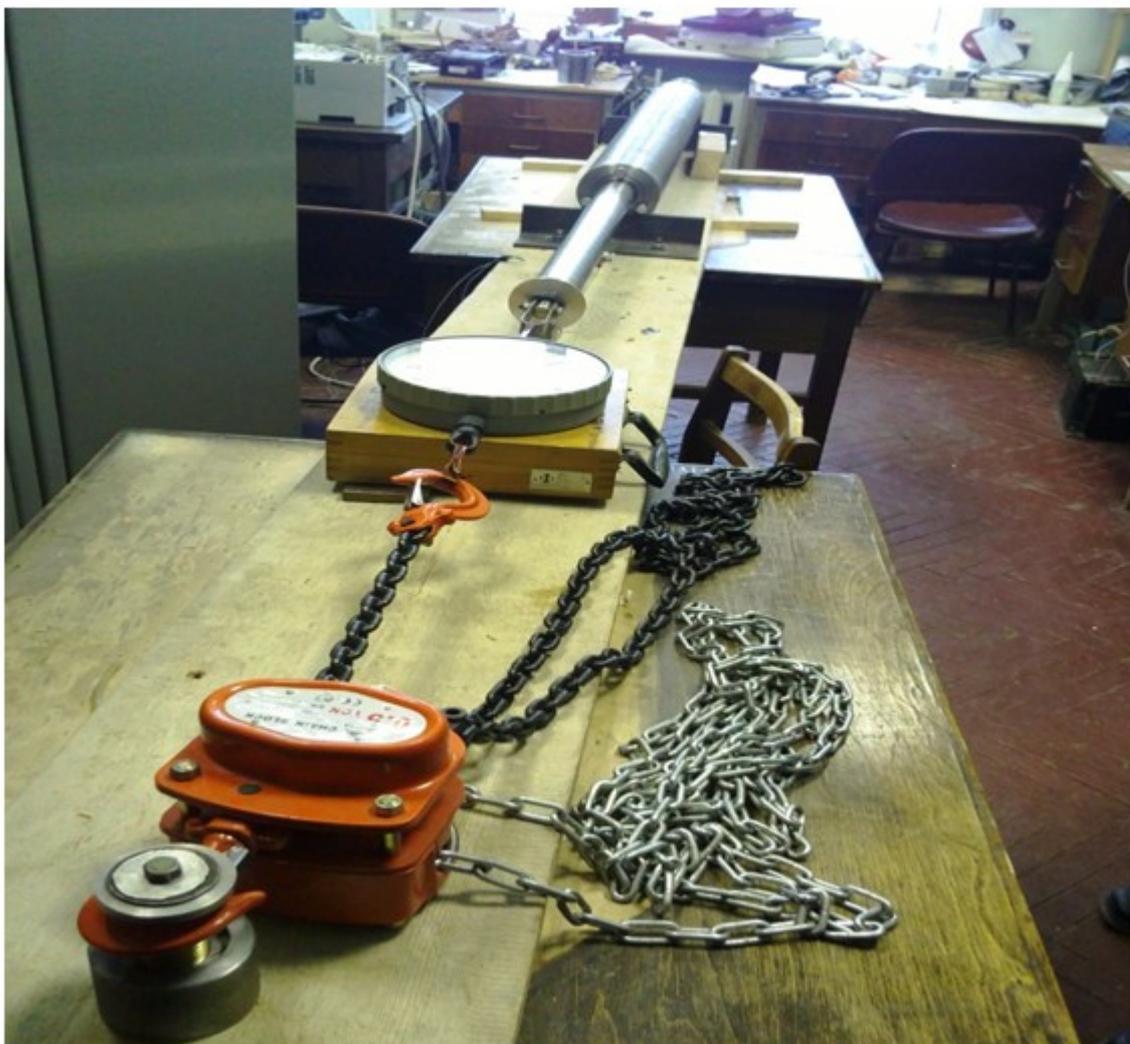


Рис. 1.9 Стенд для снятия статических характеристик ЦЛВД

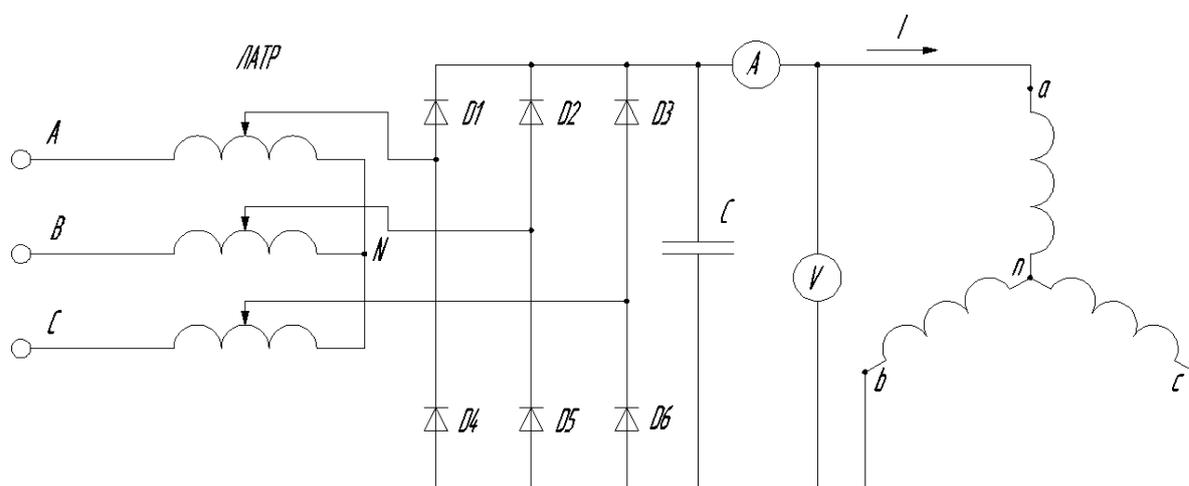


Рис.1.10 Электрическая схема подключения обмотки статора

Постоянные токи в обмотке статора создают неподвижное магнитное поле, которое взаимодействуя с магнитным полем вторичного элемента, создаёт тяговое усилие. Стенд позволяет определить зависимость максимального тягового усилия от тока в обмотке статора. При снятии данной зависимости ток в обмотке статора устанавливается эквивалентный действующему значению от 10 до 35 А. С помощью цепной тали вторичный элемент перемещается относительно статора. При этом возникает электромагнитное усилие стремящееся вернуть вторичный элемент в исходное положение. С увеличением угла рассогласования происходит срыв синхронизации полей, что соответствует максимальному усилию при данном токе. Экспериментальная зависимость максимального тягового усилия показываемого динамометром  $F_d$  от действующего значения тока статора предоставлена в таблице 1.1.

Таблица 1.1

F, Н	500	950	1400	1850	2150	2400	2650	2800	2950	3100
I, А	8	10	12,5	15	17,5	20	23	26	29	32

На основании таблицы 1.1 на Рис. 1.12 была построена зависимость тягового усилия от фазного тока обмотки статора.  $F=f(I)$  для прототипа ЦЛВД на участке характеристики при токе (6÷15) А зависимость  $F=f(I)$  практически линейна, а затем она искривляется. Для выяснения причин снижения тягового усилия при увеличении фазного тока обмотки статора свыше 15 А был изготовлен

микромодуль ЦЛВД, состоящий из 12 чашек статора, длиной 120 мм. Таким образом, центраторы, расположенные с обоих концов статора, находятся в 8 раз ближе, чем в случае прототипа ЦЛВД, что в значительной мере уменьшает неравномерность воздушного зазора и её влияние. Статор микромодуля показан на Рис. 1.11. Геометрия вторичного элемента и магниты оставались неизменными. Чертежи основных узлов ЦЛВД приведены в приложении Б. Статор микромодуля был посажен на вторичный элемент. С помощью тали и динамометра было измерено усилие сопротивления  $F_c=39.2$  Н, при  $I=0$ . Прототип ЦЛВД состоит из 96 чашек с обмотками, а микромодуль ЦЛВД имеет 12 чашек, поэтому усилие микромодуля нужно увеличить в  $96/12 = 8$  раз, что бы привести их к усилиям прототипа ЦЛВД. С помощью тали вторичный элемент микромодуля перемещается по оси статора и по показанию динамометра определялось максимальное тяговое усилие.



Рис. 1.11 Статор микромодуля ЦЛВД

Значение токов и соответствующие им усилия приведены в таблице 1.2.

$I, \text{A}$	10	15	20	25	30	35
$F'_T, \text{H}$	106	218	327	420	530	610
$F_T, \text{H}$	848	1744	2616	3360	4240	4880

где  $F'_T$  – тяговое усилие микромодуля полученное экспериментально;

$F_T = 8 \cdot F'_T$  – тяговое усилие прототипа ЦЛВД, пересчитанное через усилие микромодуля.

На рис 1.12 представлены зависимости  $F=f(I)$  для прототипа ЦЛВД согласно таблицам 1.1. и 1.2..

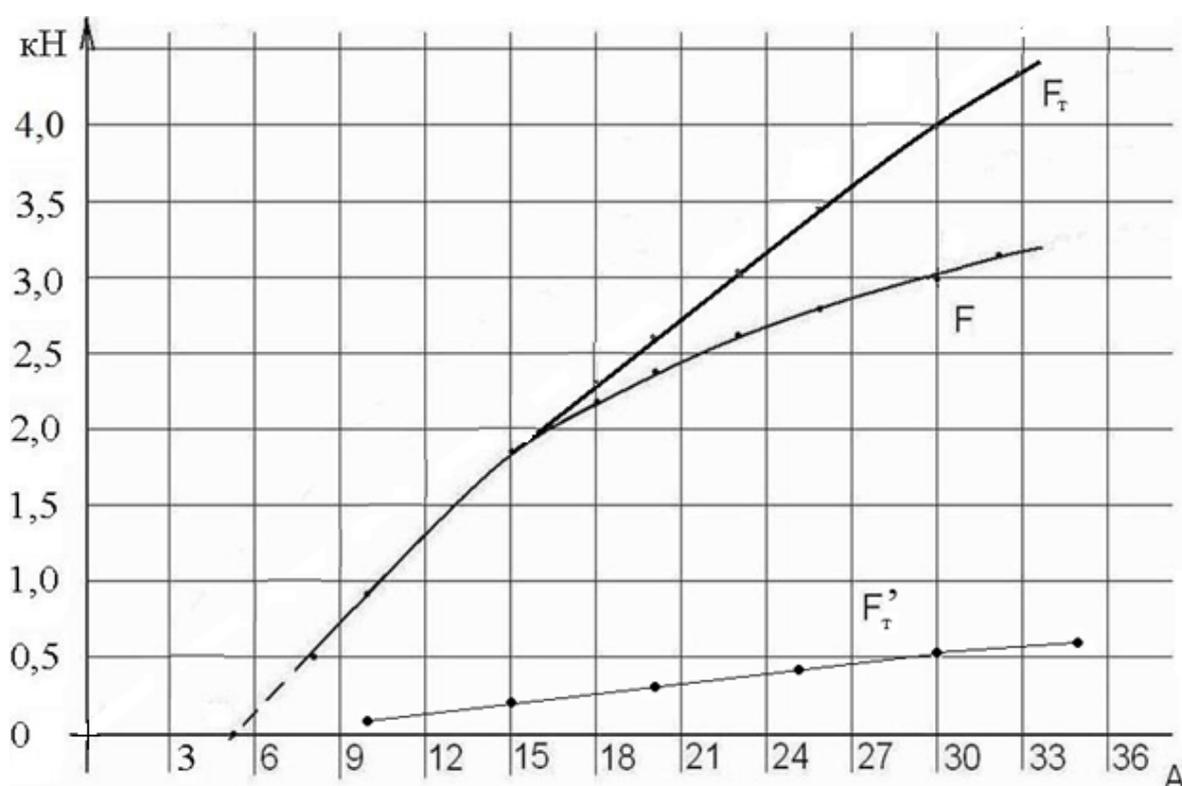


Рис. 1.12 Зависимости тяговых усилий от тока в обмотках статора

Падения тягового усилия, схожего с падением зависимости  $F$  при  $I = 15$  А, нигде не наблюдается. Таким образом, было постановлено, что с увеличением тока вторичный элемент прототипа ЦЛВД под действием сил притяжения изгибается и касается поверхности статора. При этом возрастают силы трения и снижается выходное тяговое усилие прототипа ЦЛВД.

На длине статора микромодуля изгиб вторичного элемента значительно меньше и воздушный зазор при работе сохраняется, поэтому зависимость тягового усилия от тока линейна. Для сохранения величины воздушного зазора

ЦЛВД целесообразно устанавливать подшипник скольжения (центратор) через каждые 480 мм. Это уменьшает прогиб вторичного элемента и обеспечит необходимый воздушный зазор при всех рабочих токах статора. При наличии центратора зависимость тягового усилия от тока в обмотках Статора будет представлена в виде  $F_T = f(I)$  на рис. 1.12. При номинальном токе 30 А согласно рис. 1.12 тяговое усилие прототипа с центратором будет больше на 1000 Н по сравнению с тяговым усилием прототипа без центратора. Таким образом можно сделать вывод, что снижение тягового усилия прототип ЦЛВД при токах больше 15 А связано с притяжением вторичного элемента к статору и значительным увеличением сил трения и уменьшением тягового усилия.

Максимальное усилие притяжения, действующее на вторичный элемент в зоне статора прототипа ЦЛВД согласно расчёту по методике [39] составляет 4600 Н. Длина статора прототипа ЦЛВД равна 960 мм, и под действием усилия притяжения происходит изгиб и касание вторичного элемента с статором поэтому при увеличении тока обмотки статора увеличивается сила притяжения, возрастает трение и уменьшается тяговое усилие. Возрастание сил трения между вторичным элементом и статором обусловлено увеличением сил радиального притяжения и уменьшением тягового усилия. При равномерном зазоре и без соприкосновения статора и вторичного элемента эти силы значительно меньше.

Таким образом, результаты испытаний показали, что при поддержании равномерности воздушного зазора разработанная конструкция ЦЛВД может развивать усилие порядка 4000 Н с одного метра длины двигателя. Что уже позволяет вести добычу на глубине более 2000 метров. Разрабатываемая конструкция ЦЛВД ранее не подвергалась тщательной рационализации. Это является возможностью повысить тяговое усилие текущей конструкции до 5000 Н/м, что позволит использовать ЦЛВД для добычи нефти на глубине 3000 метров и более.

## 1.4 Выводы по главе 1

1. ПБНА обладает неоспоримым преимуществом перед УЦН при добыче нефти из низко и среднедебитных скважин и, в отличие от УШНГ, позволяет вести добычу на глубине более 2000 м и при осложнённых условиях добычи. Таким образом, ПБНА с приводом от ЦЛВД является и в обозримом будущем будет являться единственным способом добычи нефти из мало- и среднедебитных скважин глубиной более 2000 м. Создание погружного бесштангового насосного агрегата на основе ЦЛВД является важной проблемой для нефтедобывающей промышленности РФ. Разработка высокоэффективной конструкции цилиндрического линейного вентильного двигателя и внедрение её в промышленность является на сегодняшний день актуальным вопросом.

2. Опытные-промысловые испытания ПБНА показали его неоспоримое преимущество над УШНГ и УЭЦН при добыче нефти из средне- и малодебитных скважин на глубине более 2000 метров. Имеющийся у отечественных нефтяных компаний опыт работы с ПБНА зарубежной конструкции позволит значительно упростить и ускорить внедрение наших разработок.

3. Имеющиеся результаты исследований Пермского национального исследовательского политехнического университета показывают, что для скважин диаметром 120 мм можно создать ЦЛВД с удельным тяговым усилием 5000 Н/м, что позволит создать ПБНА для глубины 3000 метров и более.

## **Глава 2. Электромагнитный расчёт цилиндрического линейного вентильного двигателя методом конечных элементов.**

В настоящее время существует два основных метода расчёта электромагнитных процессов и рабочих характеристик электродвигателей. Первый метод основан на теории электрических и магнитных цепей, а второй на базе решения уравнений Максвелла в дифференциальной форме [40, 42, 65-68]. Расчёты электромагнитных полей на базе математической модели в большей или меньшей степени отражающей реальный физический объект являются основой для проектирования различных типов электрических машин. Физические процессы в ЦЛВД весьма сложны, поэтому при математическом исследовании электромагнитных процессов реальный двигатель заменяют расчётной моделью путём введения ряда допущений. От выбора допущений в значительной степени зависит точность и трудоёмкость расчёта. Эти два фактора находятся во взаимном противоречии. Поэтому нужен выбор таких допущений, которые по возможности меньше затрагивают основные физические условия и одновременно позволяют получить достаточно простые математические соотношения.

При расчёте методом конечных элементов электрическая машина геометрически разбивается на отдельные участки, в которых электрические и магнитные свойства можно считать постоянными.

Метод конечных элементов получил широкое распространение в начале для решения полевых задач строительной механики, а в последующие годы и для решения задач электродинамики.

Достоинством метода при решении многомерных краевых задач является возможность более точного учёта граничных условий, особенно в том случае, если граница имеет вид сложной пространственной кривой, а также возможность уменьшения порядка системы алгебраических уравнений, получаемой при аппроксимации уравнений краевой задачи. Недостатком метода является большой объём и сложность реализации подготовительных операций.



Статор ЦЛВД состоит из цилиндрического корпуса 1, неподвижно установленных статорных чашек 2, с катушками 3, которые представляют собой трёхфазную обмотку, создающую бегущее магнитное поле вдоль оси двигателя.

Вторичный элемент с возможностью возвратно-поступательного движения отделён от статора воздушным зазором 4 и представляет собой немагнитный шток 5, на который поочерёдно нанизаны постоянные магниты 6 и полюса 7. Постоянные магниты имеют осевое намагничение, чередующееся по направлению. Магниты закрыты от внешнего воздействия немагнитными вставками 8.

Таблица 2.1

Основные геометрические размеры ЦЛВД

Величина	Обозначение	значение
Полюсное деление, мм	$\tau$	30
Ширина магнита, мм	$h_m$	8
Диаметр магнита, мм	$D_M$	46
Диаметр вторичного элемента, мм	$D_2$	53
Внешний диаметр статора, мм	$D_1$	113
Диаметр штока, мм	$d_{ш}$	21
Толщина воздушного зазора, мм	$\delta$	1.5
Толщина корпусной трубы, мм	$\Delta m$	4
Расчётный коэффициент полюсного перекрытия, о.е.	$\alpha_p$	0.5
Ширина зубца, мм	$b_3$	3
Толщина коронки зубца, мм	$b_k$	2
Величина открытия паза, мм	$b_o$	1
Высота ярма, мм	$h_я$	4
Габариты прямоугольного провода в изоляции, мм	$a$	1.4
	$b$	3
Число рядов витков обмотки в пазу	$n$	2
Число витков обмотки в ряду	$k$	10

Процесс электромеханического преобразования энергии ЦЛВД основан на взаимодействии магнитного поля постоянных магнитов вторичного элемента и поля обмотки статора. Конфигурация этих полей во многом зависит от

геометрии магнитной системы, свойств материалов и распределения МДС обмоток.

При проведении расчётов на основе предложенной модели были приняты следующие допущения:

- Модель построена в двумерной цилиндрической системе координат  $RZ$ ;
- Магнитное поле модели ЦЛВД ограничено наружной поверхностью корпуса ЦЛВД;
- Магнитные свойства ферромагнитных сред анизотропные, но нелинейные и задаются кривыми намагничивания;
- Реальная геометрия обмоток заменяется шинами/катушками с эквивалентным значением магнито-движущей силы;
- Механические потери на трение пренебрегаются.

Перечисленные допущения вносят в расчёт ЦЛВД пренебрежительно малые погрешности.

Расчётная модель ЦЛВД, изображённая на рис.2.2. Расчётная модель содержит 6 однородных сред: конструкционную сталь корпуса 1, зубцов 3 и полюсов 6; медь катушек 2; нержавеющей сталь немагнитных вставок 4 и штока 7; самарий-кобальтовые магниты 5; приведённый материал ярма 8 и вакуум 9.

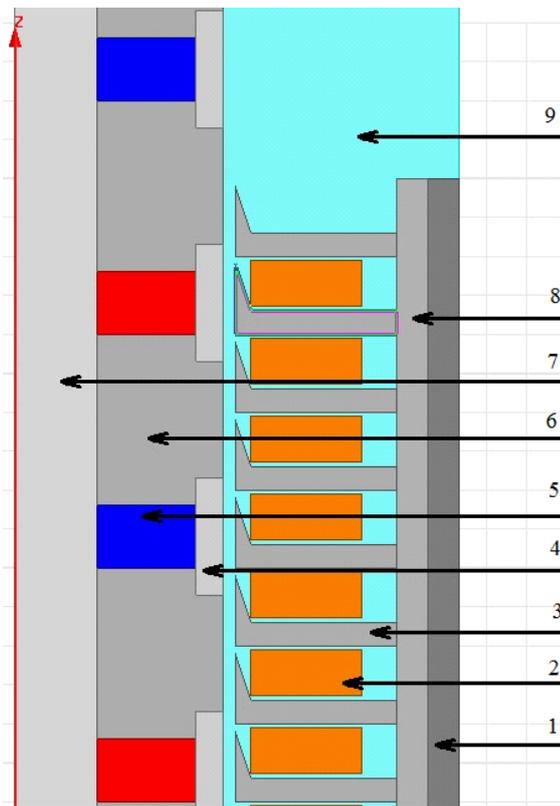


Рис.2.2. Расчётная модель ЦІВД.

Магниты Sm-Co имеют значения остаточной магнитной индукции  $B_r=1$  Тл и коэрцитивной силы  $H_c=680$  кА/м. Нержавеющая сталь имеет относительную магнитную проницаемость  $\mu=1$ . В прототипе ЦІВД используется конструкционная сталь 3. Кривая намагничивания стали 3 представлена на рис. 2.3.

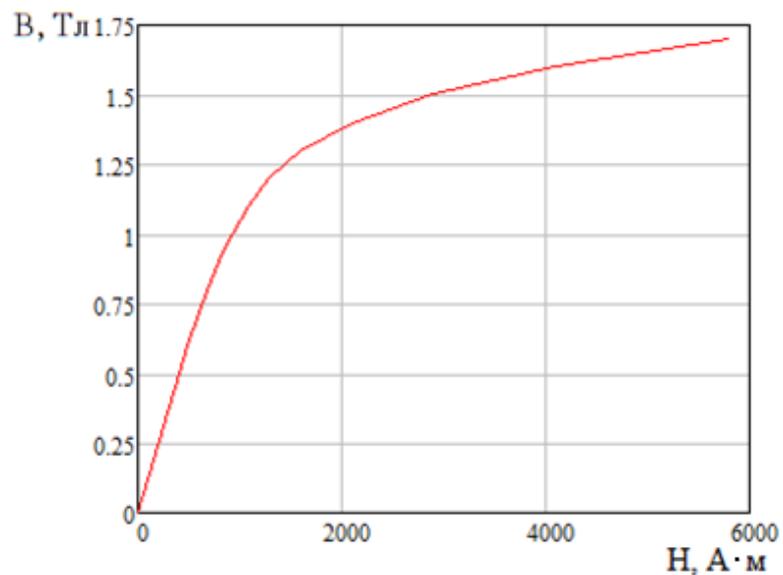


Рис. 2.3 Кривая намагничивания стали 3.

В программе построена осесимметричная модель двигателя, потому необходимо принять во внимание осевую несимметричность ярма статора 2 (рис.1.11) и построить усреднённую кривую намагничивания:

$$H_{яi} = \frac{B_{яi}}{\mu_0 \cdot \mu_{яi}} \quad (2.2.1)$$

где  $B_{яi}$  и  $H_{яi}$  координаты точек кривой намагничивания ярма, а  $\mu_{яi}$  в свою очередь средняя относительная магнитная проницаемость ярма для каждой из точек кривой намагничивания, рассчитываемая как:

$$\mu_{яi} = \frac{102 + 258 \cdot \frac{B_i}{H_i}}{360} \quad (2.2.2)$$

где  $B_i$  и  $H_i$  координаты точек кривой намагничивания для выбранной марки стали. Приведённая кривая намагничивания для стали ярма представлена на рис. 2.4.

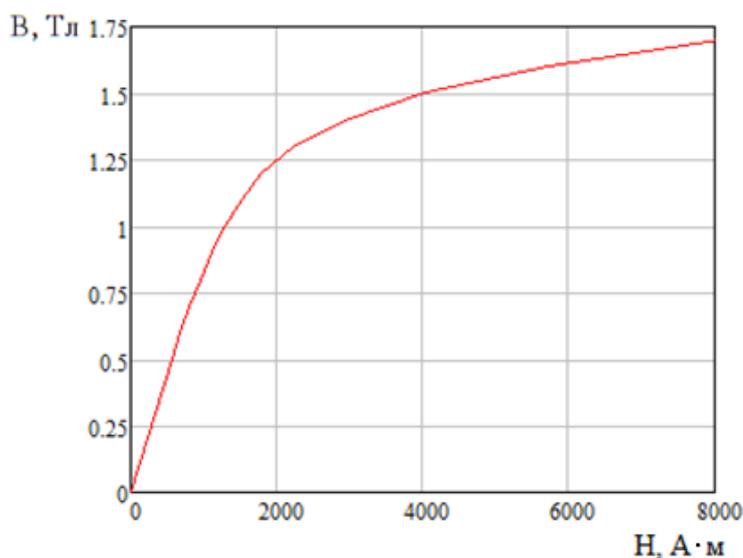


Рис.2.4 Кривая намагничивания стали ярма.

Модель магнитного поля ЦЛВД реализуется в прикладном пакете ANSYS Maxwell. Геометрия модели задается с использованием встроенного редактора. Усилие ЦЛВД пропорционально длине машины. У двигателя с малым числом пар полюсов характерно влияние продольного краевого эффекта, за счёт которого происходит снижение усилия двигателя. Длина реального ЦЛВД достигает 8 м, поэтому влиянием краевого эффекта в ЦЛВД можно пренебречь.

При построении геометрии необходимо обеспечить минимальное влияние продольного краевого эффекта при этом выбрать длину машины такой, чтобы обеспечить максимальную скорость решения задачи.

По этой причине расчётная модель ЦЛВД была построена на 4 пары полюсов, соответственно расчётное усилие для экспериментального прототипа ЦЛВД будет в 4 раза больше. Так как для рационализации конструкции ЦЛВД были запланированы многовариантные расчёты - геометрия ЦЛВД (рис. 2.5) была задана функционально. Благодаря этому при изменении одного из основных геометрических размеров таблицы 2.1. остальные размеры подстраиваются автоматически.

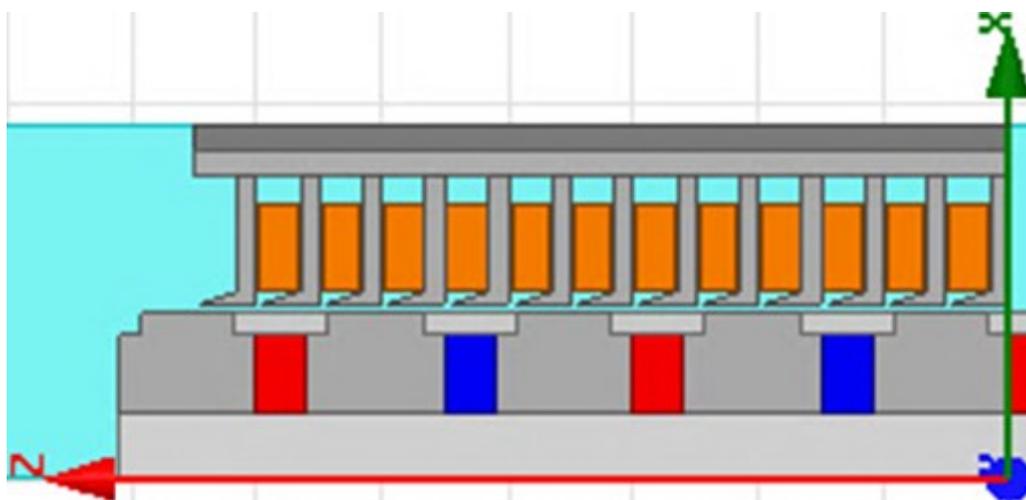


Рис. 2.5 Геометрия ЦЛВД заданная в ANSYS Maxwell

После построения геометрии отдельных зон расчётной модели задаются свойства сред и материалов в соответствии с материалами с рис. 2.2. Далее задается токовая нагрузка. При задании плотности тока для расчёта статических характеристик в Maxwell magnetostatic все проводники паза можно объединить в один при этом в качестве токовой нагрузки задавать МДС, которое можно представить следующим образом:

$$F = i \cdot n \cdot k$$

где  $i$  - мгновенное значение тока в проводнике обмотки статора в конкретном пазу.

Бегущая вдоль оси  $Z$  волна тока создаёт бегущее магнитное поле в зазоре ЦЛВД. Бегущая волна тока создаётся при выполнении двух условий: три

обмотки статора должны быть сдвинуты относительно друг друга на одну третью часть полюсного деления статора; токи протекающие по обмоткам  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$  должны быть сдвинуты относительно друг друга по фазам на угол  $120^\circ$ . Мгновенные значения токов в обмотках периодически изменяются по синусоидальному закону, в соответствии с выражениями:

$$i_a = I_m \sin(\omega \cdot t + \phi_0) \quad i_b = I_m \sin\left(\omega \cdot t + \phi_0 + \frac{2\pi}{3}\right); \quad i_c = I_m \sin\left(\omega \cdot t + \phi_0 - \frac{2\pi}{3}\right)$$

где  $I_m$  – амплитудное значение тока в обмотках,  $\phi_0$  - фаза тока в обмотках фазы А в момент времени  $t=0$ .

Трёхфазный ток при  $\phi_0 = \pi/2$  имеет следующие значения  $i_a = I_m$ ;  $i_b = -I_m/2$ ;  $i_c = -I_m/2$ . При расчёте статических характеристик ЦЛВД вторичный элемент устанавливается в начальное нулевое положение. При этом МДС статора остаётся неизменной во времени. Так при действующем значении тока в фазе 30 А и  $w_n=20$  имеем амплитудное значение МДС паза в фазе А:

$$F_I = \sqrt{2} \cdot k \cdot n \cdot I = 848.4 \text{ A}$$

После задания всех источников поля строится сетка конечных элементов, для построения которой используем адаптивный шаг дискретизации (разбиения) расчётных областей. При адаптивном шаге густота сетки конечных элементов в различных частях модели определяется автоматически. На рис 2.6 видно, что в областях более важных с точки зрения расчета (воздушного зазора, ферромагнитных областей статора и вторичного элемента) сетка сгущается, в тоже время в области за пределами ЦЛВД шаг сетки достаточно большой. Это обеспечивает приемлемое соотношение точности и времени расчета.

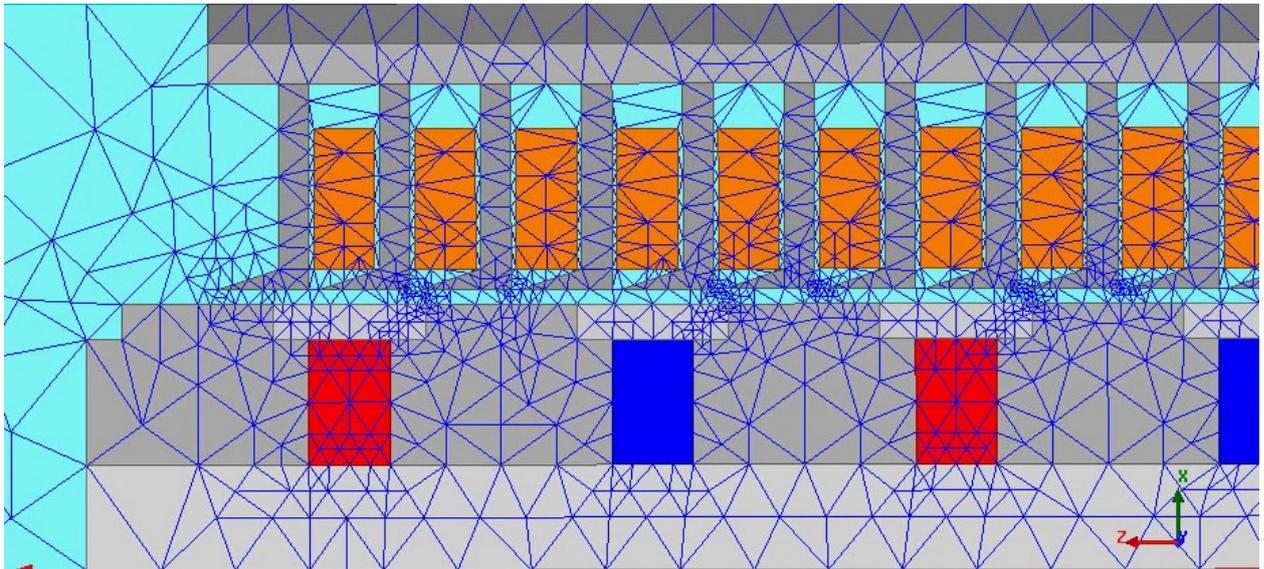


Рис.2.6 Разбиение сетки для ЦЛВД

### Расчёт магнитного поля ЦЛВД

По результатам электромагнитного расчёта получаем картину поля, представленную на рис. 2.7.

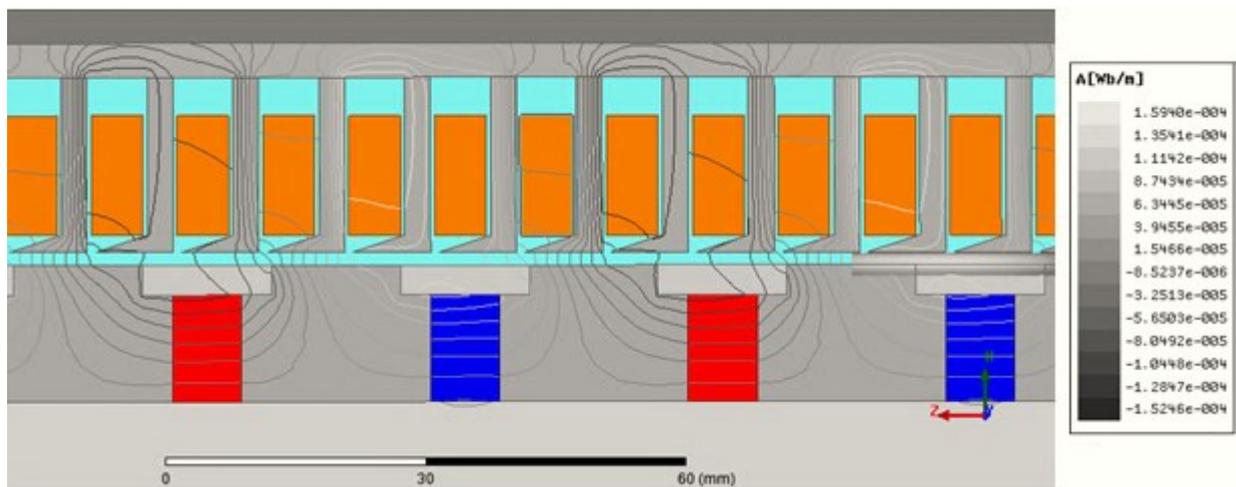


Рис. 2.7 Картина поля в расчётной модели ЦЛВД

Расчёт магнитного поля производился для действующей конструкции прототипа ЦЛВД. На рис. 2.7 наблюдается существенная неоднородность поля по длине зазора, что обусловлено геометрией зубцовой зоны статора и полюсов вторичного элемента. Так как основные процессы по преобразованию электрической энергии в механическую происходят в воздушном зазоре, сетка разбиения в воздушном зазоре достигает наибольшей густоты.

Величина шага дискретизации в зазоре изменяется от 0.1 мм до 1 мм, а в зубцах статора и полюсах вторичного элемента от 0.5 мм до 2 мм. Это гарантирует приемлемые точность и скорость расчёта магнитного поля идеализированной модели.

Расчёт магнитного поля модели ЦЛВД проводился на протяжении одного полюсного деления  $\tau = 30\text{мм}$ . На рис. 2.7 приведена кривая распределения нормальной (радиальной) компоненты магнитной индукции в воздушном зазоре на границе зубцовой зоны статора при значении угла  $\theta = 30^\circ$ . На рис. 2.8. показана кривая распределения нормальной компоненты магнитной индукции в воздушном зазоре на границе полюса вторичного элемента при  $\theta = 30^\circ$ .

Одно полюсное деление  $\tau = 30\text{мм}$  длина по оси  $Z$  расчётной модели соответствует  $180^\circ$  угловой зависимости, поэтому один миллиметр смещения полюсов статора и вторичного элемента  $\Delta L$  эквивалентен  $\Delta\theta = 6^\circ$ . Исходя из этого определялся угол  $\theta$  при всех  $\Delta L$  на рис. 2.7. – 2.9. необходимо заметить, что смещение характеристик под действием активного сопротивления при этом не учитывалось. Индукция на границе зубцов статора и воздушного зазора рис 2.8. имеет ярко выраженные провалы и выбросы обусловленные зубчатой структурой статора. Этот характер и прослеживается при всех нагрузках характеризующихся углом  $\theta$ . Кривая магнитной индукции на границе воздушного зазора и полюса (Рис. 2.9.) вторичного элемента характеризуется значительными выбросами на краях полюсов, а провалы магнитной индукции обусловленные зубчатой структурой статора на этой границе будут существенно меньше. На основании анализ магнитной индукции в зазоре (рис. 2.8, 2.9) можно сделать вывод, что магнитная индукция во всех точках воздушного зазора имеет очень сложный характер.

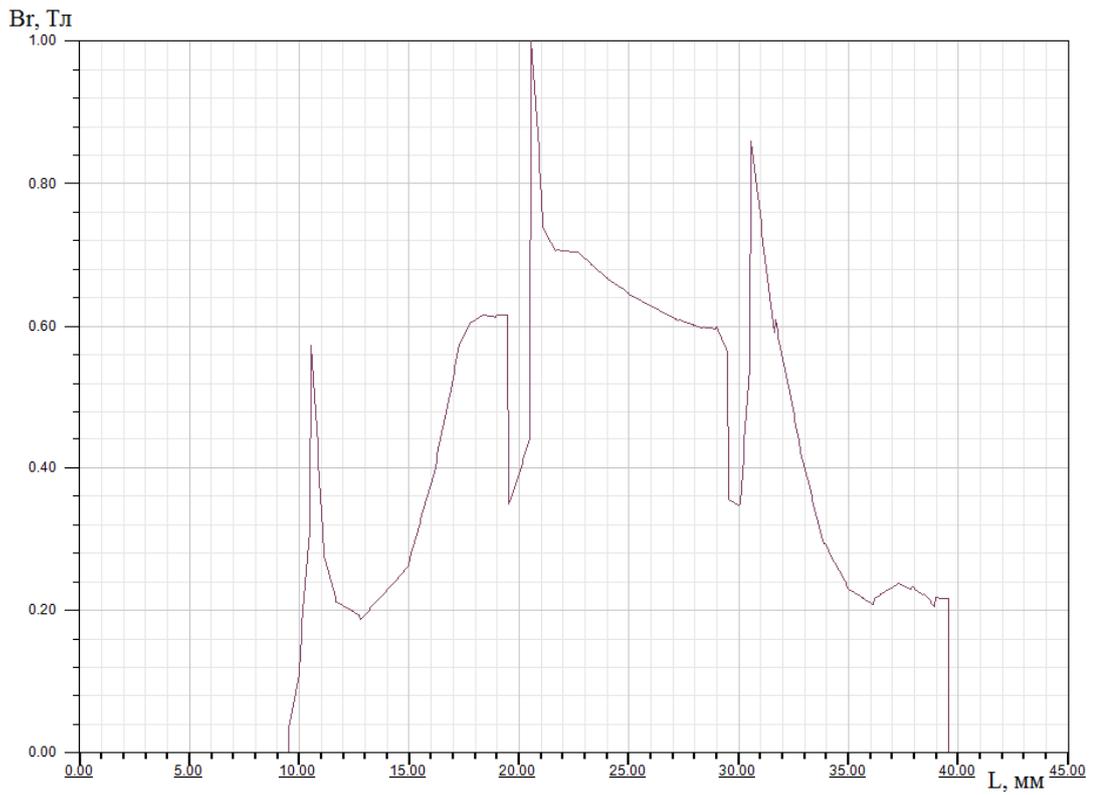


Рис. 2.8 Индукция на зубцах при  $\Delta L = 5$  мм и  $\theta = 30^\circ$

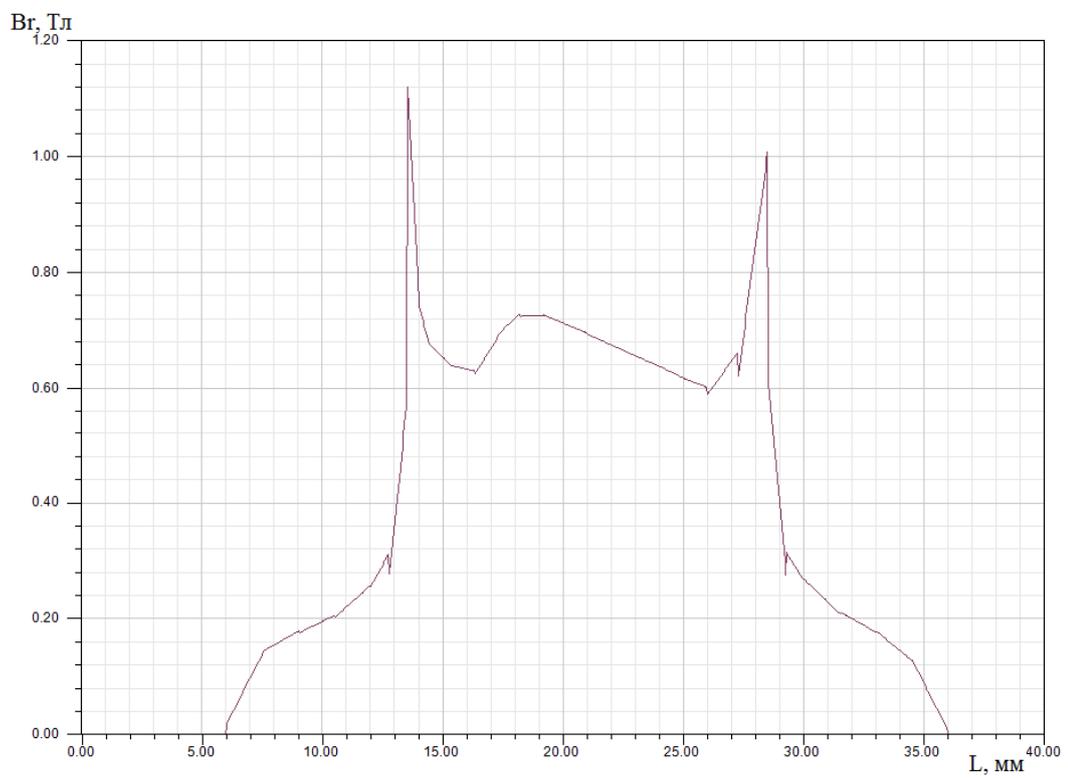


Рис. 2.9 Индукция на полюсе при  $\Delta L = 5$  мм и  $\theta = 30^\circ$

## 2.2 Расчёт угловой характеристики ЦЛВД

В результате расчёта в программе ASYS Maxell была получена зависимость тягового усилия от угла  $\theta$ . Расчёт статической характеристики, изображённой на рис. 2.10., производился при номинальном токе фазы обмотки статора равном 30 А. На этом рисунке по горизонтальной оси отмечено смещение вторичного элемента относительно статора  $dz$  в миллиметрах, а по вертикальной оси тяговое усилие модели  $F$  в килоньютонах.

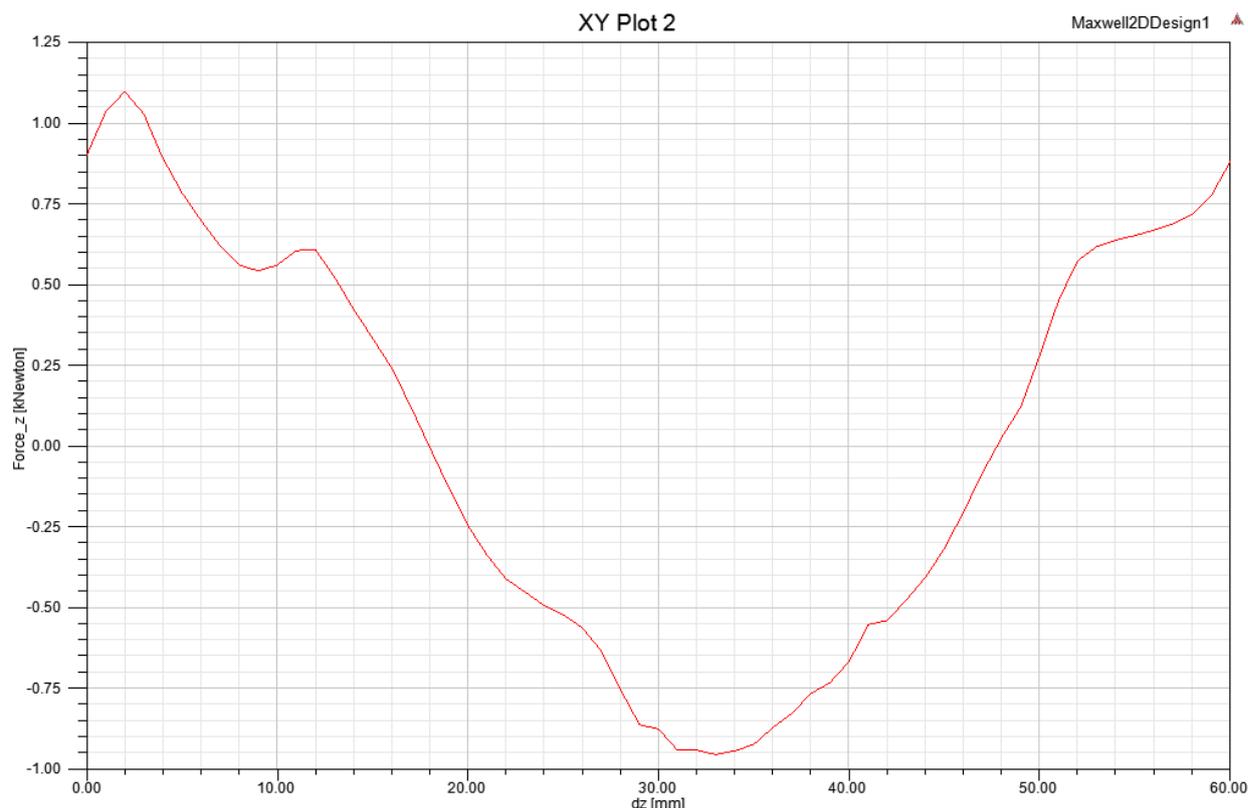


Рис.2.10 Статическая характеристика расчётной модели Maxwell magnetostatic

Статическая характеристика снимается при постоянных значениях тока в обмотках статора, что соответствует частоте питающего напряжения 0 Гц. Статическая характеристика определяет при положительном значении силы  $F$  движение вторичного элемента в одну сторону (по направлению острия зубцов статора), а при отрицательном значении силы  $F$  характеризует движение в другую сторону. При этом угловые характеристики этих двух режимов без учёта влияния активного сопротивления будут иметь вид показанный рис. 2.11.

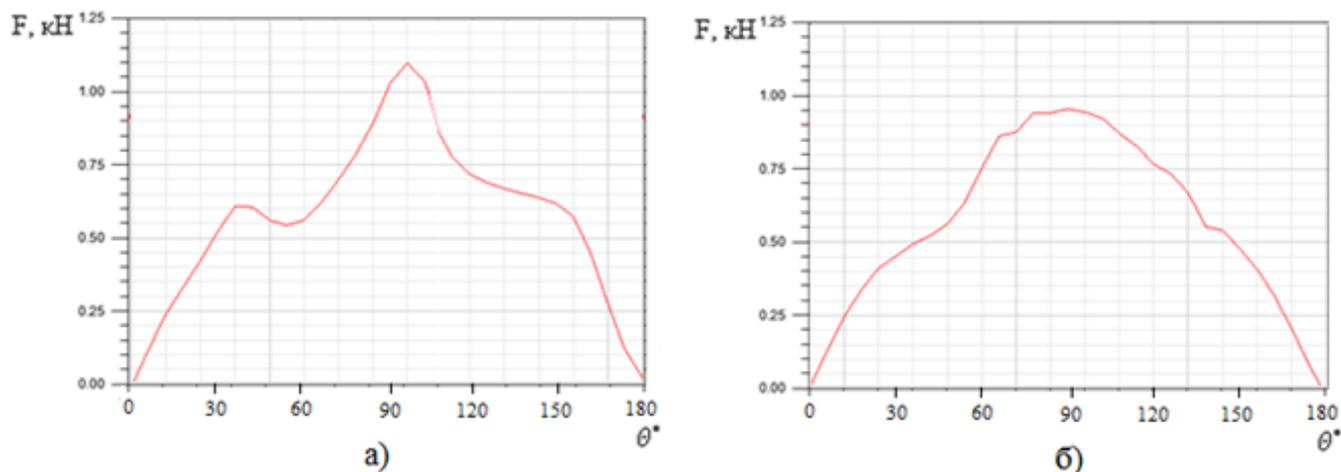


Рис. 2.11. Угловые характеристики полученные в Maxwell magnetostatic: а) по направлению коронки зубцов; б) против направления коронки зубцов.

Характеристики на рис. 2.11 показывают, что модель ЦЛВД развивает усилие по направлению вдоль зубцов рис. 2.11 а)  $F = 1100$  Н, что на 150 Н больше чем для движения против направления зубцов рис. 2.11 б). Максимальное усилие тяги, полученное в Maxwell magnetostatic для метрового двигателя равняется 4400 Н, что в свою очередь не значительно расходится с экспериментально полученными значением силы в 4240 Н.. Эти значения соответствуют максимальному усилию  $F_M$ , полученному в Maxwell transient при движущемся вторичном элементе. Временная зависимость тягового усилия представлена на рис. 2.12. Данное пиковое значение силы  $F_M = 4400$  Н соответствует среднему рабочему усилию  $F_{CP}$  равному 3480 Н. В свете этого преимущество от расположения ЦЛВД в скважине зубцами остриём вверх становится не таким заметным и составляет 50 Н для расчётной модели и 200 Н для метрового двигателя.

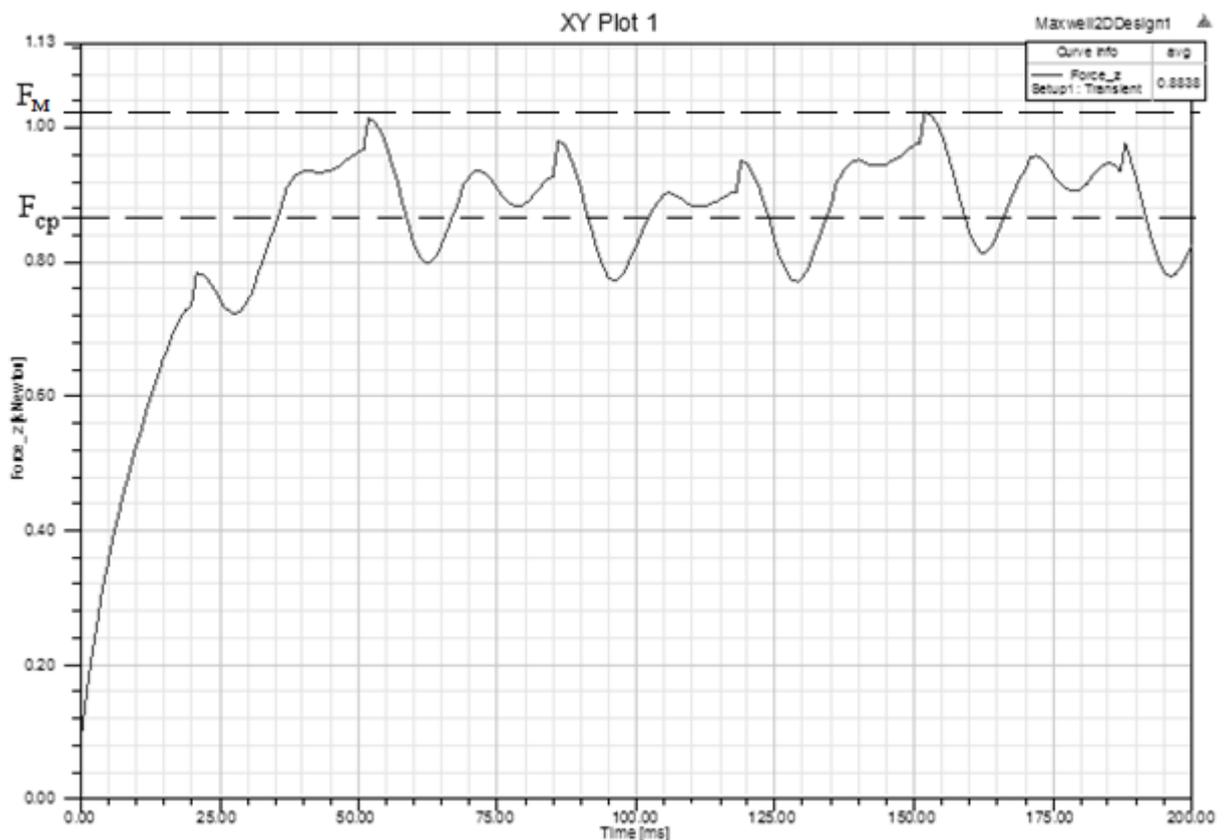


Рис. 2.12 Зависимость усилия расчётной модели ЦЛВД от времени

Значительное расхождение  $F_{CP}$  и  $F_M$  говорит о том, что использовать для точного определения усилия двигателя расчёт в Maxwell magnetostatic нельзя, но он вполне годится для сравнительного анализа конструкций двигателя. Однако, расчёт в Maxwell magnetostatic показывает высокое сходжение с результатами экспериментов проведённых на кафедре ЭТиЭМ. Это потому, что условия модели максимально приближены к условиям проведения опыта. На прототип ЦЛВД во время эксперимента так же подавался постоянный ток, а вторичный элемент смещался с замером усилий. На деле же результаты расчёта Maxwell magnetostatic в значительной степени зависят от фазы токов обмоток статора МДС обмоток двигателя в Maxwell transient задаётся с помощью внешней цепи изображённой на рис. 2.13. Цепь состоит из источника трёхфазного синусоидального напряжения, амперметров для замера токов в обмотках двигателя, индуктивного и активного сопротивлений обмоток двигателя. В расчётной модели двигателя проводники задаются катушками, имеющими  $w=n \cdot k$  витков.

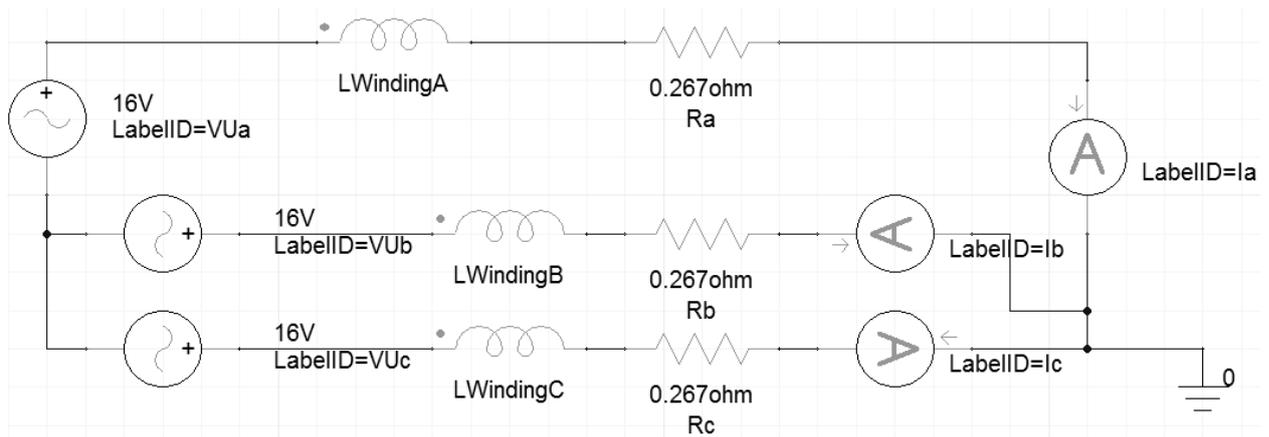


Рис. 2.13 Схема цепи питания модели ЦЛВД в программе ANSYS Maxwell transient

При построении угловых характеристик, ЦЛВД рассчитывается в Maxwell transient для движущегося с постоянной синхронной скоростью  $v = 2\pi f$  вторичного элемента для одного значения питающего напряжения и частоты, но при разных величинах начального смещения вторичного элемента  $dz$ . При этом строится зависимость усилия от времени, подобная Рис. 2.12. Из построенных графиков были получены значения  $F_{CP}$ , по которым и строится угловая зависимость. На Рис. 2.14 изображены угловые характеристики двигателя для частот питающего напряжения 1, 5, 10 Гц при значении действующего тока  $I = 30$  А. Угловые характеристики построены для угла смещения  $\Delta\theta$ , отсчитываемому от угла нагрузки, соответствующего  $F = 0$ .

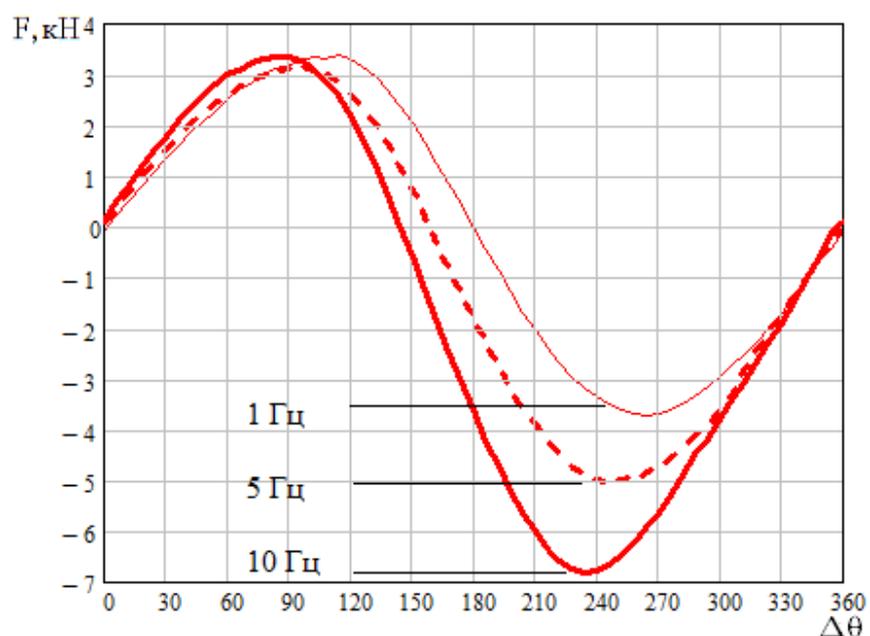


Рис. 2.14 Угловые характеристики ЦЛВД, полученные в Maxwell transient

Анализ угловых характеристик (рис. 2.14) показывает, что наличие активного сопротивления влияет не только на различие углового смещения характеристик и величину усилия генераторного режима в зависимости от частоты питающего напряжения, но и на саму форму характеристик [69]. Пропорционально частоте увеличивается ЭДС холостого хода, но при этом из-за большого активного сопротивления общее сопротивление двигателя растёт не пропорционально частоте. Благодаря большому активному сопротивлению отличающему ЦЛВД от идеализированной синхронной машины угловые характеристики принимают такой нестандартный вид (рис.2.14). Однако, с дальнейшим ростом частоты активное сопротивление становится пренебрежительно малым, от чего форма угловой характеристики снова приобретает симметричный вид (рис. 3.10), как для частоты равной нулю. Данное явление, выходящее за рамки традиционного понимания нагрузочной характеристики синхронных машин, заслуживает отдельного исследования.

### 2.3 Расчёт рабочих характеристик ЦЛВД

В программе ANSYS Maxwell transient не предоставляется возможным напрямую рассчитать рабочие характеристики ЦЛВД. Однако результаты моделирования достаточны для расчёта и построения характеристик [70]. Сначала производится расчёт активного сопротивления фазы обмотки статора по формуле:

$$R_{20} = \rho \frac{l}{S}, \quad (2.1)$$

где  $l = l_{cp} \cdot w_n \cdot n$ , – длина обмотки прототипа ЦЛВД на одну фазу;

$w_n = 20$  – число витков в пазу обмотки статора;

$l_{cp} = 0.21\text{м}$  – средняя длина витка в пазу;

$n = 32$  – число пазов на одну фазу прототипа ЦЛВД;

$\rho = 0.0178 \cdot \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$  - удельное электрическое сопротивление медного провода при  $T = 20^\circ\text{C}$ ;

$S$  – сечение шины обмотки статора.

Сопротивление фазы при рабочей температуре  $T$ :

$$R = R_{20}(1 + \alpha T), \quad (2.2)$$

где  $\alpha = 3.8 \cdot 10^{-3}$  – температурный коэффициент для медного провода.

Полученное значение активного сопротивления подставляется в цепь питания модели рис.2.13. Далее компьютер производит расчёт электромагнитного поля и интегральных индуктивностей фаз на базе предложенной расчётной модели при заданном значении приложенного фазного напряжения  $U_{\text{ф}}$ . По полученным значениям полного сопротивления в фазах обмотки статора устанавливается фазный ток в обмотках  $I$  для текущего момента времени. После чего рассчитывается тяговое усилие ЦЛВД  $F$ .

Скорость движения вторичного элемента  $v$  задаётся согласно выражению:

$$v = 2 \cdot \tau \cdot f, \quad (2.3)$$

где  $f$  – частота питающего напряжения.

Полезная мощность прототипа ЦЛВД  $P_2$  определяется по формуле:

$$P_2 = F \cdot v. \quad (2.3)$$

Потери активной мощности в обмотках ЦЛВД  $\Delta P_{\text{об}}$  составят:

$$\Delta P_{\text{об}} = 3 \cdot I^2 \cdot R. \quad (2.4)$$

Потребляемая активная мощность ЦЛВД от источника питания  $P_1$  в таком случае составит:

$$P_1 = P_2 + \Delta P_{\text{об}}. \quad (2.5)$$

При расчёте активной мощности  $P_1$  потери в магнитопроводах ЦЛВД не учитываются, так как частота питающего напряжения в рабочем режиме находится в пределах (0.5 – 10) Гц.

КПД двигателя равен отношению полезной мощности к затраченной:

$$\eta = P_2/P_1 . \quad (2.6)$$

Полная мощность, потребляемая двигателем  $S$  равна:

$$S= 3 \cdot U_{\phi} \cdot I. \quad (2.7)$$

Коэффициент мощности ЦЛВД:

$$\cos(\varphi)= P_1/S_1. \quad (2.8)$$

Согласно выражениям (2.1 – 2.8) были построены рабочие характеристики ЦЛВД как зависимости  $I$ ,  $P_1$ ,  $F$ ,  $\eta$ ,  $\cos(\varphi)$  от полезной мощности  $P_2$  при различной частоте питающего напряжения. Эти характеристики представлены на Рис. (2.15, 2.16)

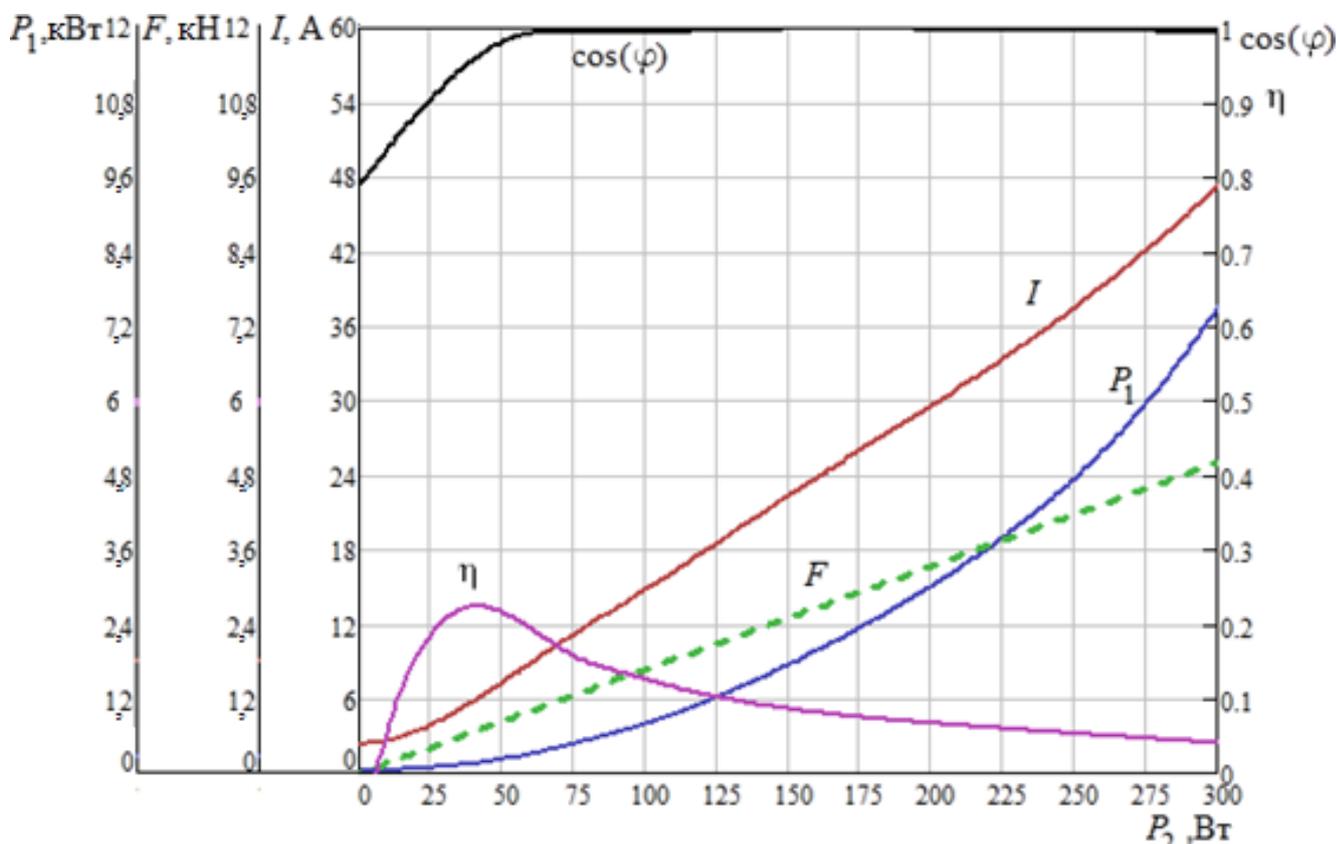


Рис.2.15 Рабочие характеристики ЦЛВД при  $f= 1$  Гц

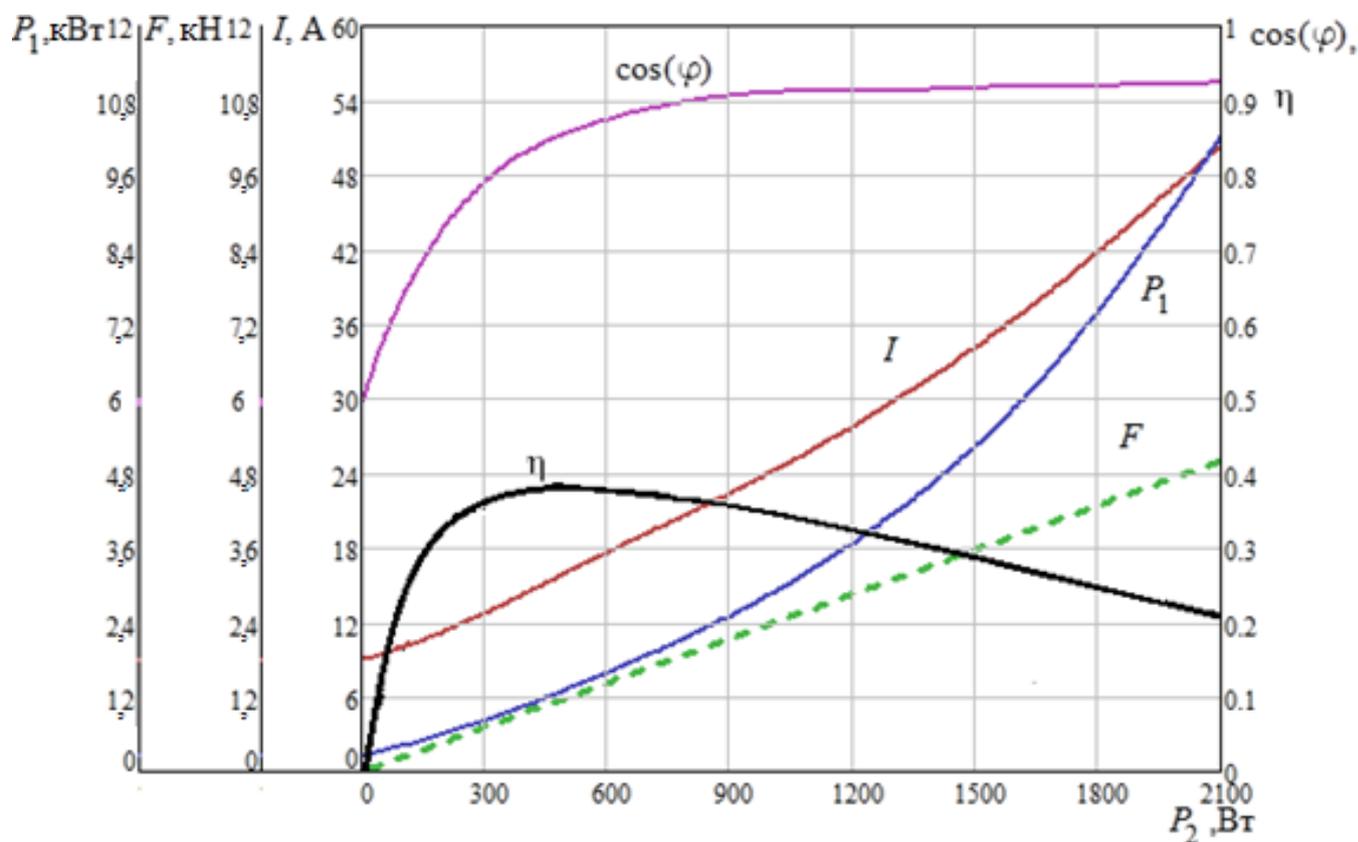


Рис.2.16 Рабочие характеристики ЦЛВД при  $f=7$  Гц

Номинальный ток двигателя был определён в ходе теплового расчёта и равен 30 А. При частоте 1 Гц  $\cos(\varphi)$  двигателя, как показано на Рис. 2.15, приближается к 1, так как полное сопротивление двигателя  $Z$  почти полностью определяется активным сопротивлением  $R$ . С увеличением частоты питающего напряжения  $\cos(\varphi)$  уменьшается и при частоте в 7 Гц и номинальном токе 30 А становится равным 0.935, что является неплохим энергетическим показателем. КПД ЦЛВД согласно Рис. (2.15, 2.16) очень сильно зависит от нагрузки. С увеличением тока КПД изменяется от нуля до максимального значения, а затем значительно уменьшается. Это объясняется тем, что усилие  $F$  как и полезная мощность  $P_2$  растёт пропорционально току  $I$ , а тепловые потери в обмотках статора растут пропорционально квадрату тока. Так при  $f = 1$  Гц КПД при номинальной нагрузке составляет 0.085 а при  $f = 7$  Гц КПД равен 0.33. С увеличением нагрузки увеличивается потребляемый ток и одновременно увеличиваются потери в обмотке из-за большого активного сопротивления  $R$ , что приводит к снижению КПД двигателя. Согласно Рис. (2.15, 2.16) КПД

двигателя растёт вместе с частотой питающего напряжения, поэтому работа двигателя на более высоких скоростях вторичного элемента предпочтительней.

Тяговое усилие при всех частотах питающего напряжения и номинальном токе первичной обмотки изменяется в пределах (3200 – 3300) Н. Следовательно, тяговое усилие остаётся практически постоянным. При этом время цикла значительно уменьшится. Для того, что бы обеспечить нужное число двойных ходов 0,5 – 8 в минуту, необходимо ввести между циклами временную паузу [71], либо увеличить время обратного хода.

Последующие исследования токов холостого хода, проведённые в ООО «Ойл Автоматика», показали:

- 1) При наличии ускорений разгона и торможения помимо появления ограничений по максимальной частоте, появляется так же экстремум по энергоэффективности рабочего хода при одинаковом тяговом усилии;
- 2) Наиболее энергоэффективным является длительный режим работы без пауз с максимально быстрым рабочим ходом и максимально медленным обратным.

С повышением частоты питающего напряжения значительно возрастут потери в стали. Таким образом, магнитопровод статора необходимо выполнять шихтованным из электротехнической стали.

## 2.4. Выводы по главе 2

1. Метод конечных элементов является самым современным методом расчёта магнитных полей. Он имеет значительное преимущество в точности и универсальности над другими методами расчёта электрических машин. Что позволяет использовать его в качестве ориентира для создания более быстрых специализированных методик расчёта электрических машин. Предложенная модель позволяет с высокой точностью рассчитать не только тяговое усилие двигателя, но и его энергетические характеристики. Последнее является крайне важным для внедрения новых двигателей в промышленность, где к двигателям предъявляются требования максимально возможных коэффициента полезного действия и коэффициента мощности.

2. Методом конечных элементов рассчитаны угловые характеристики ЦЛВД при различных частотах питающего напряжения и при одинаковом значении действующего тока. Полученные характеристики наглядно показывают влияние соотношения активно-индуктивного сопротивления в двигателе. Данное явление, выходящее за рамки традиционного понимания нагрузочной характеристики синхронных машин, заслуживает отдельного исследования для более тщательного рассмотрения. Понимание данного явления может открыть новые возможности в частотном управлении синхронными машинами.

3. Методом конечных элементов рассчитаны рабочие характеристики ЦЛВД при различных частотах питающего напряжения. На основании данных характеристик можно рассчитать необходимое значение питающего напряжения, подаваемого на двигатель, для достижения постоянства тягового усилия при частотном регулировании скорости вторичного элемента. Показано, что  $\cos(\varphi)$  при всех частотах питающего напряжения приближается к 1, а КПД наоборот имеет значения в пределах 0.085 – 0.33. Наиболее очевидным путём увеличения КПД двигателя является увеличение частоты питающего напряжения.

### **Глава 3. Математическая модель ЦЛВД основанная на теории электрических и магнитных цепей**

Разработка математической модели ЦЛВД, которая может быть использована для проектирования и рационализации геометрических размеров двигателя, является весьма важной задачей. Математическая модель позволит создать программы управления двигателем, что является одним из главных преимуществ данного метода расчёта двигателя по сравнению с методом конечных элементов. Математическая модель основывается на известных методах электротехники и электромеханики. [72-74]

Разработанная математическая методика расчёта проверена сравнением с данными, полученными от испытаний прототипа ЦЛВД, построенного и испытанного на кафедре ЭТиЭМ ПНИПУ. Адекватность представленной расчётной методики подтверждена расчётами, проведёнными в программе моделирования электромагнитных полей – ANSYS Maxwell.

Для создания математической модели двигателя необходимо вывести зависимости его электрических и магнитных сопротивлений, развиваемого тягового усилия и энергетических характеристик от геометрической конфигурации двигателя, параметров обмотки, значений тока, напряжения и частоты.

#### **3.1 Расчёт магнитной цепи ЦЛВД**

Математическая модель ЦЛВД основана на расчёте магнитной цепи по теории электрических и магнитных цепей. Расчёт магнитной цепи необходим для определения продольной и поперечной составляющих индуктивного сопротивления, которые зависят от параметров двигателя.

При формировании математической модели были приняты следующие допущения: двигатель имеет бесконечное число пар полюсов и является бесконечно длинным - достаточно рассчитать магнитную цепь на одном полюсном делении; все магнитные потоки направлены либо радиально к оси двигателя либо параллельно оси двигателя. Ортогональное расположение

векторов потоков позволит значительно упростить расчёт магнитных сопротивлений отдельных участков магнитной цепи.

На схеме (рис.3.1.а) изображен разрез рассматриваемой половины секции двигателя, содержащий одно полюсное деление  $\tau$ , которое на рис.3.1.а) помечено рамкой. Сопротивления отдельных участков рассчитаны для объёмной модели секции. Магнитная цепь построена в соответствии с данной схемой, т.к. в силу осе-симметричности двигателя она достаточно точно может отобразить направление магнитных потоков в двигателе. Для уточнения магнитной цепи приняты поправки на неравномерность ярма статора.

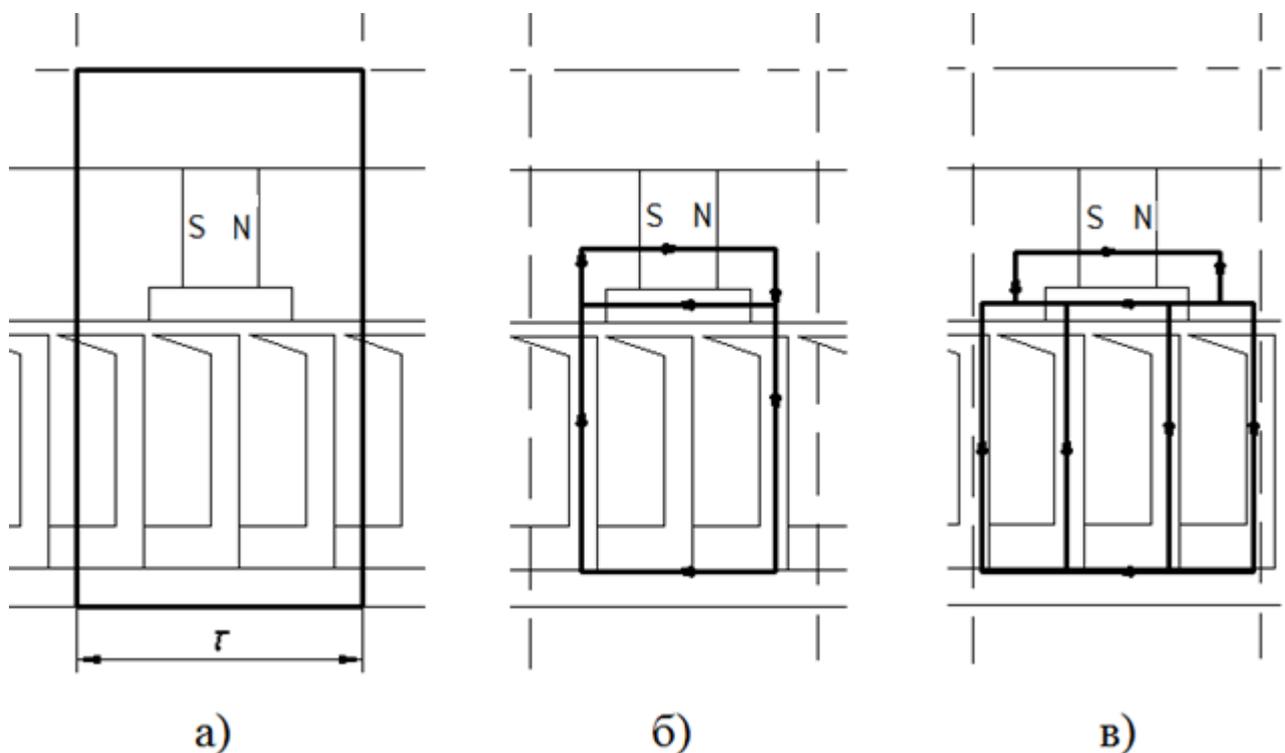


Рис.3.1. Изображение секции двигателя рассматриваемой в магнитном расчёте.

Сначала рассчитываются магнитные сопротивления всех участков магнитной цепи. Расчёт ведётся по следующим формулам:

для участков с радиально проходящим магнитным потоком

$$R_{ri} = \int_{r_{i1}}^{r_{i2}} \frac{dr}{\mu_0 \cdot \mu_i \cdot S_i(r)}, \quad (3.2.1)$$

где  $\mu_i$  – относительная магнитная проницаемость материала рассчитываемого участка,  $S_i(r) = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h_i$  площадь цилиндрического сечения участка магнитной

цепи, где  $r_{i1}$  и  $r_{i2}$  это границы рассчитываемого участка в цилиндрической системе координат (рис. 3.2.);  $h_i$  – ширина участка цепи. Данная формула обусловлена увеличением площади сечения магнитопровода при отдалении от центра.

для участков с магнитным потоком, проходящим вдоль оси двигателя

$$R_{zj} = \frac{l_j}{\mu_0 \cdot \mu_j \cdot S_j}, \quad (3.2.2)$$

где  $\mu_j$  – относительная магнитная проницаемость материала рассчитываемого участка,  $S_j(r) = \pi \cdot (r_{j2}^2 - r_{j1}^2)$  – площадь сечения (кольцо рис.3.2.) рассчитываемого участка, где  $r_{j1}$  и  $r_{j2}$  - радиальные границы рассчитываемого участка,  $l_j$  – длина рассчитываемого участка.

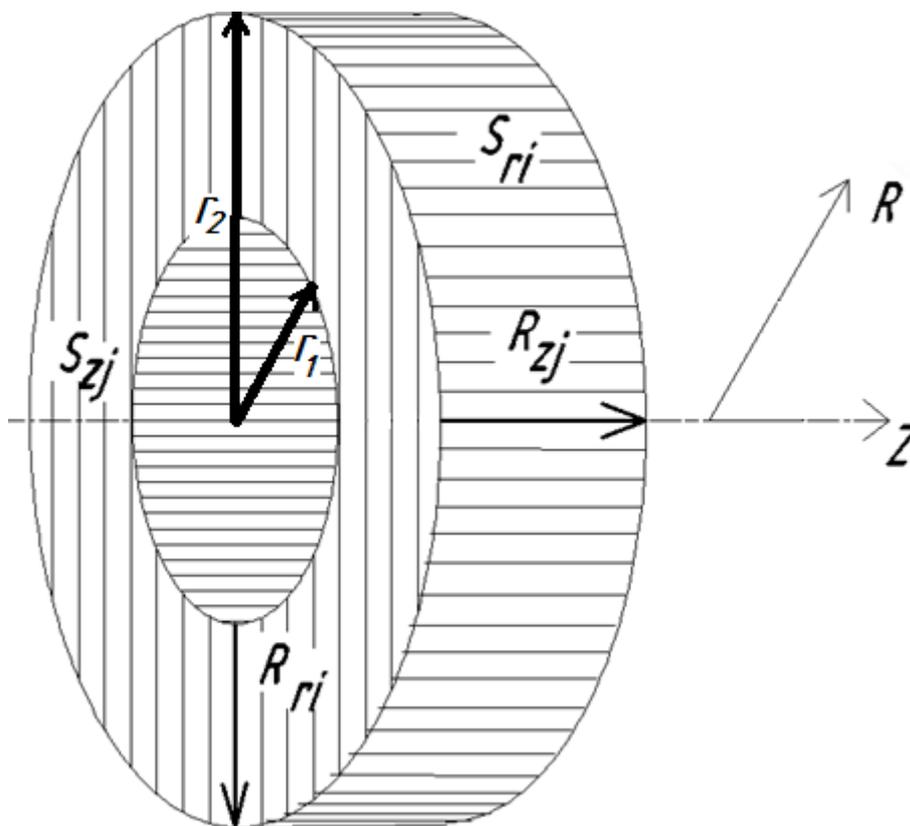


Рис. 3.2. Обобщённое изображение участка магнитной цепи ЦЛВД.

Предварительно был проведён приблизительный расчёт по схеме замещения, но без учёта насыщения магнитной цепи. При этом были следующие допущения: форма зубцов не значительно влияет на общее магнитное сопротивление цепи, поток не проходит через шток и не выходит за

пределы корпуса двигателя [75, 76]. У двигателя есть два крайних положения вторичного элемента: когда на полюсном делении находятся три зубца (рис.3.1.б) и когда четыре (рис.3.1.в).

Расчёты в ANSYS Maxwell показали, что величина магнитного потока проходящего через воздушный зазор мало зависит от положения вторичного элемента (различие менее 1%). Поэтому для приближённого расчёта магнитной цепи использовалось положение вторичного элемента рис.3.1.б), так как так магнитная цепь проще, чем на рис. 3.1.в).

Схема магнитной цепи для упрощённого расчёта, не учитывающего насыщение магнитной цепи, приведена на рис. 3.3.а) Схема эквивалентная этой приведена на рис. 3.3 б).

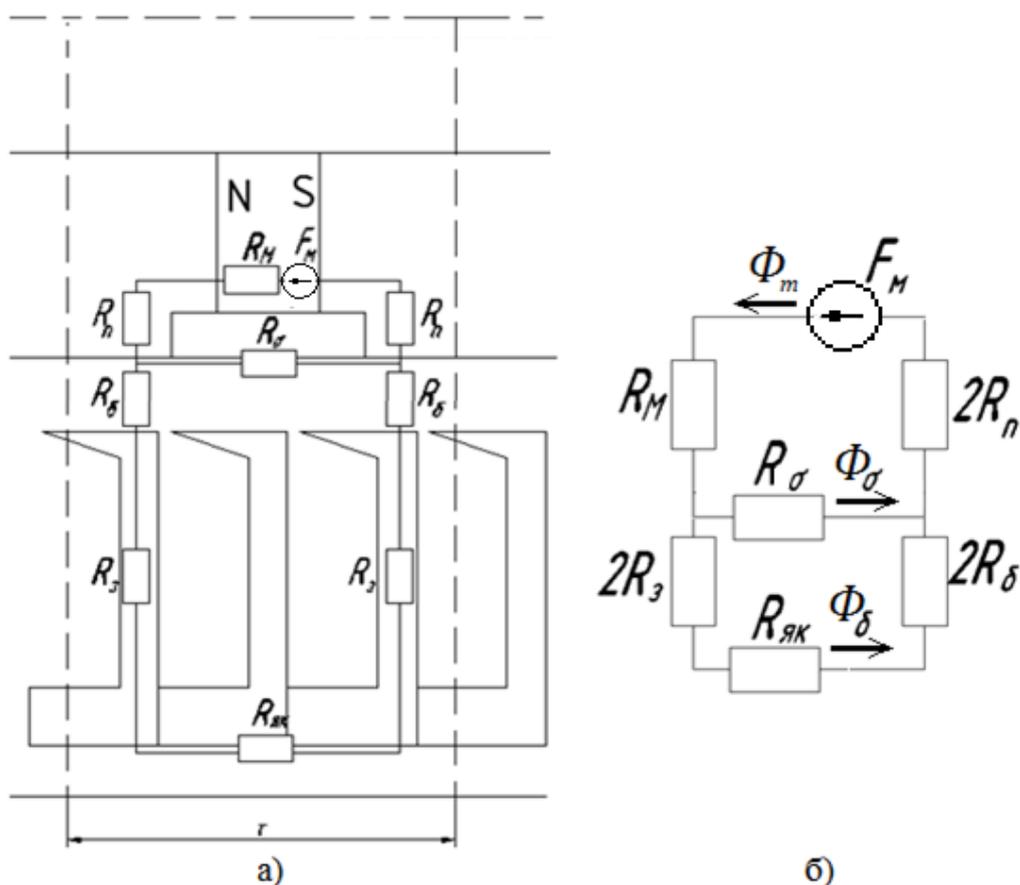


Рис. 3.3 Схема магнитной цепи полюсного деления ЦЛВД: а) полная. б) эквивалентная.

Собственное сопротивление магнита:

$$R_M = \frac{H_c \cdot h}{B_r \cdot Q_M}, \quad (3.2.3)$$

где  $h_m$  – ширина магнита;  $Q_M = 0.25 \cdot \pi \cdot (D_M^2 - d_{шт}^2)$  – площадь поперечного сечения магнита;  $D_M$  – внешний диаметр магнита;  $d_{шт}$  – диаметр штока.

Силовые линии магнитного поля межполюсного рассеяния замыкаются по немагнитной вставке и воздушному зазору, потому сопротивление рассеяния равно:

$$R_{\sigma} = \frac{b_n}{\mu_0 \cdot Q_{\sigma n}}, \quad (3.2.4)$$

где  $b_n$  – ширина немагнитной вставки;  $D_2$  – диаметр вторичного элемента;  $Q_{\sigma n} = 0.25 \cdot \pi \cdot ((D_2 + 2\delta)^2 - D_M^2)$  – площадь поперечного сечения полюсного рассеяния.

Сопротивление полюсного рассеяния  $R_{п\sigma}$  в данном случае рассчитывается как:

$$R_{n\sigma} = \frac{\tau - b_n}{\mu_0 \cdot \mu_c \cdot Q_{\sigma n}} + \frac{R_{\sigma}}{2}, \quad (3.2.5)$$

Сопротивление полюса состоит из участков  $R_{п1}$ ,  $R_{п2}$  и  $R_{п3}$ , соединённых последовательно:

$$R_n = R_{п1} + R_{п2} + R_{п3}, \quad (3.2.6)$$

$$R_{п1} = \frac{\tau - h_m}{4\mu_0 \cdot \mu_c \cdot Q_M}, \quad (3.2.7)$$

$$R_{п2} = \frac{2}{\pi \cdot \mu_0 \cdot \mu_c \cdot (\tau - h_m)} \int_{r_0}^{r_m} \frac{dr}{r}, \quad (3.2.8)$$

где  $r_m = D_M / 2$  – внешний радиус магнита,

$r_0 = \sqrt{\frac{D_M^2 + d_{шт}^2}{8}}$  – радиус цилиндра вдоль поверхности которого, идут основные силовые линии, исходящие из магнита, рассчитывается как радиус окружности делящей поперечное сечение кольца магнита на два равных по площади.

$$R_{n3} = \frac{2}{\pi \cdot \mu_0 \cdot \mu_c \cdot (\tau - b_n)} \int_{r_m}^{r_2} \frac{dr}{r}, \quad (3.2.9)$$

где  $r_2 = D_2 / 2$  - радиус ротора.

Сопротивление воздушного зазора рассчитывается по площади половины полюсного деления (вдоль которой поток имеет одно направление):

$$R_\delta = \frac{1}{\pi \cdot \mu_0 \cdot \tau} \int_{r_2}^{r_{вн}} \frac{dr}{r}, \quad (3.2.10)$$

где  $r_{вн} = r_2 + \delta$  - внутренний радиус статора.

Сопротивление зубца статора:

$$R_z = \frac{1}{2\pi \cdot \mu_0 \cdot \mu_c \cdot b_z} \int_{r_{вн}}^{r_ч} \frac{dr}{r}, \quad (3.2.11)$$

где  $r_ч = r_1 - \Delta_\tau$  - внешний радиус чашки статора;  $\Delta_\tau$  - толщина корпусной трубы статора;  $r_1 = D_1 / 2$  - внешний радиус статора.

Сопротивление якоря-корпуса будет рассчитано как параллельное соединение сопротивлений якоря и корпуса:

$$R_{як} = \frac{R_я \cdot R_к}{R_я + R_к}, \quad (3.2.12)$$

Ярмо статора выполняется с тремя пазами, угловой размер каждого составляет  $\alpha_n = 34^\circ$ . В пазах находятся выводы обмоток, которые соединяются между собой и образуют трёхфазную обмотку. В этом случае площадь стали, по которой проходит магнитный поток ярма будет равна:  $Q'_я = Q_я \cdot (1 - \alpha_n / 120^\circ)$ , где  $Q_я = \pi \cdot ((r_1 - \Delta_\tau)^2 - (r_1 - \Delta_\tau - h_я)^2)$

Магнитное сопротивление ярма:

$$R_я = \frac{2\tau}{3\mu_0 \cdot \mu_c \cdot Q'_я}, \quad (3.2.13)$$

Сопротивление корпуса равно:

$$R_K = \frac{2\tau}{3\mu_0 \cdot \mu_K \cdot Q_K}, \quad (3.2.14)$$

где  $Q_K = \pi \cdot (\Delta_T^2 + D_1 \cdot \Delta_T^2)$ .

Рассчитаем магнитодвижущую силу, создаваемую магнитом:

$$F_M = H_c \cdot h_m, \quad (3.2.15)$$

Общее сопротивление магнитной цепи:

$$R_{об} = R_M + 2R_n + R_\sigma \frac{R_{як} + 2R_3 + 2R_\delta}{R_\sigma + R_{як} + 2R_3 + 2R_\delta}, \quad (3.2.16)$$

Магнитный поток холостого хода в воздушном зазоре:

$$\Phi_0 = \frac{F_M}{R_{об}} \cdot \frac{R_\sigma}{R_\sigma + R_{як} + 2R_3 + 2R_\delta}. \quad (3.2.17)$$

Расчёт магнитной цепи подобным образом является приемлемым для оценочного определения усилия развиваемого двигателем в номинальных режимах работы. Однако, дальнейший расчёт энергетических характеристик двигателя и сравнение их с полученными с помощью ANSYS Maxwell выявил значительные погрешности [77]. Эти погрешности обусловлены тем, что в расчёт по данной методике [72] проводился без учёта насыщения магнитной системы ЦЛВД в отличие от ANSYS Maxwell. Поэтому математическую модель с данным упрощённым вариантом расчёта магнитной цепи использовать для проектирования двигателя не рекомендуется. Целесообразнее использовать расчёт магнитной цепи, учитывающий насыщение её элементов. Данный расчёт учитывает МДС, наводимую катушками двигателя. Она может достигать до четверти общей МДС цепи, что играет значительную роль в насыщении магнитопровода двигателя. Наличие второго источника МДС в свою очередь делает необходимым в решение системы уравнений Кирхгофа, для нахождения магнитного потока на разных участках магнитной цепи. Схемы замещения магнитной цепи на рис. 3.3 а) и б) в данном случае примут вид рис 3.4 а) и б) соответственно.

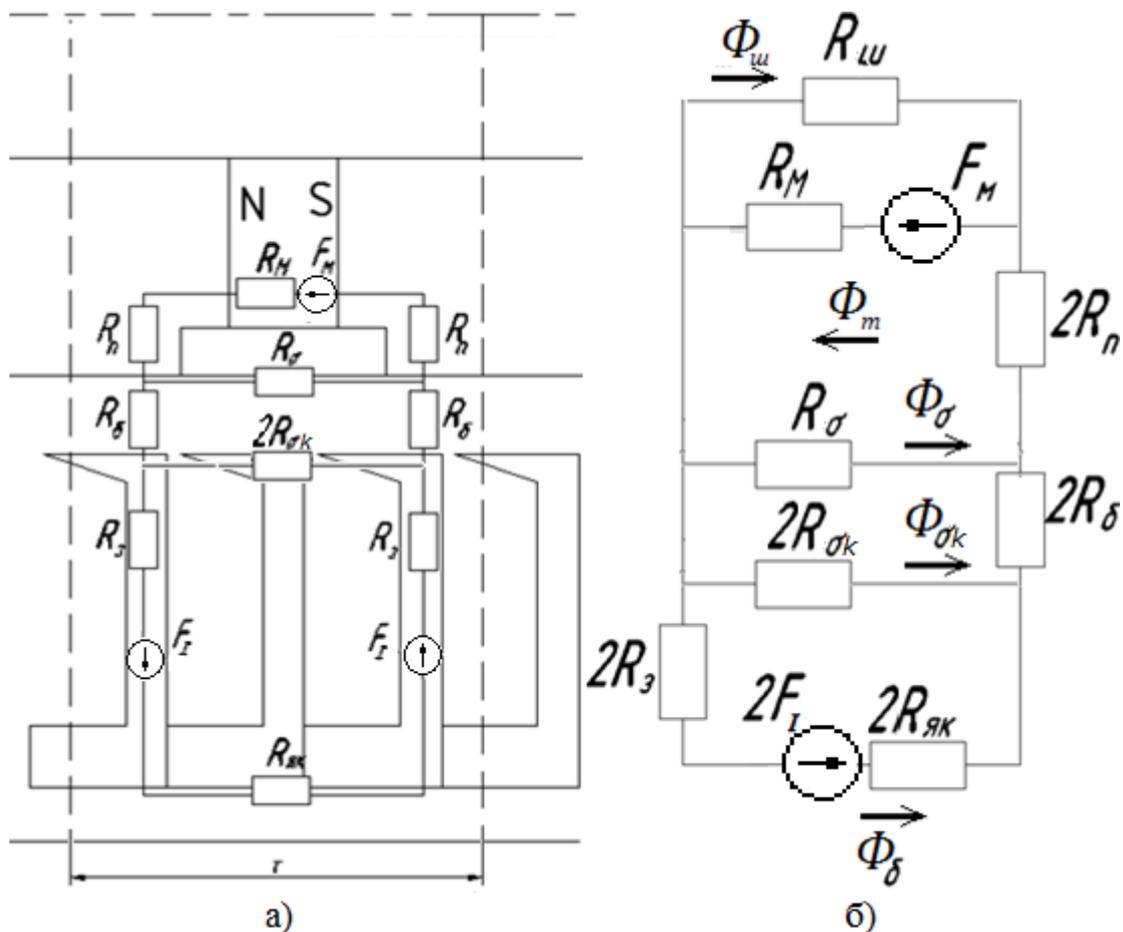


Рис. 3.4 а) Схема магнитной цепи. б) Схема магнитной цепи для расчёта.

Учёт насыщения подразумевает использование кривых намагничивания сталей двигателя, что делает аналитическое решение системы уравнений Кирхгофа невозможным. Поэтому расчёт магнитной цепи необходимо вести численным методом. Для реализации данного расчёта можно воспользоваться любой программной средой. Математическая модель двигателя была построена в программе MathCAD.

Относительная магнитная проницаемость участков цепи из магнитомягких материалов зависит от напряжённости магнитного поля в них:

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 \cdot H}, \quad (3.2.18)$$

где  $H$  и  $B$  – это соответственно напряжённость магнитного поля и магнитная индукция выбранного участка магнитной цепи. Система уравнений Кирхгофа решается относительно магнитного потока на разных участках магнитной цепи.

Таким образом, целесообразно относительную магнитную проницаемость выразить через магнитный поток на участке цепи  $\Phi$  следующим образом:

$$\mu = \frac{\frac{\Phi}{S}}{\mu_0 \cdot H(B)} = \frac{\Phi}{\mu_0 \cdot S \cdot H\left(\frac{\Phi}{S}\right)}, \quad (3.2.19)$$

где  $S$  – площадь поперечного магнитному потоку сечения участка магнитной цепи. Функция  $H(B)$  обусловлена кривой намагничивания материала участка. В MathCAD данная функция реализована интерполированием табличных значений кривой намагничивания материала. Таким образом, сопротивления участков цепи из магнито-мягких материалов примут вид функций  $R(\Phi)$ .

Таким образом, формулы магнитных сопротивлений участков цепи 3.2.1 и 3.2.2 преобразуются соответственно

$$R_{ri} = \int_{r_{i1}}^{r_{i2}} \frac{H_i(\Phi_i / S_i(r)) dr}{\Phi_i}, \quad (3.2.20)$$

$$R_{zj} = \frac{l_j \cdot H_j(\Phi_j / S_j)}{\Phi_j}, \quad (3.2.21)$$

Так как магнитная цепь значительно усложнилась,  $R_M$  теперь является сопротивлением всей параллельной ветви цепи и включает в себя как собственное сопротивление магнита  $R_m$  так и 2 сопротивления  $R_{n1}$ :

$$R_M = R_m + 2 R_{n1}$$

Соответственно преобразовав уравнения (3.2.5 -3.2.8) получим:

$$R_n(\Phi) = R_{n2}(\Phi) + R_{n3}(\Phi), \quad (3.2.21)$$

$$R_{n1}(\Phi) = \frac{(\tau - h_m) \cdot H_{c3}(\Phi/Q)}{4 \cdot \Phi}, \quad (3.2.22)$$

$$R_{n2}(\Phi) = \int_{r_0}^{r_m} H_{c3} \left( \frac{2 \cdot \Phi}{\pi \cdot r \cdot (\tau - h_m)} \right) \cdot \frac{dr}{\Phi}, \quad (3.2.23)$$

$$R_{n3}(\Phi) = \int_{r_m}^{r_2} H_{c3} \left( \frac{2 \cdot \Phi}{\pi \cdot r \cdot (\tau - b_n)} \right) \cdot \frac{dr}{\Phi}, \quad (3.2.24)$$

где  $H_{c3}(B)$  – функция кривой намагничивания стали 3.

Сопротивление полюсного рассеяния  $R_{п\sigma}$  в данном случае рассчитывается как:

$$R_{п\sigma}(\Phi) = \frac{(\tau - b_n) \cdot H_c(\Phi / Q_{\sigma n})}{\Phi} + \frac{R_{\sigma}}{2}, \quad (3.2.25)$$

Функция магнитного сопротивления зубца примет вид:

$$R_3(\Phi) = \int_{r_2 + \delta}^{\frac{D_1}{2} - \Delta_m} H_{c3} \left( \frac{\Phi}{2\pi \cdot r \cdot b_3} \right) \frac{dr}{\Phi}, \quad (3.2.26)$$

Важно заметить, что использование интеграла, позволяет рассчитать магнитное сопротивление с учётом насыщения для сечений на каждом элементарном приращении зубца  $dr$ , а не только для средних сечений на каждую 1/3 зубца как в широко используемых проектировочных методиках [78].

Расчёт сопротивления магнитного рассеяния одной коронки зубцов  $R_{\sigma k}$  представляет собой сумму сопротивления открытия паза рассчитанного по формуле 3.2.2, половины толщины зубца рассчитанного по формуле 3.2.21 и интегрального уравнения сопротивления треугольного зубца:

$$R_{\sigma k}(\Phi_{\sigma k}) = \frac{b_o}{\mu_0 \cdot S_k} + \frac{b_3 \cdot H(\Phi_{\sigma k} / S_k)}{2 \cdot \Phi_{\sigma k}} + \int \frac{\frac{H(\Phi_{\sigma k} / S(h))}{\Phi_{\sigma k}} \cdot \frac{1}{\mu_0(S_k - S(h))}}{\frac{H(\Phi_{\sigma k} / S(h))}{\Phi_{\sigma k}} + \frac{1}{\mu_0(S_k - S(h))}} dh,$$

где  $S_k$  – максимальное ортогональное сечение треугольного зубца,  $dh$  – элементарное линейное приращение зубца,  $S(h)$  – сечение зубца как функция от места.

Сопротивление штока представляет собой сумму продольного сопротивления штока, рассчитанном по формуле 3.2.2, двух поперечных сопротивлений штока

рассчитанных по формуле 3.2.1 и двух сопротивлений полюса, рассчитанных по формуле 3.2.20:

$$R_{ш}(\Phi_{ш}) = \frac{h_m + h_p / 2}{\mu_0 \cdot S_{ш}} + \int_{r_{\partial ш}}^{r_{ш}} \frac{dr}{\mu_0 \cdot \mu_i \cdot S_i(r)} + \int_{r_{ш}}^{r_{\partial м}} \frac{H(\Phi_{ш} / S(r)) dr}{\Phi_{ш}},$$

где  $r_{\partial ш}$  – радиус окружности делящей поперечное сечение штока на равные по площади круг и кольцо.

Расчёт магнитного сопротивления ярма-корпуса (3.2.12-3.2.14) можно заметно упростить, используя для стали корпуса кривую намагничивания стали 3, которая в рабочем диапазоне полностью совпадает с кривой намагничивания стали корпуса. Тогда функция магнитного сопротивления якоря-корпуса примет следующий вид:

$$R_{як}(\Phi) = \frac{2 \cdot \tau \cdot H_{с3} \left( \frac{\Phi}{Q'_я + Q_к} \right)}{3 \cdot \Phi} \quad (3.2.27)$$

Для нахождения магнитных сопротивлений цепи необходимо решить систему уравнений Кирхгофа, составленную согласно схеме на рис. 3.4.б):

$$\Phi_m = \Phi_{ш} + \Phi_{п}$$

$$\Phi_{п} = \Phi_{\sigma} + \Phi_{\delta}$$

$$\Phi_{\delta} = \Phi_{\sigma к} + \Phi_3$$

$$F_m = R_M(\Phi_m)\Phi_m + R_{ш}(\Phi_{ш})\Phi_{ш}$$

$$F_m = 2R_{п}(\Phi_{п})\Phi_{п} + R_M(\Phi_m)\Phi_m + R_{\sigma}(\Phi_{\sigma})\Phi_{\sigma}$$

$$0 = 2R_{\delta}\Phi_{\delta} + 2R_{\sigma к}(\Phi_{\sigma к})\Phi_{\sigma к} - R_{\sigma}(\Phi_{\sigma к})\Phi_{\sigma}$$

$$2F_I = (2R_3(\Phi_3) + 2R_{як}(\Phi_3))\Phi_3 - 2R_{\sigma к}(\Phi_{\sigma к})\Phi_{\sigma к}$$

где  $F_I$  - мгновенное значение МДС наводимое катушкой с током одного паза.

Фаза МДС взята таким образом, что бы МДС обеих катушек, входящих в рассматриваемую секцию двигателя рис. 3.2 а), были равны, а создаваемые ими магнитные потоки сонаправлены с магнитным потоком, создаваемым постоянным магнитом. Эта фаза соответствует установившемуся состоянию

покоя двигателя, при котором усилие двигателя равно нулю, насыщение магнитной цепи максимально. При этом катушки, не входящие в рассматриваемую секцию, не наводят в ней МДС. Так же только при равенстве МДС соседних катушек можно пользоваться допущением о том, что через средний зубец магнитный поток не идёт.

Чтобы решить данную систему с тремя неизвестными  $\Phi_\sigma$ ,  $\Phi_m$  и  $\Phi_\delta$  численным методом необходимо одновременно подбирать две неизвестные  $\Phi_m$  и  $\Phi_\delta$ , потому как именно от них зависят сопротивления магнитной цепи. Для расчёта магнитной цепи была написана функция  $\text{Prog}(F_m, I, R_m, R_\sigma, R_\delta)$ , которая в зависимости от действующего тока  $I$  посредством дихотомии находит и выводит верные значения  $\Phi_m$  и  $\Phi_\delta$ .

Функция представляет из себя следующее:

```

Prog(Fm, FI, Rm, Rσ, Rδ, Rш)
L1:=0          R1:= Φмакс
Φз:= (L1+R1)/2
Повторить 20 раз
L2:=-Φмакс    R2:= Φмакс
    Повторить 20 раз
    Если 2FI < (2Rз(Φз) + 2Rяк(Φз))Φз - 2Rск(Φск)Φск, тогда L2:= Φск,
    иначе R2:= Φск
    Φк:= (L2+R2)/2
Φδ := Φск + Φз
L3:=-Φмакс    R3:= Φмакс
    Повторить 20 раз
    Если 2Rδ Φδ + 2 Rск(Φск)Φск > Rσ(Φск)Φσ, тогда L3:= Φσ,
    иначе R3:= Φσ
    Φσ:= (L3+R3)/2
Φп = Φσ + Φδ
L4:=0          R4:= Φп

```

Повторить 20 раз

Если  $2R_{\Pi}(\Phi_{\Pi})\Phi_{\Pi} + R_M(\Phi_m)\Phi_m + R_{\sigma}(\Phi_{\sigma})\Phi_{\sigma} > R_M(\Phi_m)\Phi_m + R_{\text{ш}}(\Phi_{\text{ш}})\Phi_{\text{ш}}$  ,

тогда  $L4 := \Phi_{\text{ш}}$  ,

иначе  $R4 := \Phi_{\text{ш}}$

$\Phi_{\text{ш}} := (L4 + R4) / 2$

$\Phi_m := \Phi_{\text{ш}} + \Phi_{\Pi}$

Если  $F_m > R_M(\Phi_m)\Phi_m + R_{\text{ш}}(\Phi_{\text{ш}})\Phi_{\text{ш}}$  , тогда  $L1 := \Phi_3$  ,

иначе  $R1 := \Phi_3$

$\Phi_3 := (L1 + R1) / 2$

$\text{Prog} := [\Phi_3, \Phi_{\sigma k}, \Phi_{\delta}, \Phi_{\sigma}, \Phi_{\Pi}, \Phi_m, \Phi_{\text{ш}}]$

где верхняя граница поиска грубо определяется как  $\Phi_{\text{макс}} = (2F_I + F_m) / (R_m + 2R_{\delta})$ , так как  $R_m$  и  $R_{\delta}$  постоянны и представляют большую часть от всего сопротивления магнитной цепи.

Если подставить рабочее значение  $F_I$ , результату данного расчёта можно получить значения магнитных потоков на различных участках магнитной цепи. Для дальнейшего расчёта нам понадобится магнитный поток холостого хода в воздушном зазоре. Результат расчёта Prog показывает реальный магнитный поток на участках цепи, а нам нужна только составляющая холостого хода. При этом вести расчёт Prog для  $F_I = 0$  нельзя, т.к. будет иное насыщение цепи, а соответственно и величина составляющей холостого хода. Поэтому магнитный поток холостого хода необходимо рассчитывать по формуле подобной 3.2.17, только для цепи рис 3.4б принимая насыщение сопротивлений участков цепи равному насыщению, полученному при расчёте Prog. Формула 3.2.17 примет вид:

$$R_{o\delta} = R_M(\Phi_M) + \frac{R_{\sigma}(\Phi_{\sigma}) \left( 2R_{\delta} + \frac{2R_{\sigma\kappa}(\Phi_{\sigma\kappa})(R_{\text{як}}(\Phi_3) + R_3(\Phi_3))}{R_{\sigma\kappa}(\Phi_{\sigma\kappa}) + R_{\text{як}}(\Phi_3) + R_3(\Phi_3)} \right)}{R_{\sigma}(\Phi_{\sigma}) + 2R_{\delta} + \frac{2R_{\sigma\kappa}(\Phi_{\sigma\kappa})(R_{\text{як}}(\Phi_3) + R_3(\Phi_3))}{R_{\sigma\kappa}(\Phi_{\sigma\kappa}) + R_{\text{як}}(\Phi_3) + R_3(\Phi_3)}} + \frac{R_{\sigma}(\Phi_{\sigma}) \left( 2R_{\delta} + \frac{2R_{\sigma\kappa}(\Phi_{\sigma\kappa})(R_{\text{як}}(\Phi_3) + R_3(\Phi_3))}{R_{\sigma\kappa}(\Phi_{\sigma\kappa}) + R_{\text{як}}(\Phi_3) + R_3(\Phi_3)} \right)}{R_{\sigma}(\Phi_{\sigma}) + 2R_{\delta} + \frac{2R_{\sigma\kappa}(\Phi_{\sigma\kappa})(R_{\text{як}}(\Phi_3) + R_3(\Phi_3))}{R_{\sigma\kappa}(\Phi_{\sigma\kappa}) + R_{\text{як}}(\Phi_3) + R_3(\Phi_3)}}$$

$$\Phi_{M0} = F_m / R_{o\delta}$$

$$\Phi_{n0} = \frac{R_{\text{ш}}(\Phi_{\text{ш}})\Phi_{M0}}{R_{\sigma}(\Phi_{\sigma}) \left( 2R_{\delta} + \frac{2R_{\sigma\kappa}(\Phi_{\sigma\kappa})(R_{\text{як}}(\Phi_3) + R_3(\Phi_3))}{R_{\sigma\kappa}(\Phi_{\sigma\kappa}) + R_{\text{як}}(\Phi_3) + R_3(\Phi_3)} \right)} + \frac{2R_{\sigma\kappa}(\Phi_{\sigma\kappa})(R_{\text{як}}(\Phi_3) + R_3(\Phi_3))}{R_{\sigma\kappa}(\Phi_{\sigma\kappa}) + R_{\text{як}}(\Phi_3) + R_3(\Phi_3)}$$

$$\Phi_{\delta 0} = \frac{R_{\sigma}(\Phi_{\sigma})\Phi_{n0}}{R_{\sigma}(\Phi_{\sigma}) + 2R_{\delta} + \frac{2R_{\sigma\kappa}(\Phi_{\sigma\kappa})(R_{\text{як}}(\Phi_3) + R_3(\Phi_3))}{R_{\sigma\kappa}(\Phi_{\sigma\kappa}) + R_{\text{як}}(\Phi_3) + R_3(\Phi_3)}} \quad (3.2.28)$$

Таким образом, находится магнитный поток в воздушном зазоре с учётом насыщения.

### 3.2 Расчёт электрической цепи ЦЛВД

Рассчитав магнитную цепь и узнав максимальный магнитный поток  $\Phi_{\delta 0}$  в зазоре, высчитывается зависимость ЭДС холостого хода от частоты питающего напряжения, которая необходима для электрических расчётов двигателя. Для оценочного упрощённого расчёта усилия ЭДС можно представить как:

$$E_0(f) = 4.44 \cdot w \cdot \Phi_0 \cdot k_{o\delta} \cdot f = 2.834 \cdot f \text{ В/Гц} \quad (3.3.1)$$

где  $w = 2 \cdot p \cdot w_{\text{п}}$  – общее число витков одной фазы,  $\Phi_0 = 0.997 \text{ мВб}$ .

Однако для точного расчёта ЭДС будет иметь вид зависимости  $E_0(I, f)$ , и для сокращения времени расчёта лучше представить как:

$$E_0(I, f) = f \cdot e_0(I) \quad (3.3.2)$$

где  $E_0(I) = 4.44 \cdot w \cdot \Phi_0(30A) \cdot k_{o\delta} = 2.599 \cdot f \text{ В/Гц}$ , когда  $\Phi_0(30A) = 0.914 \text{ мВб}$ .

Сравнив значения ЭДС и магнитного потока холостого хода можно заметить, что существует значительное различие (почти 10%) между магнитным потоком холостого хода насыщенной и ненасыщенной магнитных систем. Для сравнения, магнитный поток холостого хода в воздушном зазоре, рассчитанный в программе ANSYS Maxwell учитывающей насыщение цепи, составляет  $\Phi_0 = 0.89 \text{ мВб}$ . При этом  $E_0 = 2.592 \cdot f \text{ В/Гц}$ . Из всего этого можно сделать вывод, что при расчёте магнитных цепей необходимо учитывать их насыщение.

Приближённо рассчитать усилие двигателя можно по формуле:

$$F = \alpha_p \cdot k_\phi \cdot B_m \cdot A \cdot 2 \cdot \tau \cdot p \cdot \pi \cdot D_2 \quad (3.3.3)$$

где  $2 \cdot \tau \cdot p$  – активная длина статора,  $\pi \cdot D_2$  – длина окружности вторичного элемента,  $A$  – линейная токовая нагрузка,  $\alpha_p = b_n / \tau$  – коэффициент полюсного перекрытия,  $k_\phi$  – коэффициент формы поля (приближённо  $k_\phi = 1.11$ ),  $B_m$  – магнитная индукция в зазоре, определяется как первая гармоника средней магнитной индукции:

$$B_m = \frac{B_{cp}}{\pi/5}, \quad (3.3.4)$$

здесь  $B_{cp}$ , определяется через магнитный поток, прошедший через одну половину одного полюса вторичного элемента, рассматриваемого полюсного деления:

$$B_{cp} = \frac{\Phi_{\delta 0}}{S} = \frac{2\Phi_{\delta 0}}{\pi \cdot \tau \cdot D_2} \quad (3.3.5)$$

Линейная токовая нагрузка  $A$ , определяется как:

$$A = \frac{I \cdot w_n}{\tau/3}, \quad (3.3.6)$$

где  $I$  – действующее значение тока проходящего через обмотку статора.

Зависимость тока от необходимого усилия с учётом (3.3.6) записана как:

$$I(F) = \frac{F \cdot \tau}{\alpha \cdot k_\phi \cdot B_m \cdot 2\tau p \cdot \pi D_2 \cdot 3 \cdot w_n} = \frac{F}{6 \cdot \alpha \cdot k_\phi \cdot B_m \cdot p \cdot \pi D_2 \cdot w_n}. \quad (3.3.7)$$

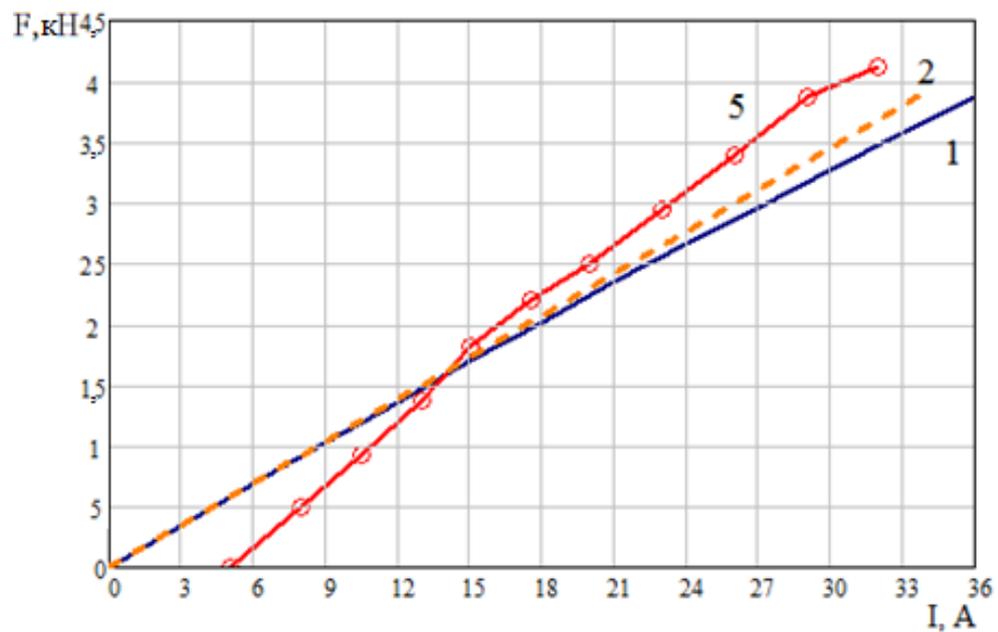


Рис.3.6 а) Графики зависимости усилия от тока:

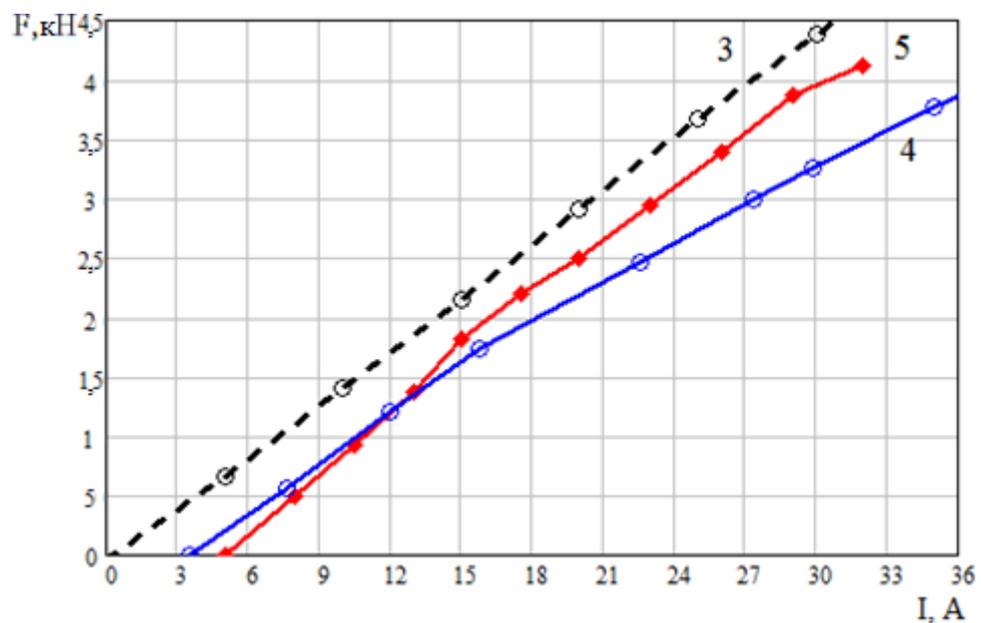


Рис.3.6 б) Графики зависимости усилия от тока.

На рис. 3.6 построены графики зависимости усилия от тока, полученные: по формуле (3.3.7) для расчёта методом электрических и магнитных цепей с учётом насыщения 1) и без учёта насыщения 2); на расчётной модели ANSYS Maxwell при неподвижном вторичном элементе 3) и при частоте работы двигателя 7 Гц 4). График 5) получен экспериментально. Значения максимального усилия развиваемого двигателем при действующем токе в 30 А. приведены в таблице 3.4.

Максимальное усилие прототипа ЦЛВД при действующем значении тока  
30А полученное разными методами расчёта

№	Тип расчёта	Усилие, Н
1	Метод электрических и магнитных цепей с учётом насыщения магнитной цепи	3274
2	Метод электрических и магнитных цепей без учёта насыщения магнитной цепи	3450
3	ANSYS Maxwell magnetostatic при постоянном токе и неподвижном вторичном элементе	4384
4	ANSYS Maxwell transient при движущемся вторичном элементе и частоте питающего напряжения 7Гц	3264
5	Экспериментальное значение	3940

Как видно из таблицы 3.4 наиболее точный результат дают метод электрических и магнитных цепей учитывающий насыщение магнитной цепи и влияние токов в обмотках статора на магнитный поток и расчёт в методе конечных элементов в ANSYS Maxwell magnetostatic. 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. Однако, токовая характеристика двигателя, полученная экспериментально не точно отображает работу двигателя, так как снималась при постоянном токе. Как описано в п. 2.3. замер усилия по максимальному значению в ANSYS Maxwell magnetostatic соответствует пиковому значению усилия при наличии биений и зависит от фазы токов.

Таким образом, можно сделать вывод, что, несмотря на то, что расчёт усилия в magnetostatic и по формуле (3.3.3) соответствует эксперименту, они не подходят для построения рабочих характеристик двигателя, работающего на синусоидальном напряжении. Математическая модель требует более точный расчёт усилия.

После расчёта магнитной цепи можно рассчитать продольное и поперечное индуктивные сопротивления, используя формулы из [72].

Коэффициенты продольной и поперечной реакции якоря соответственно равны:

$$\kappa_{\phi d} = \frac{\pi \cdot \sin(\alpha \cdot \kappa_{\phi} \cdot \pi / 2)}{\alpha \cdot \kappa_{\phi} + \sin(\alpha \cdot \kappa_{\phi} \cdot \pi / 2)}, \quad (3.3.8)$$

$$\kappa_{\phi q} = \frac{\pi \cdot (1 - \cos(\alpha \cdot \kappa_{\phi} \cdot \pi / 2))}{\alpha \cdot \kappa_{\phi} + \sin(\alpha \cdot \kappa_{\phi} \cdot \pi / 2)}, \quad (3.3.9)$$

$$\lambda_{ad} = 1/R_d, \quad \lambda_{aq} = 1/R_q, \quad (3.3.10)$$

где для точного расчёта сопротивление  $R_d$  рассчитывается согласно рис. 3.5, а сопротивление  $R_q$  рассчитывается согласно рис. 3.7 для чего создаётся отдельная функция  $\text{Prog}(F_I, \Phi_{30}, \Phi_{\sigma k0}, R_{\sigma}, R_{\delta})$ , которая посредством итерационного расчёта определяет поперечные магнитные потоки.

Функция расчёта магнитного потока через поперечное магнитное сопротивление цепи двигателя.

$\text{Prog}(F_I, \Phi_{30}, \Phi_{\sigma k0}, R_{\sigma}, R_{\delta})$

$L1 := 0 \quad R1 := F_I / (2R_{\delta})$

$\Phi_3 := R1 / 2$

Повторить 20 раз

$L2 := 0 \quad R2 := F_I / (2R_{\delta})$

Повторить 20 раз

Если  $2F_I < (2R_3(\Phi_3) + R_{\text{як}}(\Phi_3 + \Phi_{30}) + R_{\text{як}}(\Phi_3 - \Phi_{30}))\Phi_3 - R_{\sigma k}(\Phi_{\sigma k} + \Phi_{\sigma k0})\Phi_{\sigma k} -$

$-R_{\sigma k}(\Phi_{\sigma k} - \Phi_{\sigma k0})\Phi_{\sigma k}$ , тогда  $L2 := \Phi_{\sigma k}$ , иначе тогда  $R2 := \Phi_{\sigma k}$

$\Phi_{\sigma k} := (L2 + R2) / 2$

$\Phi_{\delta} := \Phi_{\sigma k} + \Phi_3$

Если  $2F_I > (2R_3(\Phi_3) + R_{\text{як}}(\Phi_3 + \Phi_{30}) + R_{\text{як}}(\Phi_3 - \Phi_{30}))\Phi_3 + (2R_{\delta} + R_{\sigma}(\Phi_{\delta}))\Phi_{\delta}$ ,

тогда  $L2 := \Phi_3$ , иначе  $R2 := \Phi_3$

$\text{Prog} := [\Phi_3, \Phi_{\sigma k}, \Phi_{\delta}]$

Продольное и поперечное индуктивные сопротивления равны:

$$L_d = \frac{m \cdot w^2 \cdot k_{об}^2 \cdot \lambda_{ad}}{\pi \cdot p \cdot \kappa_{\phi d}} + 2 \cdot p \cdot \mu_0 \cdot w_n^2 l_{\delta} \cdot \lambda_n, \quad (3.3.11)$$

$$L_q = \frac{m \cdot w^2 \cdot k_{об}^2 \cdot \lambda_{aq}}{\pi \cdot p \cdot \kappa_{\phi q}} + 2 \cdot p \cdot \mu_0 \cdot w_n^2 l_{\delta} \cdot \lambda_n, \quad (3.3.12)$$

где  $\lambda_n$  – относительная пазовая магнитная проводимость, рассчитываемая как:

$$\lambda_n = \frac{h_1}{3 \cdot b_1} + \frac{h_2}{b_1} + \frac{2h_3}{b_1 + b_2} \quad (3.3.13)$$

где  $h_1 = b \cdot w_n / 2$ ;  $h_2 = (D_1 - D_2) / 2 - \delta - b_k - h_{я} - \Delta_T - h_1$ ;  $h_3 = b_k$ ;  $h_4 = 0$ ;  $b_1 = \tau / 3 - b_3$ ;  $b_2 = b_0$ .

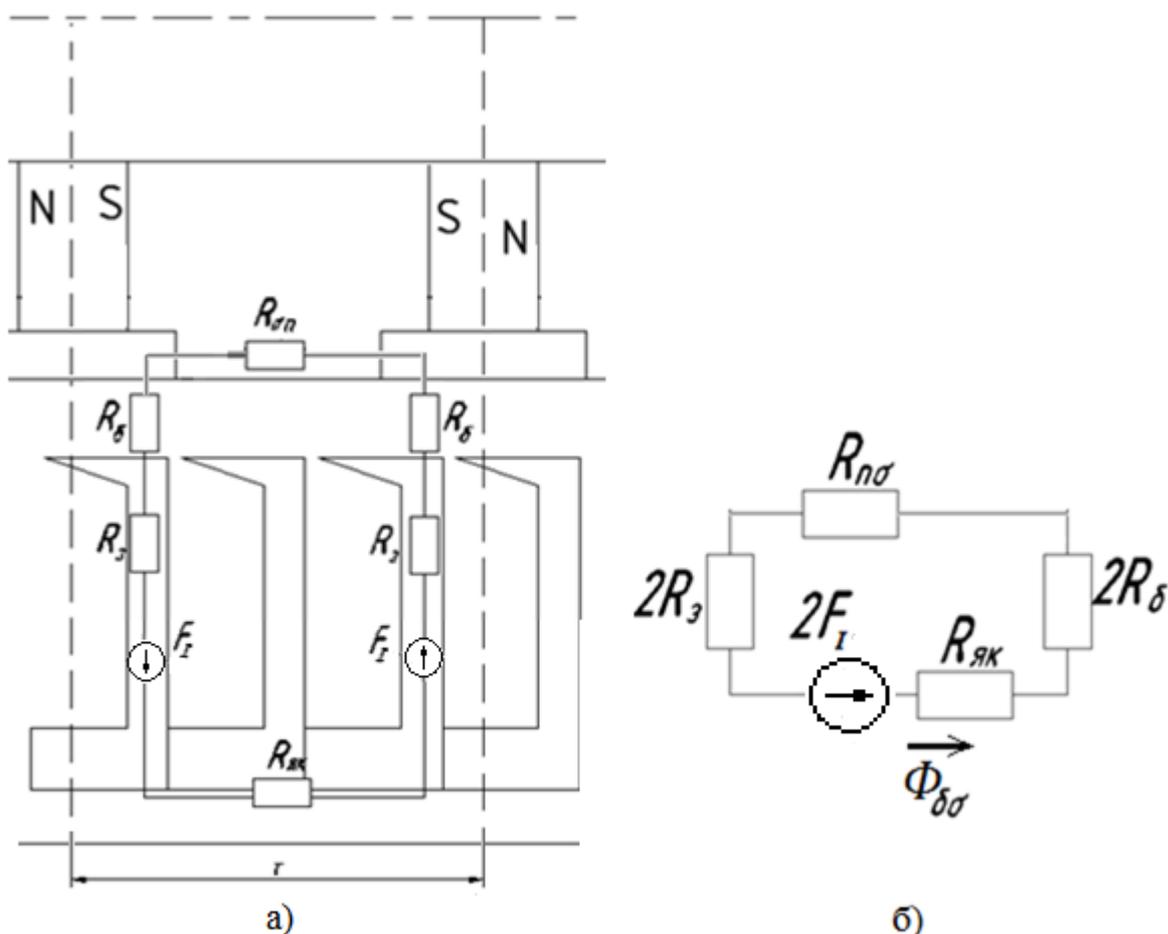


Рис. 3.7 а) Схема магнитной цепи для расчёта  $R_q$ . б) Схема магнитной цепи для расчёта  $R_q$ .

С помощью продольной и поперечной индуктивностей можно выразить зависимость индуктивных сопротивлений от частоты:

$$X_d(f) = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_d \quad (3.3.14)$$

$$X_q(f) = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_q \quad (3.3.15)$$

При заданных техническим заданием, мгновенной скорости  $v$  и тяговом усилии  $F$ , можно рассчитать необходимые для подачи на двигатель величины напряжения и его частоты.

Система уравнений (согласно векторной диаграмме рис.3.8):

$$v = 2 \cdot \tau \cdot f; \quad (3.3.16)$$

$$F = \frac{P_{ЭМ}}{v} = \frac{m \cdot E_0 \cdot I_s \cdot \cos(\psi)}{2 \cdot \tau \cdot f}; \quad (3.3.17)$$

$$U \cdot \sin(\theta) = I_q \cdot X_q - I_d \cdot r; \quad (3.3.18)$$

$$U \cdot \cos(\theta) = I_d \cdot X_d + I_q \cdot r + E_0; \quad (3.3.19)$$

$$I_d = I_s \cdot \sin(\psi); \quad (3.3.20)$$

$$I_q = I_s \cdot \cos(\psi); \quad (3.3.21)$$

$$I_s = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}, \quad (3.3.22)$$

где  $I_s$  – ток статора, который связан с действующим током фазы  $I$  как:

$$I_s = \frac{3}{\sqrt{2}} I. \quad (3.3.23)$$

Техническим заданием нам заданы значения тягового усилия и мгновенной скорости для каждого момента времени работы двигателя, а мгновенное значение температуры мы знаем от датчика температуры, но для расчёта зададимся температурой 100С°.

Выразим из (3.3.17) и (3.3.21) поперечную составляющую тока  $I_q$ :

$$I_q = \frac{2 \cdot \tau \cdot f \cdot F}{m \cdot E_0}. \quad (3.3.24)$$

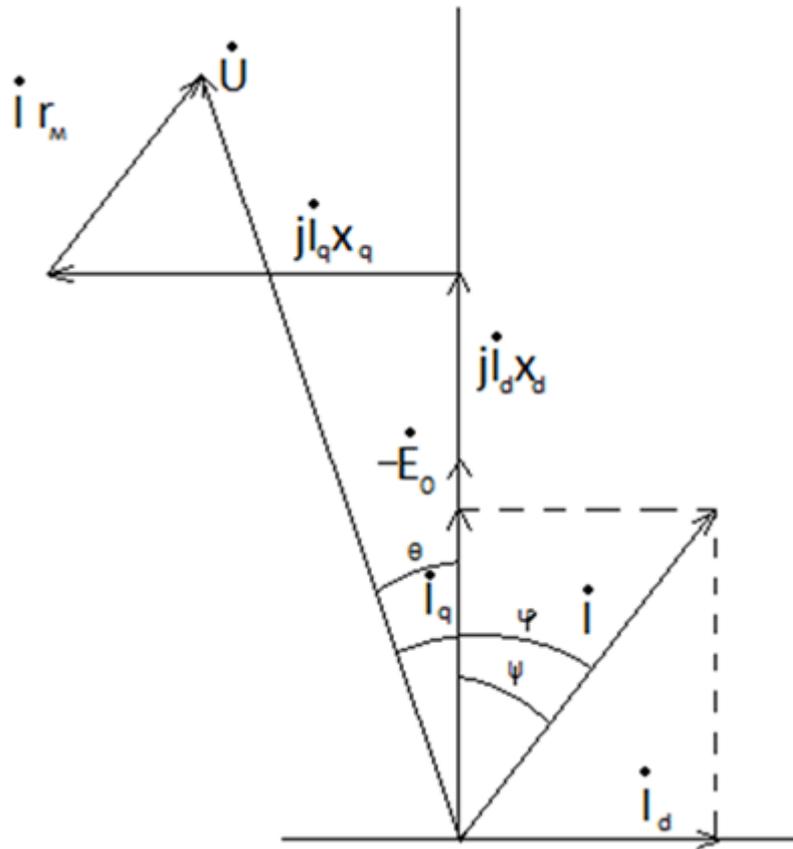


Рис. 3.8 Векторная диаграмма ЦЛВД

Далее по векторной диаграмме найдём продольную составляющую тока  $I_d$ , предварительно рассчитав  $I$  по формуле (3.3.6):

$$I_d = \sqrt{I_s^2 - I_q^2} . \quad (3.3.25)$$

Согласно (3.3.18) и (3.3.19) напряжение подаваемое на статор равно:

$$U = \sqrt{(U \cdot \sin(\theta))^2 + (U \cdot \cos(\theta))^2}$$

$$U = \sqrt{(I_q \cdot X_q - I_d \cdot r)^2 + (I_d \cdot X_d + I_q \cdot r + E_0)^2} \quad (3.3.26)$$

Согласно формуле (3.3.26) рассчитана зависимость фазного напряжения питания ЦЛВД от частоты при номинальном значении действующего тока 30А. Эта зависимость показана на Рис.3.9.

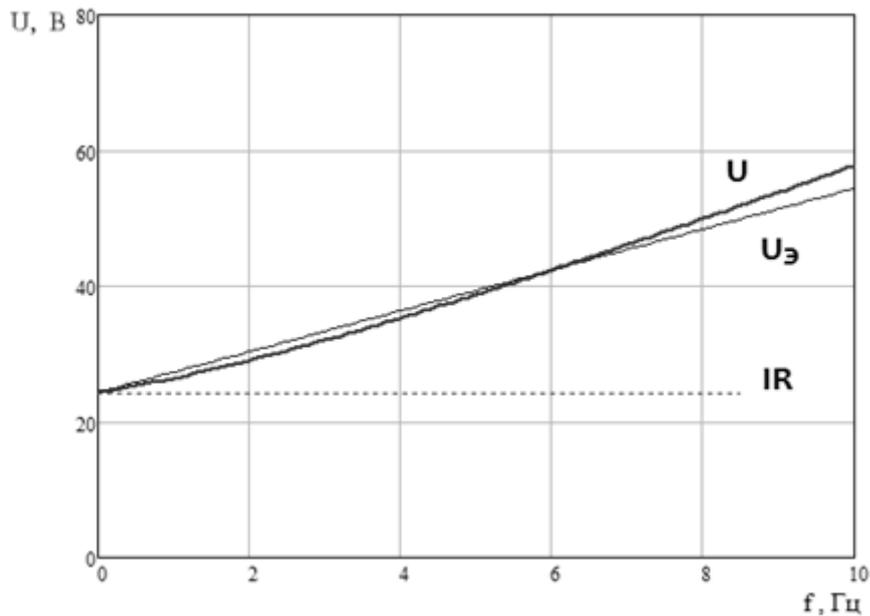


Рис.3.9. График зависимости напряжения питания от частоты при заданном токе обмотки статора 30А.

Для расчёта зависимости активного сопротивления от температуры необходимо высчитать линейные размеры проводника. Зная число витков в одном пазу и их расположение, можно рассчитать суммарную длину проводников на одну фазу статора:

$$l_{ps} = p \cdot w \cdot l_{\delta}, \quad (3.3.27)$$

где средняя длина витка обмотки  $l_{\delta} = \pi \cdot d_{cp}$ , где средний диаметр витка:

$$d_{cp} = D_2 + 2 \cdot (b_k + \delta) + a \cdot w_n / 4$$

Для точности прибавим к этой величине длину статора двигателя, как длину проводников соединяющих катушки одной фазы между собой:

$$l_p = l_{ps} + \tau \cdot p \quad (3.4.28)$$

Далее найдём активное сопротивление обмоток одной фазы двигателя при температуре 20°C согласно закону Ома:

$$R_{20^\circ C} = \rho \cdot l_p / S_r \quad (3.3.29)$$

Для расчёта электрической цепи важно рассчитать активное сопротивление обмоток статора. И так как двигатель работает в относительно широком диапазоне температур, то активное сопротивление в зависимости от температуры имеет вид:

$$r(t^\circ) = R_{20^\circ} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\theta) \quad (3.3.30)$$

### 3.3 Расчёт угловых и рабочих характеристик ЦЛВД по предлагаемой методике

При построении угловых характеристик задаёмся постоянными значениями величины и частоты подаваемого напряжения, а угол нагрузки изменяем в диапазоне от -90 до 270 градусов. Продольная и поперечная составляющие токов статора вычисляются по [72]:

$$I_d = \frac{X_q \cdot (U \cdot \cos(\theta) - E_0) - r_s \cdot U \cdot \sin(\theta)}{X_d \cdot X_q + r_s^2} \quad (3.4.1)$$

$$I_q = \frac{r_s \cdot (U \cdot \cos(\theta) - E_0) + X_d \cdot U \cdot \sin(\theta)}{X_d \cdot X_q + r_s^2} \quad (3.4.2)$$

Для выполнения расчёта с учётом насыщения магнитной цепи токи  $I_d$  и  $I_q$  рассчитываются функцией Current(U,θ,f) представляющей следующее:

Current(U,θ,f)

L1:=0                      R1:= U<sub>s</sub>/r<sub>s</sub>

Повторить 20 раз

I<sub>φ</sub>:= (L1+R1)/2

E<sub>0</sub>:= e<sub>0</sub>(I<sub>φ</sub>)

X<sub>d</sub>:= 2·π·f·L<sub>d</sub>(I<sub>φ</sub>)

X<sub>q</sub>:= 2·π·f·L<sub>q</sub>(I<sub>φ</sub>)

$$I_d = \frac{X_q \cdot (U \cdot \cos(\theta) - E_0) - r_s \cdot U \cdot \sin(\theta)}{X_d \cdot X_q + r_s^2}$$

$$I_q = \frac{r_s \cdot (U \cdot \cos(\theta) - E_0) + X_d \cdot U \cdot \sin(\theta)}{X_d \cdot X_q + r_s^2}$$

$$I_s = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}$$

Если I<sub>φ</sub> < 0.47·I<sub>s</sub>, тогда L1:= I<sub>φ</sub>, иначе R1:= I<sub>φ</sub>

Current:= [I<sub>d</sub>, I<sub>q</sub>]

Усилие, развиваемое двигателем можно упрощённо рассчитать по формуле (3.3.17). Но эта формула может быть использована лишь для двигателей, у которых продольное и поперечное индуктивные сопротивления

примерно равны, поэтому для расчёта угловых характеристик двигателя воспользуемся [72].

Максимальные основное усилие  $F_{\varepsilon m}$  и реактивное усилие  $F_{dqm}$ :

$$F_{\varepsilon m} = \frac{3 \cdot U \cdot E_0}{2\tau \cdot f(X_d X_q + r_s^2)^2} \cdot \sqrt{(X_d X_q^2 + 2 \cdot r_s^2 X_d - r_s^2 X_q)^2 + r_s^2 (2X_q^2 - X_d X_q + r_s^2)^2}$$

$$F_{dqm} = \frac{3 \cdot U^2 \cdot (X_d - X_q)}{4\tau \cdot f(X_d X_q + r_s^2)^2} \cdot \sqrt{(X_d^2 + r_s^2) \cdot (X_q^2 + r_s^2)}$$

Тормозные основное усилие  $F_{\varepsilon T}$  и реактивное усилие  $F_{dqT}$ :

$$F_{\varepsilon T} = -\frac{3 \cdot E_0^2 \cdot r_s}{2\tau \cdot f(X_d X_q + r_s^2)^2} \cdot (X_q^2 + r_s^2)$$

$$F_{dqT} = -\frac{3 \cdot U^2 \cdot r_s}{2\tau \cdot f(X_d X_q + r_s^2)^2} \cdot (X_d - X_q)^2$$

Углы смещения основного  $\alpha_\varepsilon$  и реактивного  $\alpha_{dq}$  усилий:

$$\alpha_\varepsilon = \arctg \left( \frac{r_s (2X_q^2 - X_d X_q + r_s^2)}{X_d X_q^2 + 2 \cdot r_s^2 X_d - r_s^2 X_q} \right)$$

$$\alpha_{dq} = \arctg \left( \frac{r_s (X_d + X_q)}{X_d X_q - r_s^2} \right)$$

Полные основное усилие  $F_\varepsilon$  и реактивное усилие  $F_{dq}$ равняются:

$$F_\varepsilon = F_{\varepsilon m} \cdot \sin(\theta + \alpha_\varepsilon) + F_{\varepsilon T}$$

$$F_{dq} = F_{dqm} \cdot \sin 2(\theta + \alpha_{dq}) + F_{dqT}$$

В итоге получим значение синхронного усилия  $F_C$ :

$$F_C = F_\varepsilon + F_{dq} \quad (3.4.3)$$

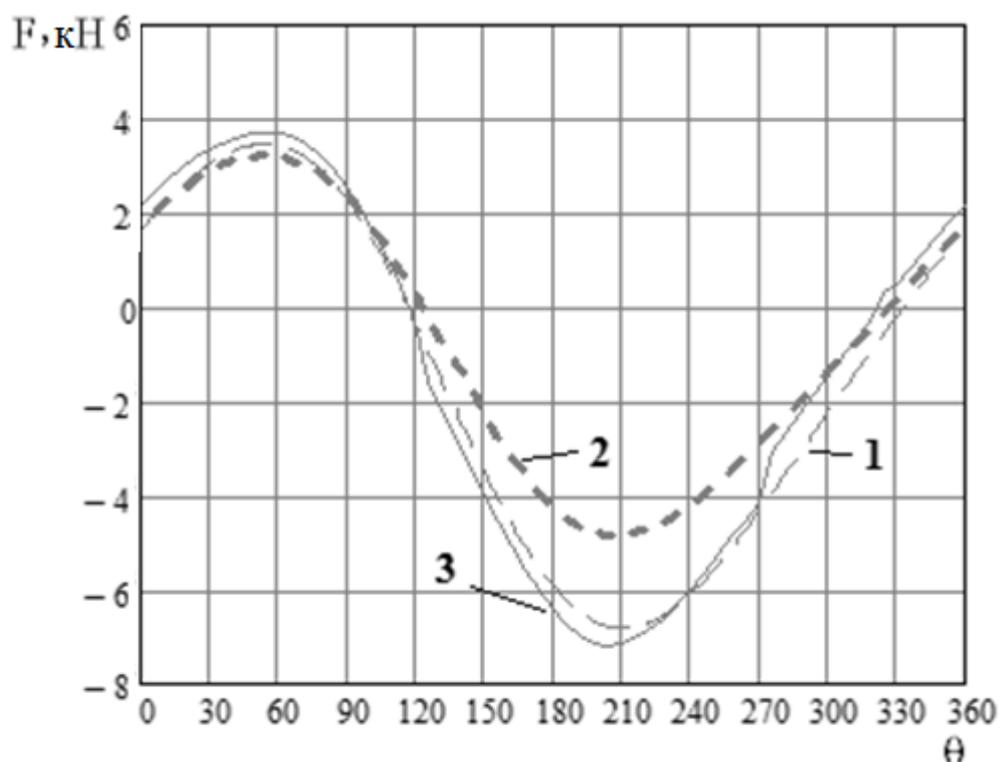


Рис. 3.10 Угловые характеристики ЦЛВД при частоте питающего напряжения 10Гц, полученные расчётами 1) с учётом насыщения магнитной цепи, 2) без учёта насыщения магнитной цепи 3) методом конечных элементов.

Проанализировав графики 1-3 на рис. 3.10, можно сделать вывод, что целесообразнее вести расчёт усилия по формуле (3.3.17) а не по (3.4.3), потому как график по формуле (3.3.17) заметнее сходится с графиком полученным методом конечных элементов, который считается наиболее надёжным так как учитывает все процессы происходящие в двигателе. На графиках можно заметить, что максимальное усилие в генераторном режиме становится больше, чем в двигательном. Причиной тому влияние активного сопротивления. В идеализированной синхронной машине активное сопротивление, которой крайне мало по сравнению с индуктивным, с ростом частоты пропорционально растёт и ЭДС и общее сопротивление обмотки. Но так как ЦЛВД работает на низких частотах, то его активное сопротивление иногда превышает индуктивное, потому в рабочем диапазоне частот можно наблюдать этот эффект на угловую характеристику [69]. Если поднять частоту питающего напряжения заметно больше, например, до промышленной, то эффект будет

незаметен так как индуктивное сопротивление стало много большим активного. Наглядное сравнение угловых характеристик ЦЛВД частот 1, 5, 10 и 50 Гц представлено на рис. 3.11.

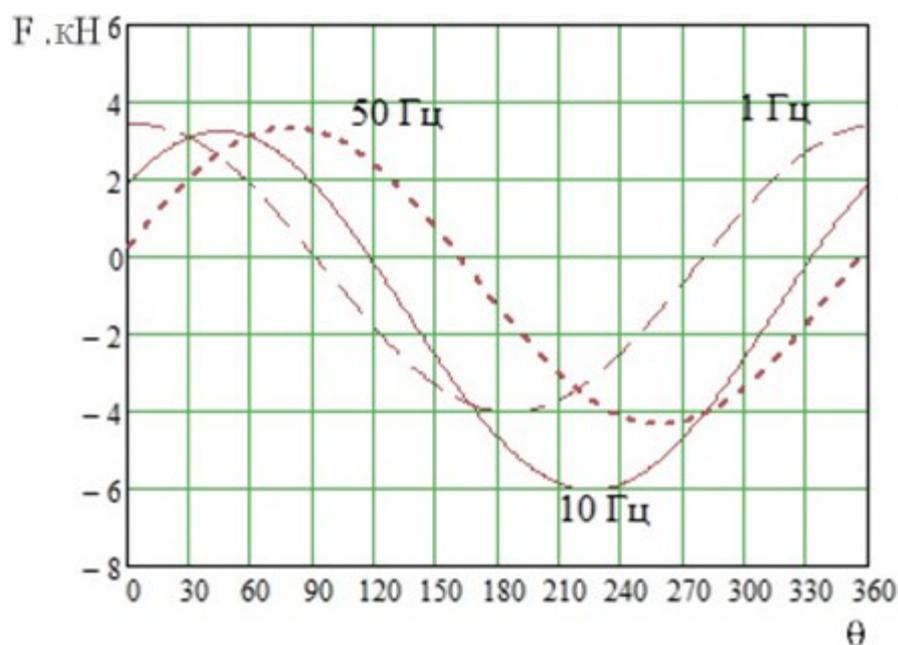


Рис. 3.11 Угловые характеристики ЦЛВД для частот питающего напряжения 1 Гц, 5 Гц, 50 Гц.

По рис. 3.11 видно, что угол нагрузки  $\theta$ , при котором ЦЛВД достигает максимальное усилие, разнится в зависимости от частоты питающего напряжения, это так же обусловлено влиянием активного сопротивления. При частоте в 1 Гц двигатель развивает максимальное усилие при угле нагрузки  $\theta \approx 0^\circ$ , потому как активное сопротивление много больше индуктивного, что противоречит пониманию идеализированной синхронной машины. При промышленной же частоте в 50 Гц максимально усилие двигателя достигается при угле  $\theta \approx 90^\circ$ , что соответствует идеализированной синхронной машине, в которой при расчётах активным сопротивлением обмоток пренебрегают.

Потерями в стали пренебрегаем в связи с низким диапазоном рабочих частот двигателя. Так же пренебрегаем механическими потерями. Итого полезная мощность  $P_2 = P_{эм}$ , активная мощность потребляемая двигателем будет состоять из электромагнитной мощности и потерь в меди:

$$P_s = P_{эм} + m \cdot I^2 \cdot r, \quad (3.4.4)$$

где  $P_{эм} = m E_0 I \cos(\psi)$ .

Полная мощность, потребляемая двигателем:

$$S = U \cdot I_S \quad (3.4.5)$$

Реактивная мощность, потребляемая двигателем:

$$Q = \sqrt{S^2 - P_S^2} \quad (3.4.6)$$

Зависимости усилия  $F_c$ , действующего фазного тока  $I$ , потребляемой мощности  $P_1$ , полезной мощности  $P_2$ , коэффициента полезного действия от угла нагрузки  $\theta$  изображены на рис. 3.12

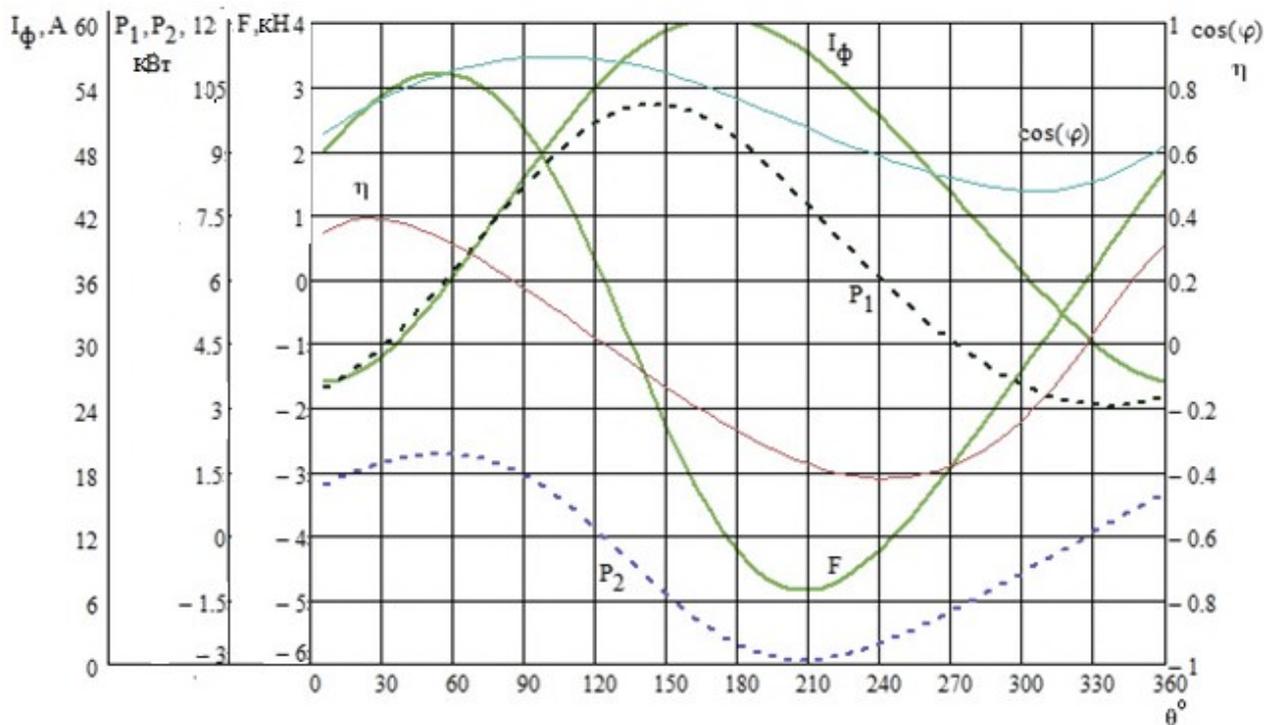


Рис. 3.12 Угловые характеристики ЦЛВД при величине питающего напряжения 67 В и частоте 10 Гц.

На графике видно, что усилие достигает своего максимального значения при угле  $\theta = 50^\circ$ . Так же можно заметить, что коэффициент полезного действия и коэффициент мощности достигают своих наибольших значений приблизительно при том же угле  $\theta$ . При  $\theta = 125^\circ$  ЦЛВД переходит в генераторный режим, при этом усилие ЦЛВД становится отрицательным.

Рабочие характеристики ЦЛВД построены при постоянном угле нагрузки и частоте питающего напряжения, при разных величинах питающего

напряжения по тем же формулам (3.4.4 – 3.4.6). Рабочие характеристики для частоты 10 Гц и угла нагрузки  $50^\circ$  представлены на Рис. 3.13.

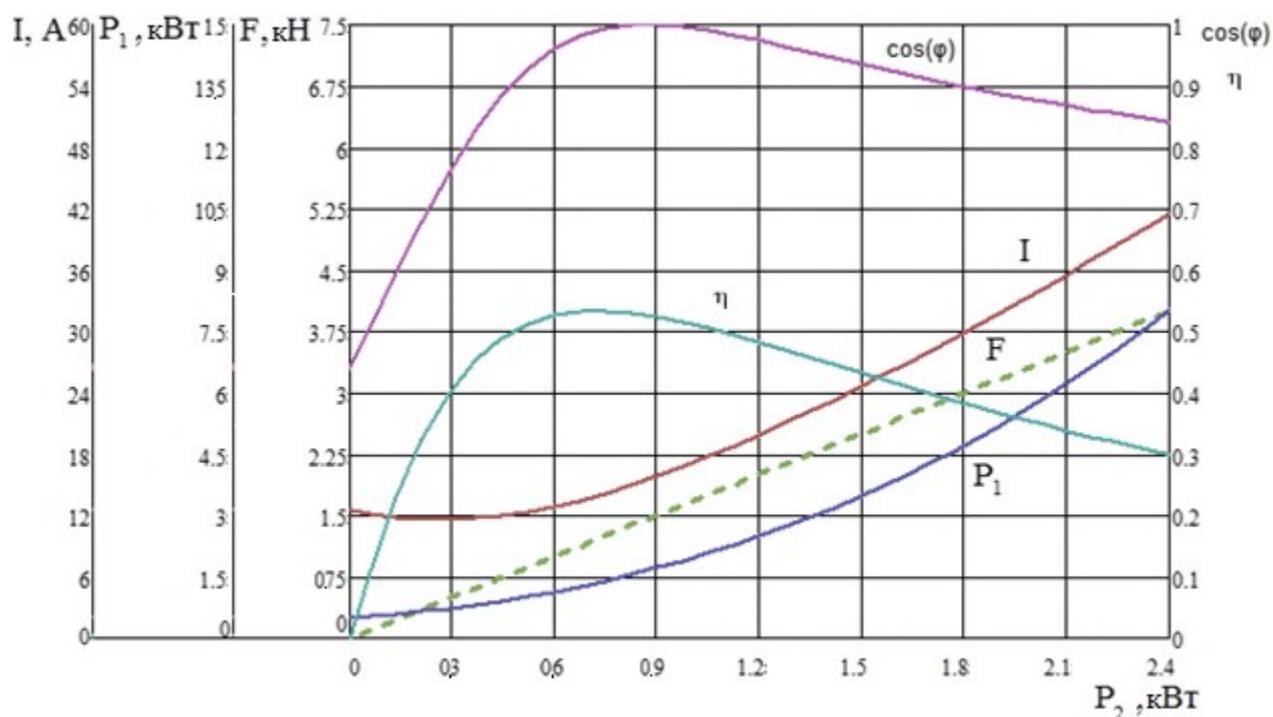


Рис. 3.13 Рабочие характеристики ЦЛВД для частоты 10 Гц и угла нагрузки  $50^\circ$

Время расчёта угловых и рабочих характеристик с учётом насыщения магнитной цепи на 100 расчётных точек каждую в сумме составило менее 10 минут, когда на их расчёт методом конечных элементов в программном пакете ANSYS Maxwell на 10 расчётных точек было потрачено несколько часов. В сравнении для расчёта с одинаковыми допущениями, то есть на одном полюсном делении, время расчёта на одну точку характеристики методом цепей с учётом насыщения составило 1,5 секунды, а методом конечных элементов 5 секунд. Это показывает, что данная методика математического моделирования может использоваться вместо МКЭ, как для построения характеристик, так и для многовариантных расчётов двигателя. Время расчёта угловых и рабочих характеристик без учёта насыщения магнитной цепи составило менее 3-х секунд на 100 точек. Это показывает, что хоть методика без учёта насыщения не подходит для многовариантных расчётов, она вполне сгодится для построения характеристик двигателя. А если заранее уточнить насыщение и относительные магнитные проницаемости для каждого участка магнитной цепи, то данную математическую модель двигателя можно

использовать в системе управления двигателем. Простота реализации математической модели, позволяющая написать её в любой программной среде, делает метод расчёта на основе теории электрических и магнитных цепей намного выгоднее по сравнению с методом конечных элементов, для реализации которого необходимы дорогостоящие программные пакеты и мощные компьютеры.

### **3.4 Выводы по главе 3**

1. Сравнение результатов расчёта магнитной цепи математической модели с данными эксперимента, а именно: магнитный поток холостого хода; зависимость ЭДС холостого хода от частоты питающего напряжения; зависимость развиваемого усилия от силы тока; измеренными значениями напряжения при соответствующих значениях усилия и частоты, было получено незначительное расхождение менее 5%, что является удовлетворительным для поставленной задачи.

2. Сравнение угловых характеристик полученных с помощью математической модели и полученных на расчётной модели в программном пакете ANSYS Maxwell выявило расхождения при номинальном токе 30 А менее 2%, что подтверждает точность математической модели ЦЛВД.

3. С помощью математической модели были получены угловые и рабочие характеристики двигателя. На угловых характеристиках наглядно показано влияние активного сопротивления на смещение точки максимального усилия двигателя по углу нагрузки в зависимости от частоты, чего нельзя добиться строя угловую характеристику по расчёту методом конечных элементов.

4. Математическая модель основана на теории электрических и магнитных цепей и учитывает насыщение участков магнитной цепи. Что позволяет не только рассчитывать рабочие характеристики двигателя, но и проводить проектировочные расчёты с целью получения наилучших конструкций. При этом время расчёта по данной методике в сотни раз меньше чем для расчёта методом конечных элементов, реализуемого в ANSYS Maxwell.

## **Глава 4. Исследование и рационализация конструкции ЦЛВД с целью увеличения тягового усилия**

Для увеличения тягового усилия цилиндрического линейного вентильного двигателя были проведены многовариантные расчёты в программе ANSYS Maxwell с целью получения зависимости максимального усилия развиваемого двигателем от следующих параметров: ширины, диаметра и материала магнитов, коэффициента полюсного деления и величины открытия паза. Достоверность расчётов в программе ANSYS Maxwell подтверждена сравнением статических характеристик двигателя полученных в программе и экспериментально. Расчётная модель цилиндрического линейного вентильного двигателя с постоянными магнитами, представленная в главе 2, задана таким образом, что бы при изменении одного геометрического параметра цепи вся модель перестраивалась соответственно.

### **4.1. Исследование зависимости тягового усилия двигателя от параметров и геометрии магнитов**

Известно что, магнитные свойства редкоземельных постоянных магнитов характеризуются остаточной индукцией  $B_r$  и коэрцитивной силой  $H_c$ . Статические характеристики расчётной модели ЦЛВД с использованием магнитов разных марок представлены на рис. 4.1, данные по магнитам приведены в таблице 4.1. На рис. 4.1 положительные значения тягового усилия показаны для движения вторичного элемента по направлению коронки зубца, а отрицательные значения при движении против коронки зубца.

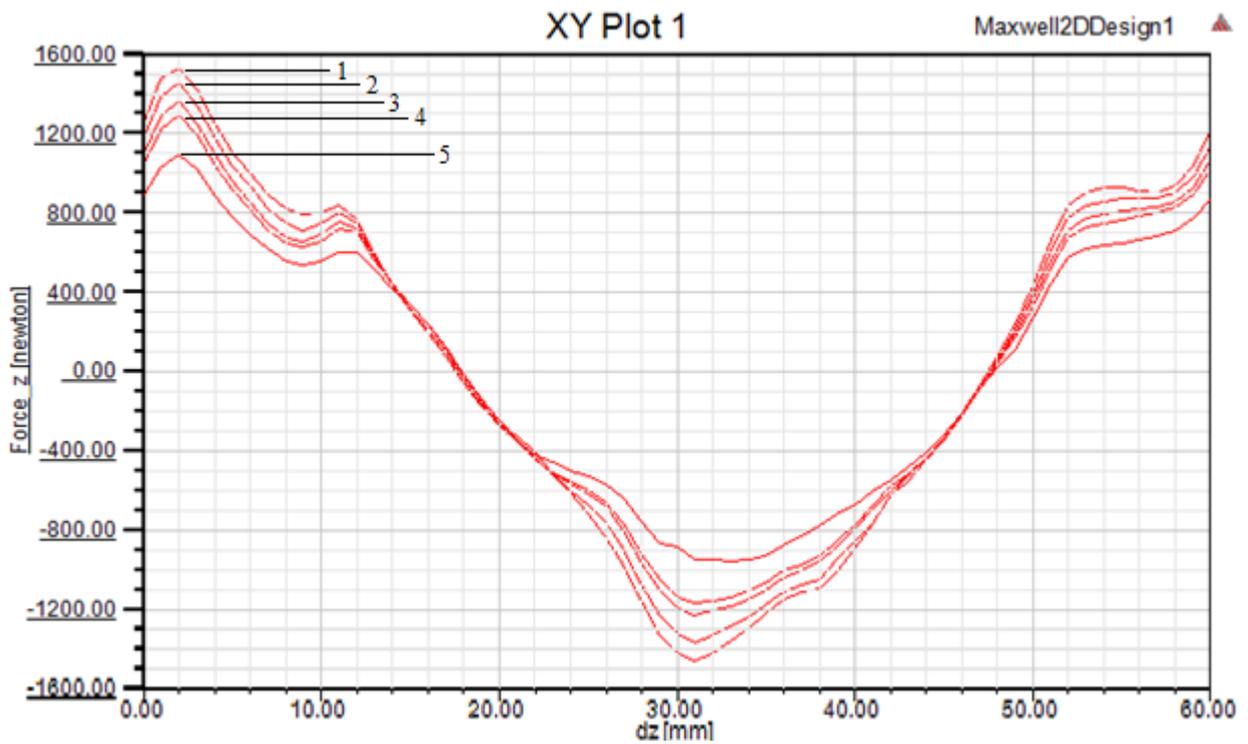


Рис.4.1 Статические характеристики двигателя с использованием магнитов разных марок.

Таблица 4.1

№		$B_r$ , Тл	$H_c$ , кА/м	$F_B$ , Н	$F_H$ , Н	$F_{BM}$ , Н	$F_{HM}$ , Н
1	Тульский завод постоянных магнитов	1.47	1138	1530	6120	1450	5800
2	ПОЗ-Прогресс г. Екатеринбург, Пышма	1.39	980	1460	5840	1380	5520
3	ОАО Магнетрон г. Владимир	1.26	900	1360	5440	1210	4840
4	ФГПУ СпецМагнит г. Москва	1.22	800	1300	5200	1150	4600
5	ПОЗ-Прогресс, г.Екатеринбург, Пышма	1	680	1100	4400	960	3840

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  $B_r$ .

Данное предположение доказывают многовариантные расчёты, в которых были взяты разные значения ширины, диаметра, остаточной индукции и коэрцитивной силы магнитов. Статические характеристики с разными значения ширины, диаметра, остаточной индукции и коэрцитивной силы магнитов представлены на рис. 4.2 – 4.5. Максимальные значения усилия расчётной модели ЦЛВД при данных вариациях представлены в таблицах 4.2 – 4.5.

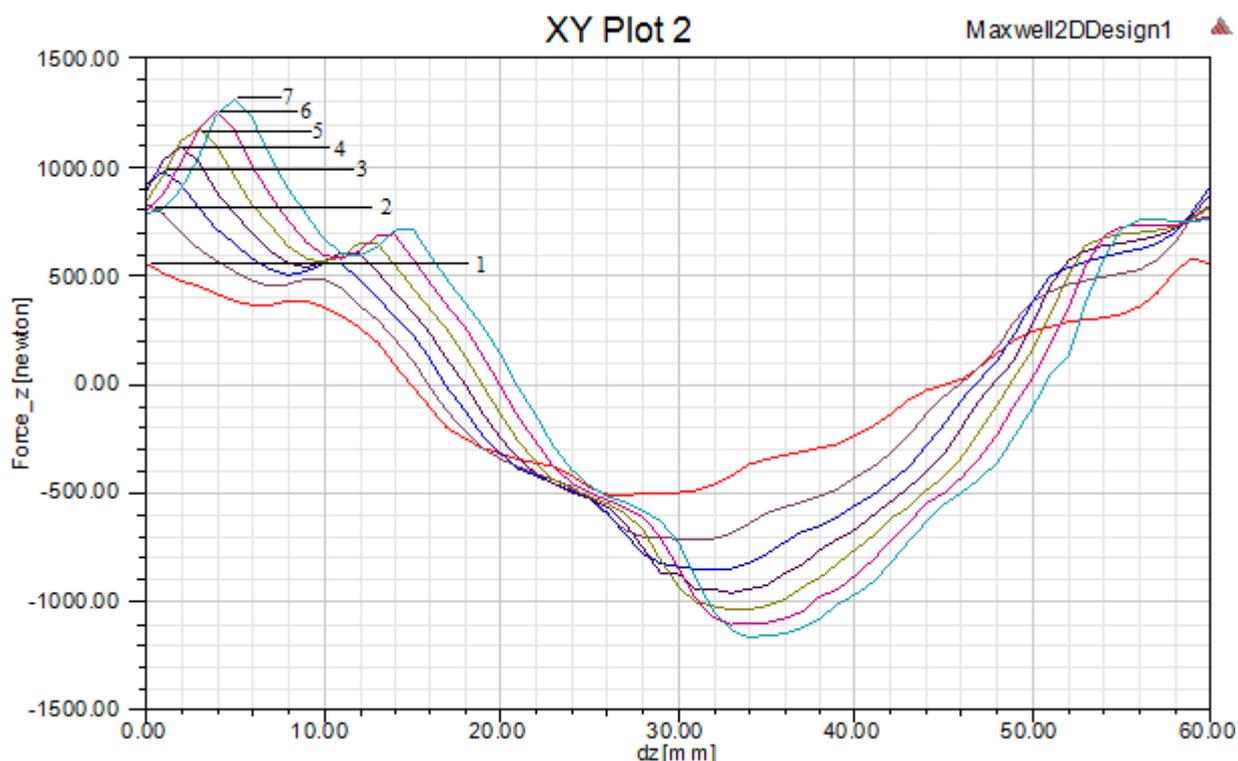


Рис. 4.2 Статические характеристики расчётной модели ЦЛВД при разном значении ширины магнита  $h_m$ .

Таблица 4.2

№	1	2	3	4	5	6	7
$h_m$ , мм	2	4	6	8	10	12	14
$F$ , Н	577	830	984	1096	1183	1255	1315

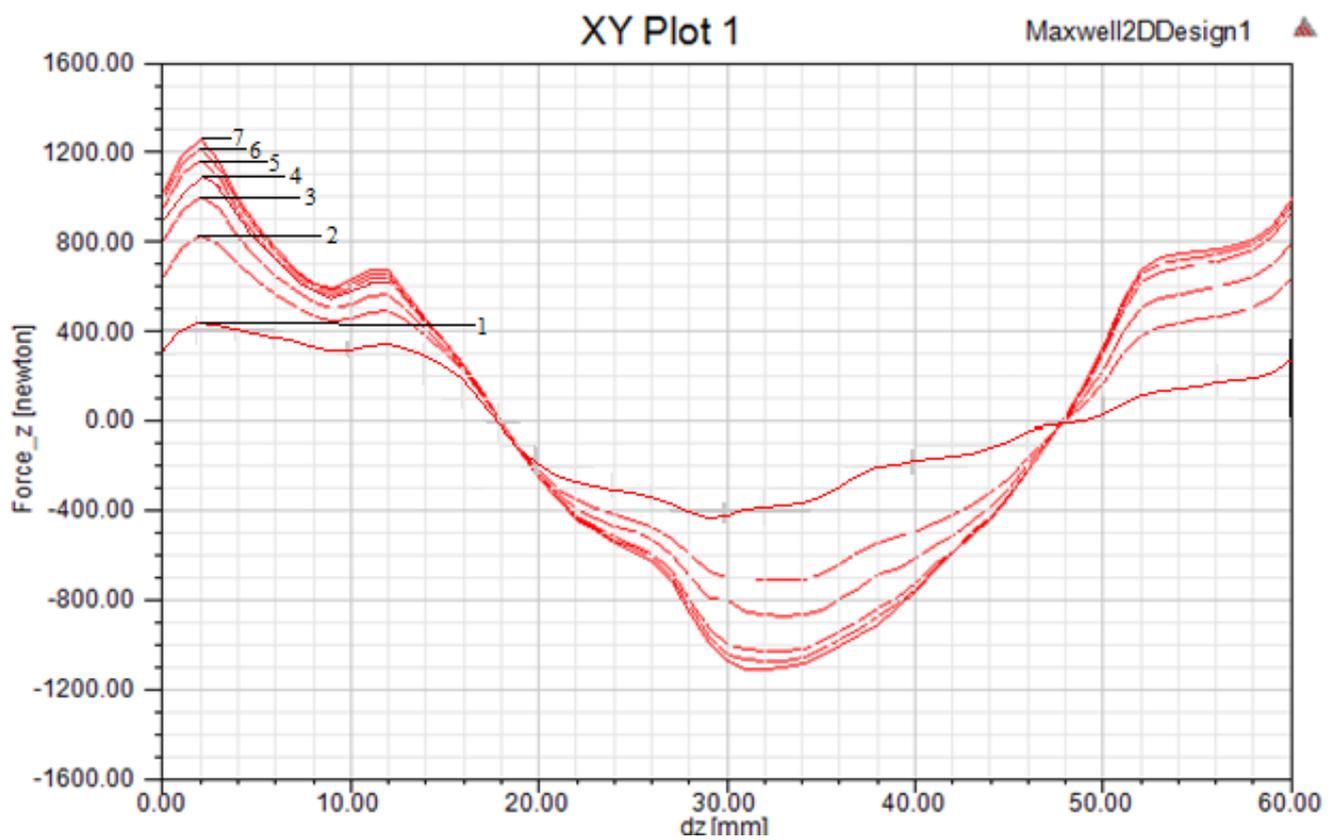


Рис. 4.3 Статические характеристики расчётной модели ЦЛВД при разном значении коэрцитивной силы  $H_c$ .

Таблица 4.3

№	1	2	3	4	5	6	7
$H_c$ , кА/м	100	300	500	680	900	1100	1300
$F$ , Н	441	830	1004	1097	1170	1218	1254

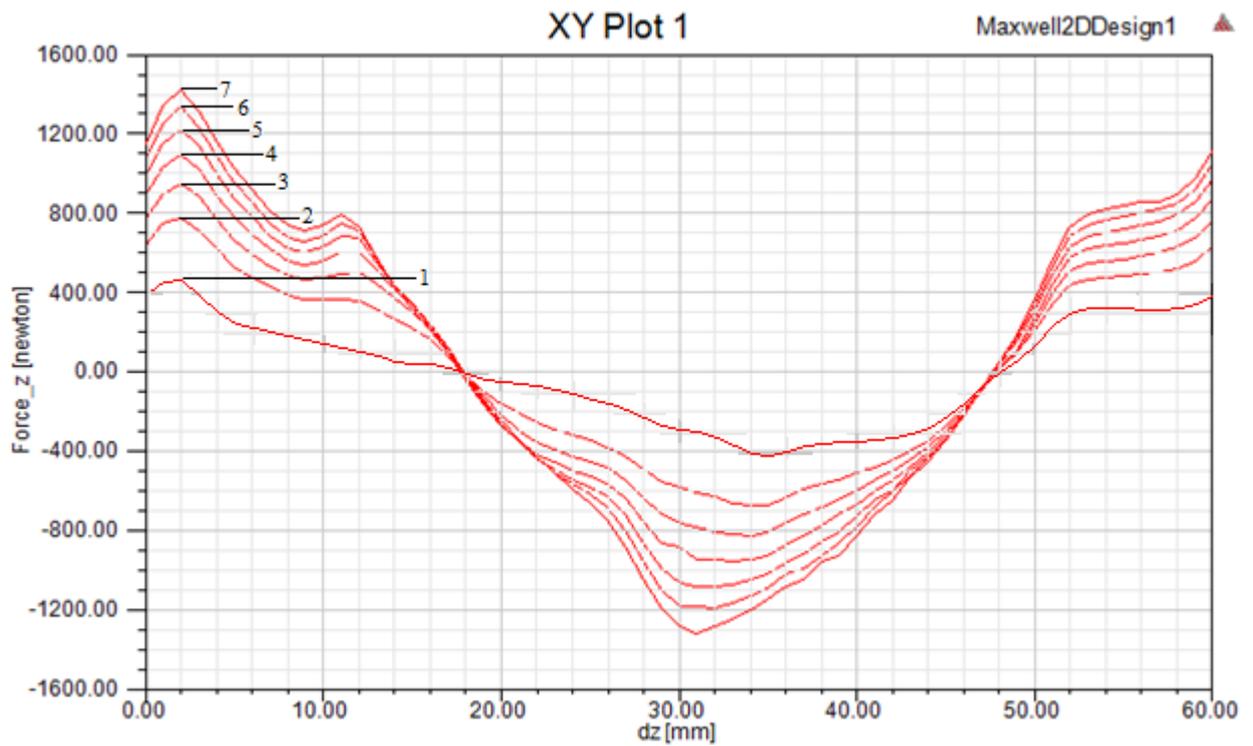


Рис. 4.4 Статические характеристики расчётной модели ЦЛВД при разном значении остаточной индукции  $B_r$ .

Таблица 4.4

№	1	2	3	4	5	6	7
$B_r$ , Тл	0.3	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6
$F$ , Н	467	779	949	1097	1225	1341	1423

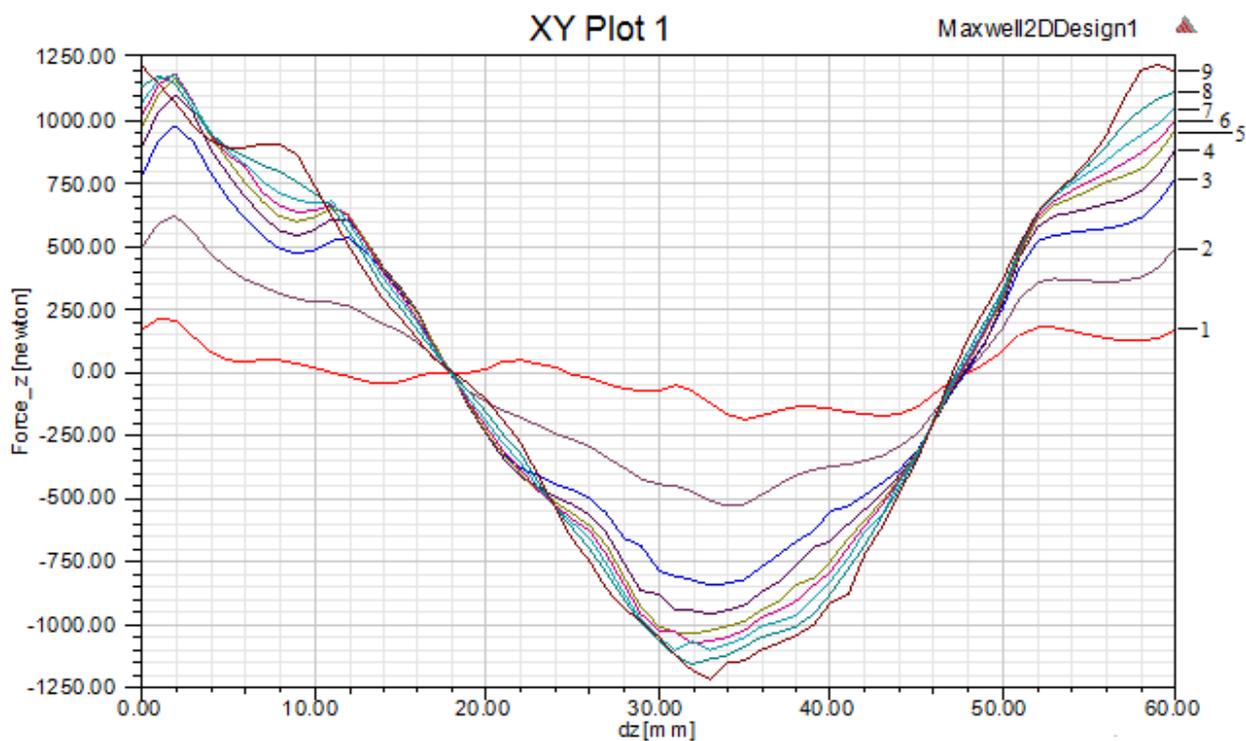


Рис. 4.5 Статические характеристики расчётной модели ЦЛВД при разном значении диаметра магнита  $D_m$ .

Таблица 4.5

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$D_m$ , мм	25	35	43	46	48	49	50	51	52
$F$ , Н	213	619	975	1096	1161	1180	1172	1174	1220

По данным таблиц 4.2-4.5 построены зависимости тягового усилия двигателя от: а) остаточной индукции, б) коэрцитивной силы, в) ширины магнита, г) диаметра магнита. Они представлены на рис.4.6.

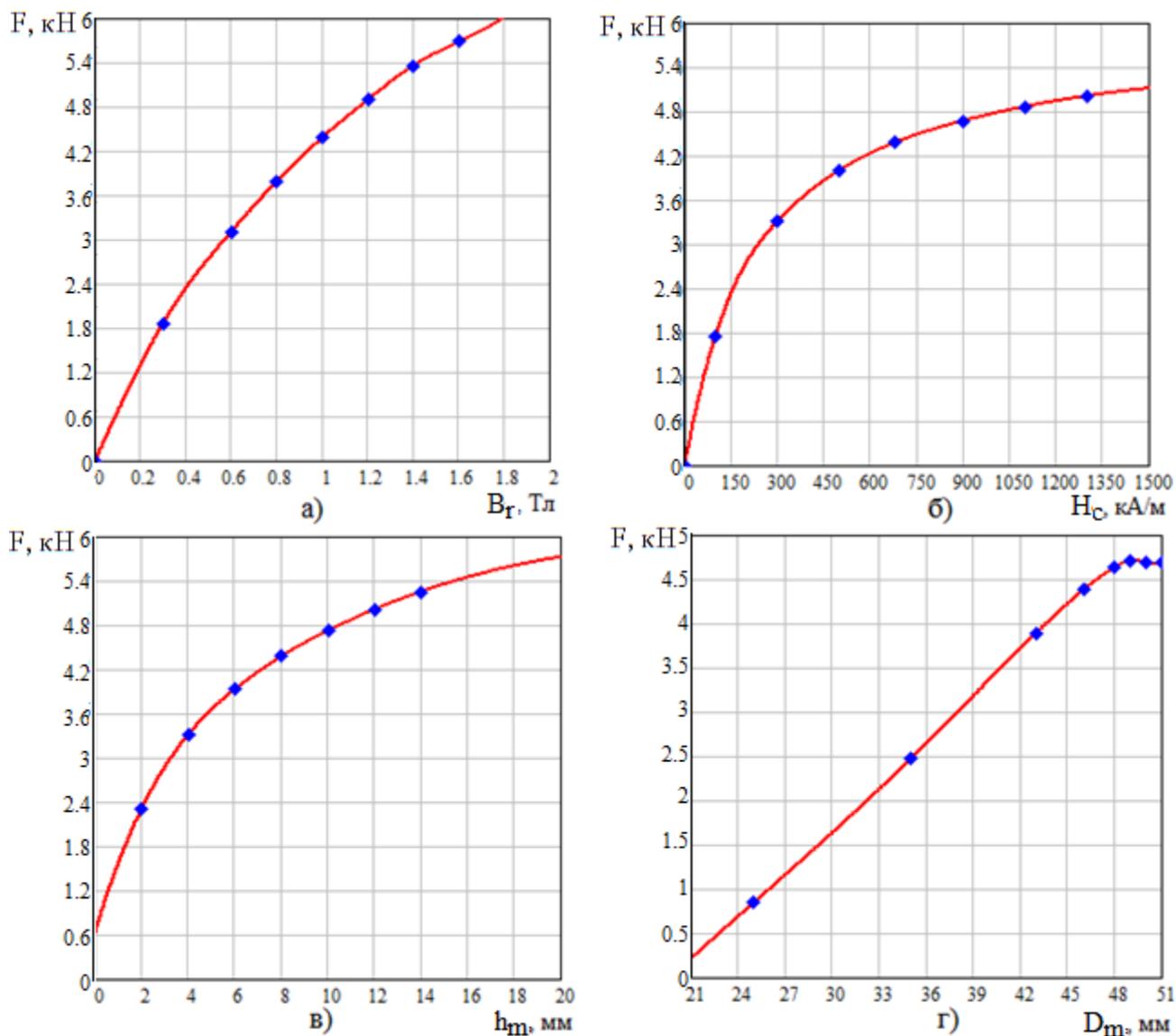


Рис. 4.6 Зависимости тягового усилия двигателя от: а) остаточной индукции, б) коэрцитивной силы, в) ширины магнита, г) диаметра магнита, полученные моделированием в Maxwell.

Как можно заметить, что наибольшее усилие достигается при наибольших значениях всех четырёх параметров, что не противоречит предположению, полученному ранее. На рис. 4.6 г) очень заметно влияние насыщения магнитной цепи. Дело в том, что зависимость усилия от диаметра магнита является квадратичной и изначальная величина диаметра магнита 46 мм взята близкой к насыщенной цепи. Насыщение магнитной цепи двигателя для магнитов диаметром 46 мм и 52 мм изображено на рис. 4.7.

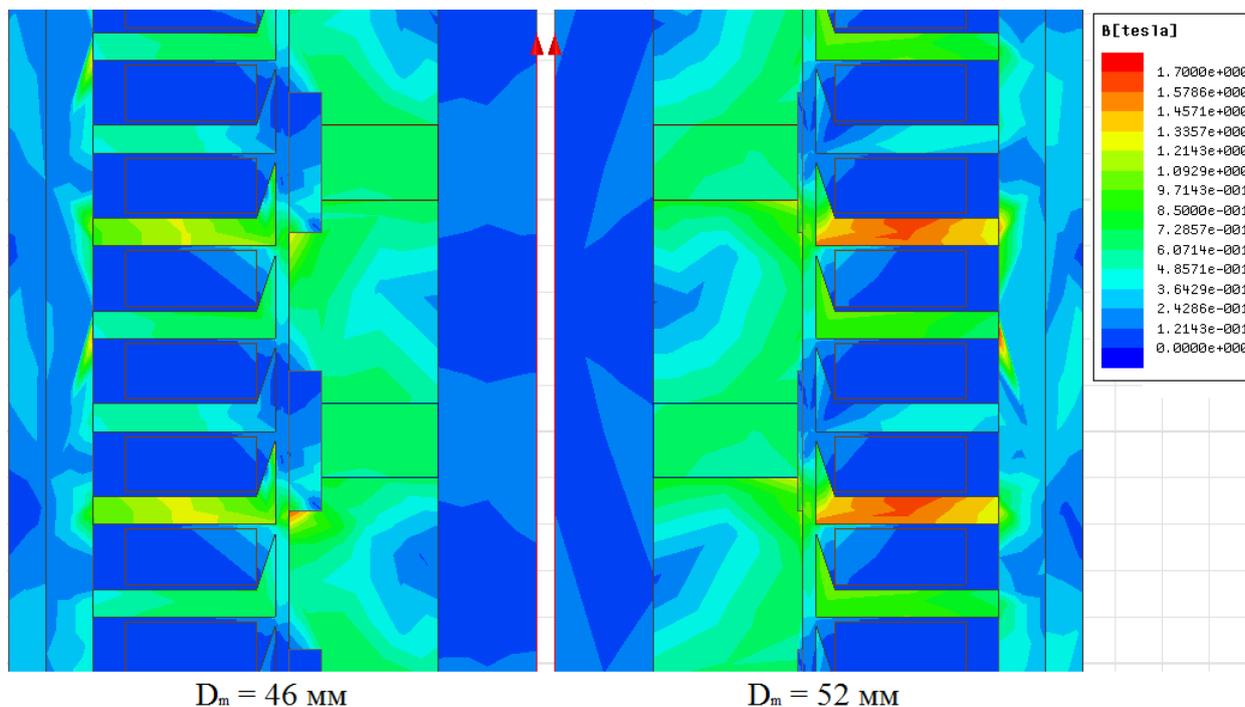


Рис. 4.7 Магнитная индукция в двигателе для положения вторичного элемента, соответствующего максимальному усилию.

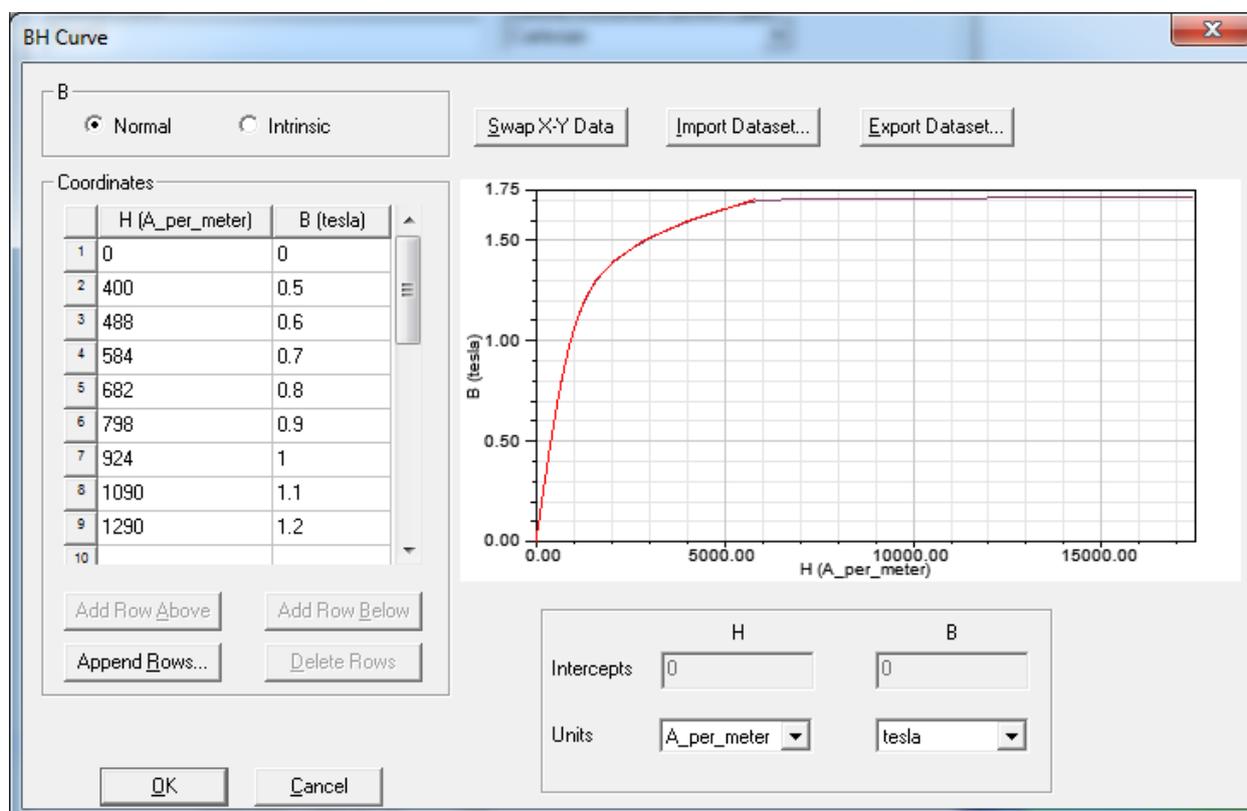


Рис. 4.8 Кривая намагничивания стали 3

Как видно из рис. 4.8, кривая намагничивания стали 3 имеет малый линейный участок и сталь уходит в насыщение уже с 1.3 Тл. Таким образом, насыщение магнитной цепи необходимо принимать во внимание при проведении многовариантных расчётов и проектировании двигателя. Согласно рис. 4.7 магнитная индукция в зубцах двигателя с диаметром магнитов 46 мм уже достигает границ рабочего диапазона кривой намагничивания, а в двигателе с диаметром магнитов 52 мм она явно выходит за пределы рабочего диапазона. Уменьшить насыщение в стали зубцов можно увеличив ширину зубца или используя материал с большей относительной магнитной проницаемостью.

Значение максимального тягового усилия двигателя при диаметре магнита 52 мм и зубцах имеющих характеристики электротехнической стали 1291, что соответствует продолжению прямой графика рис.4.6 г). Так как само по себе магнитное сопротивление ферромагнетиков составляет менее 2% от общего сопротивления магнитной цепи, то увеличение тягового усилия от замены материала зубцов незначительно. Однако при перенасыщении зубцов разница становится заметной, что значит - замена материала зубцов необходима для достижения наибольшего тягового усилия ЦЛВД при последующих изменениях направленных на увеличение усилия.

Ниже на рис. 4.9 представлены графики зависимости тягового усилия двигателя от: а) остаточной индукции, б) коэрцитивной силы, в) ширины магнита, г) диаметра магнита, полученные по разработанной расчётной методике с учётом насыщения магнитной цепи. Характер полученных зависимостей практически совпадает с зависимостями, полученными в ANSYS Maxwell magnetostatic. Однако важно не забывать, что ANSYS Maxwell magnetostatic не отображает реальное усилие двигателя и используется только для сравнительных многовариантных расчётов. А графики рис 4.9, полученные по разработанной методике, показывающей результаты наиболее близкие к ANSYS Maxwell transient и к реальности .

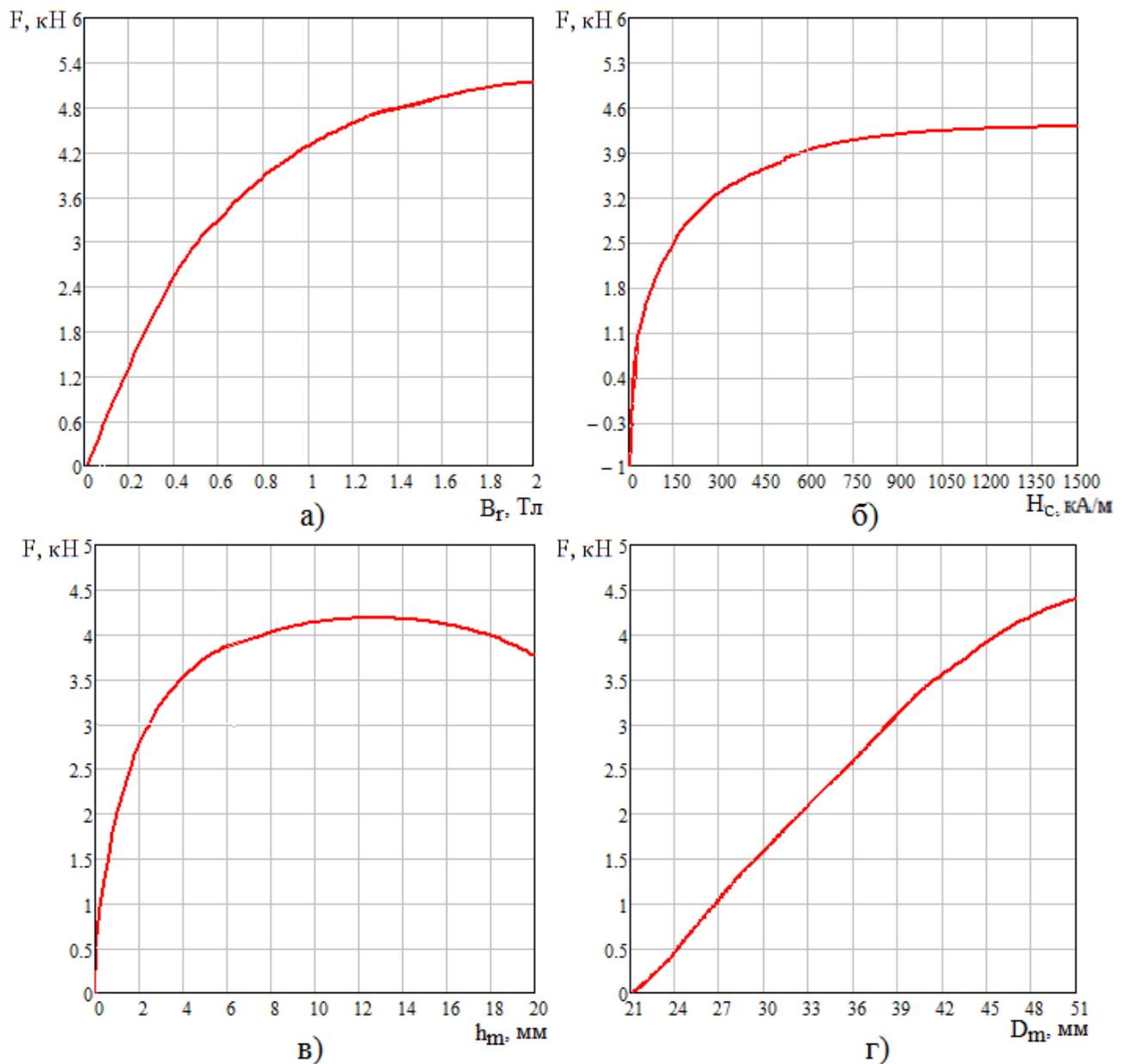


Рис. 4.9 Зависимости тягового усилия двигателя от: а) остаточной индукции, б) коэрцитивной силы, в) ширины магнита, г) диаметра магнита, полученные по расчётной методике.

#### 4.2 Исследование зависимости тягового усилия двигателя от коэффициента полюсного перекрытия, величины открытия паза и диаметра вторичного элемента

Расчётное значение коэффициента полюсного перекрытия находим как:

$$\alpha_p = b/\tau$$

где  $b$  – в случае линейного двигателя ширина полюса.

Увеличение  $b$  и  $\alpha_p$  с одной стороны уменьшает магнитное сопротивление вторичного элемента и увеличивает магнитный поток в зазоре, а с другой стороны уменьшается расстояние между соседними полюсами вторичного элемента и тем самым увеличивается его рассеяние. Увеличение рассеяния вторичного элемента приводит к уменьшению основного магнитного потока в зазоре, поэтому существует оптимальное  $\alpha_p$  при котором тяговое усилие максимально. На рис. 4.10 показаны статические характеристики расчётной модели ЦЛВД при разных значениях коэффициента полюсного деления  $\alpha_p$ , которые обозначены цифрами 1-7 согласно таблицы 4.6. В этой таблице представлены максимальные тяговые усилия расчётной модели ЦЛВД при различных  $\alpha_p$ . Прототип ЦЛВД, на котором проводились эксперименты имеет  $\alpha_p=0,5$  и тяговое усилие  $1096 \cdot 4=4384$  Н.

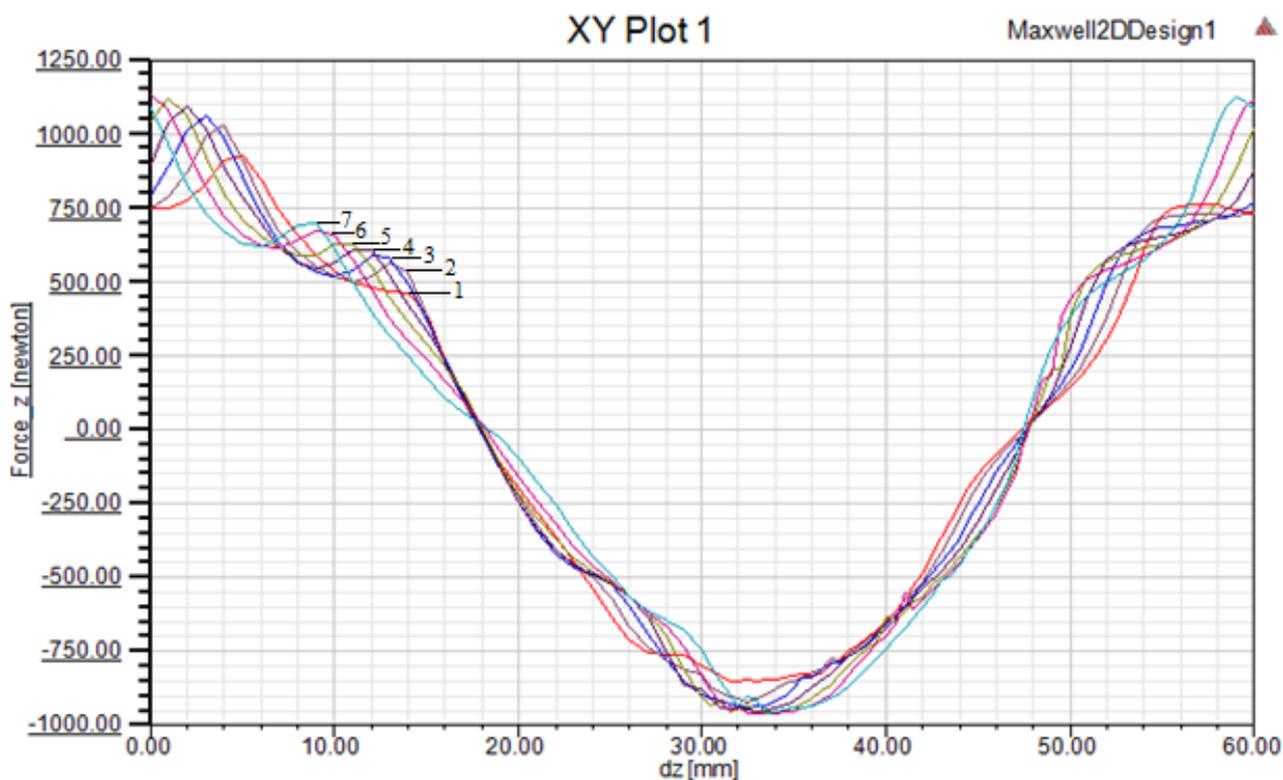


Рис.4.10 Статические характеристики расчётной модели ЦЛВД при разном значении расчётного коэффициента полюсного деления  $\alpha_p$ .

Таблица 4.6

№	1	2	3	4	5	6	7
$\alpha_p$ , о.е.	0.3	0.37	0.43	0.5	0.57	0.63	0.7
$F$ , Н	213	619	975	1096	1161	1180	1172

По данным таблицы 4.6 построен график зависимости тягового усилия двигателя от коэффициента полюсного перекрытия  $\alpha$  и представлен на рис.4.11 а). Анализ статических характеристик построенных при разном коэффициенте полюсного перекрытия показал, что максимальное усилие достигается при коэффициенте 0.65. График полученный по разработанной методике также показывает максимум при коэффициенте равном 0,65.

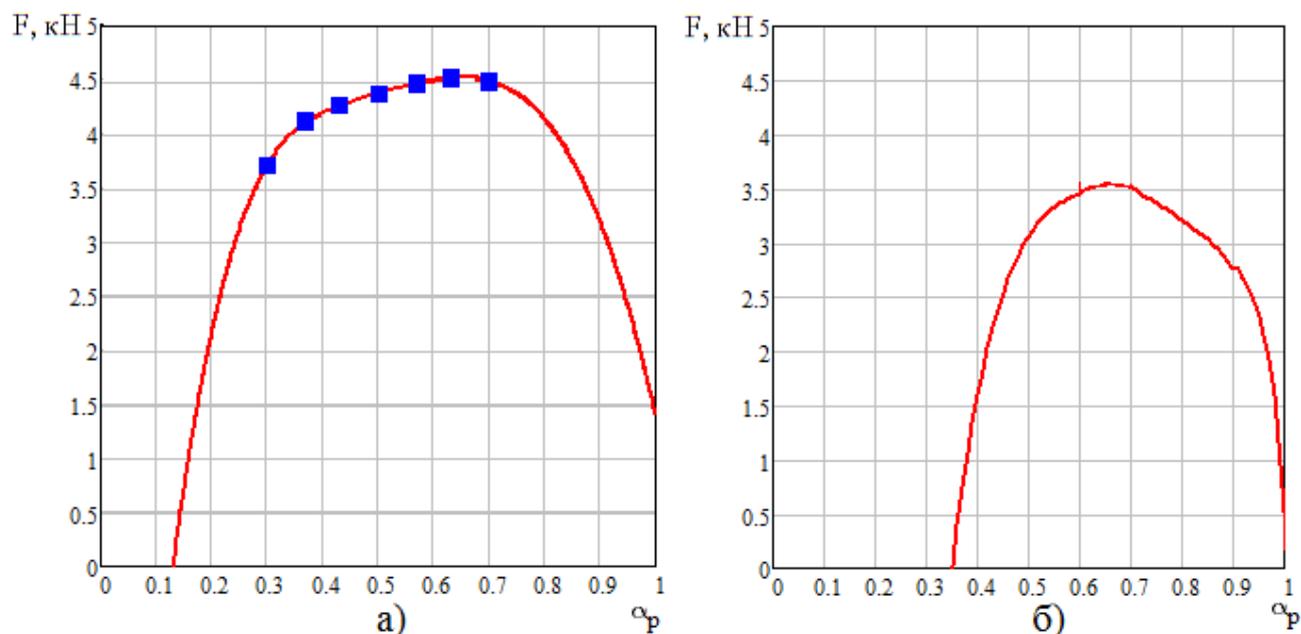


Рис. 4.11 Зависимость тягового усилия двигателя от коэффициента полюсного перекрытия  $\alpha_p$ , полученная :а) в Maxwell; б) по разработанной методике.

Статические характеристики расчётной модели ЦЛВД при разных значениях открытия паза представлены на рис.4.12 . Максимальные значение усилия при разных значениях открытия паза представлены в таблице 4.7.

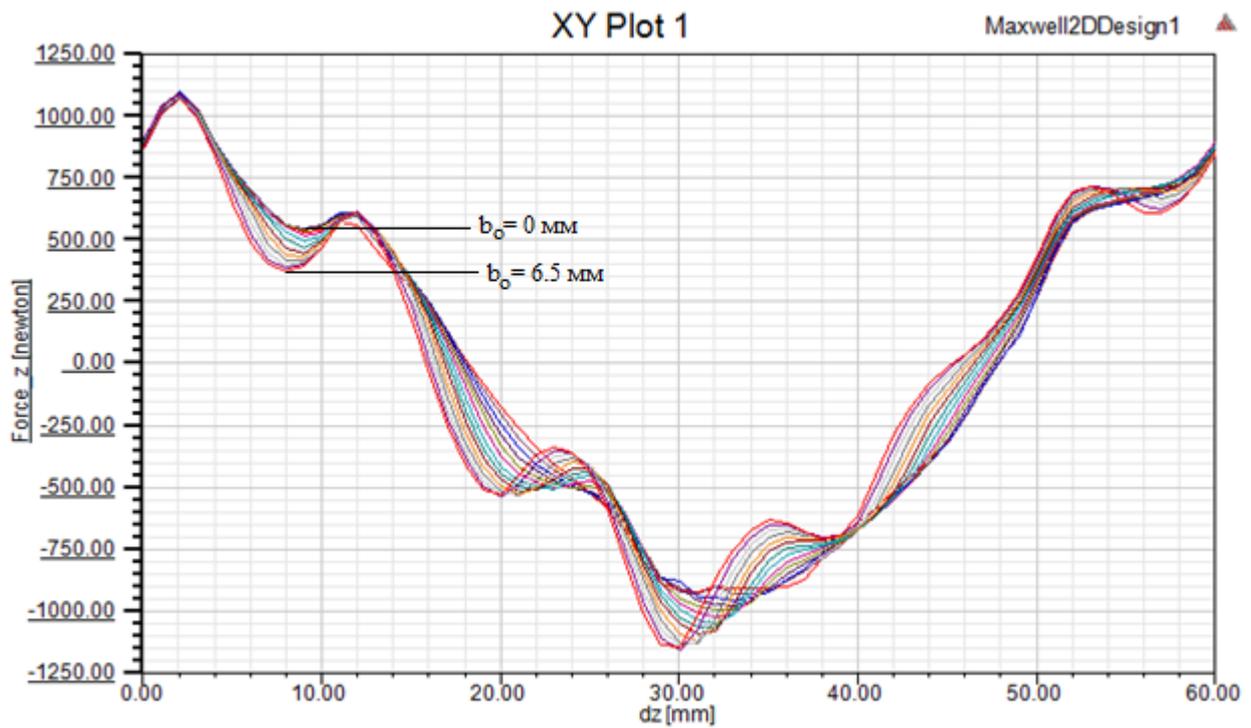


Рис.4.12 Статические характеристики расчётной модели ЦЛВД при разном значении открытия паза  $b_0$ .

Таблица 4.7

$b_0$ , мм	0	0.5	1	2	3	4	5	6	6.5
$F$ , Н	1079	1088	1096	1086	1075	1067	1069	1066	1066

Согласно таблице 4.7. при треугольной форме зубца и постоянстве ширины коронки зубца открытие паза практически не влияет на тяговое усилие двигателя в направлении коронки зубцов, а увеличение открытия паза увеличивает тяговое усилие против направления коронки зубцов. Это означает, что производство ЦЛВД с открытым пазом потерь тягового усилия за собой не повлечёт. Открытый паз позволит делать статорные чашки двигателя из шихтованной электротехнической стали и сильно упростит технологию изготовления двигателя.

С ростом диаметра вторичного элемента при постоянстве диаметра штока и величины воздушного зазора тяговое усилие двигателя увеличится. Объясняется это двумя следствиями:

С ростом диаметра вторичного элемента без роста диаметра штока увеличивается поперечное сечение магнита и уменьшается его магнитное сопротивление, что приводит к увеличению магнитного потока в воздушном зазоре и как следствие к увеличению усилия;

С ростом диаметра вторичного элемента увеличивается и цилиндрическое сечение воздушного зазора и уменьшается его магнитное сопротивление, что также приводит к увеличению магнитного потока в воздушном зазоре и тягового усилия.

Таким образом, увеличение диаметра вторичного элемента приводит к уменьшению общего сопротивления магнитной цепи и увеличению магнитного потока в воздушном зазоре, что в свою очередь увеличивает тяговое усилие.

На рис. 4.13 приведено сравнение статических характеристик ЦЛВД с диаметром вторичного элемента 53 мм (текущая конструкция) и диаметром вторичного элемента 57 мм. Для диаметра 57 мм приведено два случая: с базовым диаметром магнита в 46 мм и с увеличенным диаметра магнита в 50 мм.

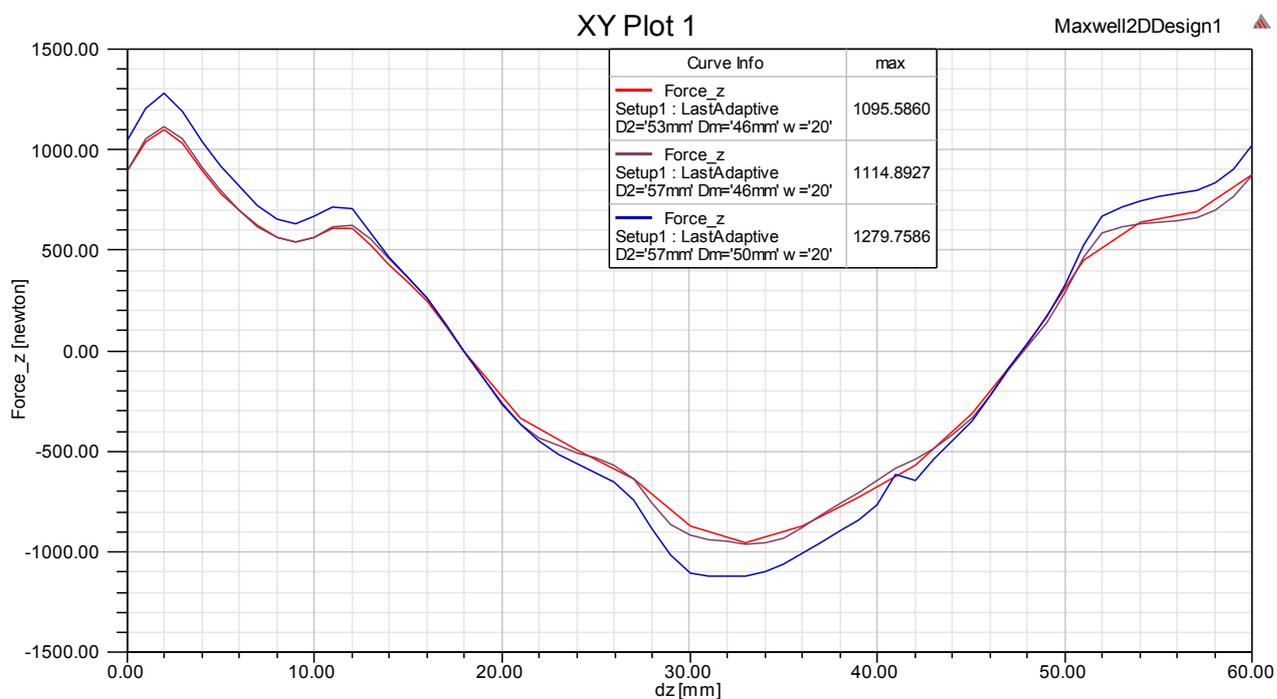


Рис. 4.13 Статические характеристики ЦЛВД при повышенном диаметре вторичного элемента.

По характеристикам видно, что влияние увеличения диаметра слайдера без увеличения диаметра магнита не значительно. Связанно это с тем, что площадь сечения воздушного зазора увеличивается пропорционально диаметру, т.е. площадь увеличилась в  $57/53=1.075$  раз. Сопротивление зазора уменьшилось в 1.075 раз соответственно, т.е. всего на 7 %. А потому что собственное сопротивление магнита на порядок выше сопротивления воздушного зазора, эффект от уменьшения сопротивления зазора на 7% минимальный и максимальное тяговое усилие увеличивается всего на 1,8%.

Однако, если вместе с диаметром вторичного элемента увеличить диаметр магнита на 4 мм, то усилие увеличится в 1.168 раза т.е. на 16.8%.

Дальнейшее увеличение диаметра вторичного элемента возможно только при уменьшении размера паза и сокращении количества витков в пазу. На рис.4.14 показаны статические характеристики ЦЛВД при разном диаметре вторичного элемента и числе витков в пазу.

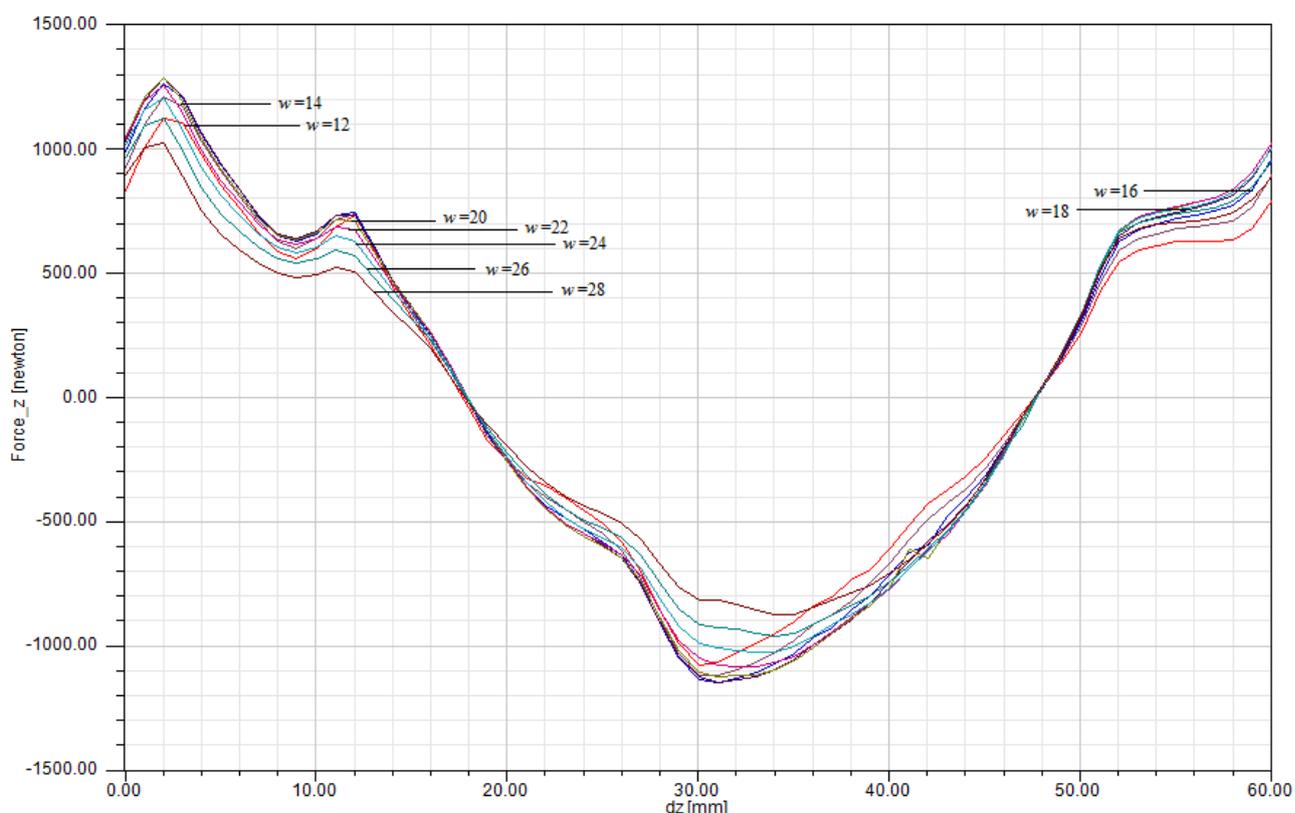


Рис.4.14 Статические характеристики ЦЛВД при разном размере паза, выраженном числом витков.

Таблица 4.8

$w$	12	14	16	18	20	22	24	26	28
$F, Н$	1117	1204	1257	1283	1280	1253	1202	1120	1018

График по данным таблицы 4.8 показан на рис. 4.15. Проанализировав график рис. 4.15 можно сделать вывод, что число витков в пазу равное 18 позволяет развить такое же тяговое усилие как 20, при номинальном токе в 30 А и сечением обмоточного провода 3 мм<sup>2</sup>. График, полученный по разработанной методике показывает схожий результат.

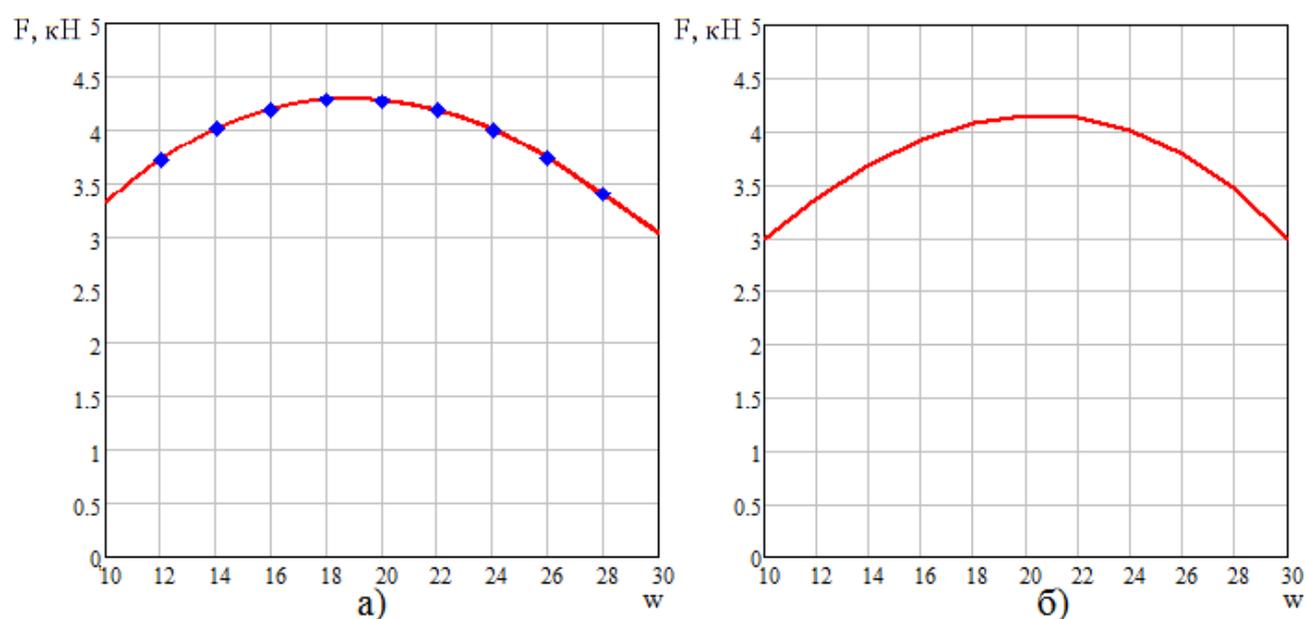


Рис. 4.15 График зависимости тягового усилия ЦЛВД от размера паза, выраженного числом витков полученный :а) в Maxwell; б) по разработанной методике.

Нельзя не заметить, что данное усовершенствование требует значительного увеличения объёма редкоземельных магнитов, что повысит стоимость двигателя. Однако, при повышении максимальной глубины добычи, увеличение стоимости двигателя является приемлемым. Для не глубоких низко- и среднедебитных скважин значительное повышение максимального тягового усилия позволит уменьшить длину погружного двигателя, что компенсирует собой повышение стоимости оборудования.

### 4.3 Рационализированная конструкция ЦЛВД

Используя все полученные данные, была создана и рассчитана новая рационализированная конструкция двигателя с открытым пазом, зубцами из шихтованной электротехнической стали и магнитами №1, №3 и №5 таблицы 4.1. Получившаяся конструкция ЦЛВД представлена на рис. 4.16. Статическая характеристика тягового усилия этой конструкции ЦЛВД с магнитами разных марок представлена на рис. 4.17.



Рис. 4.16 Получившаяся конструкция ЦЛВД.

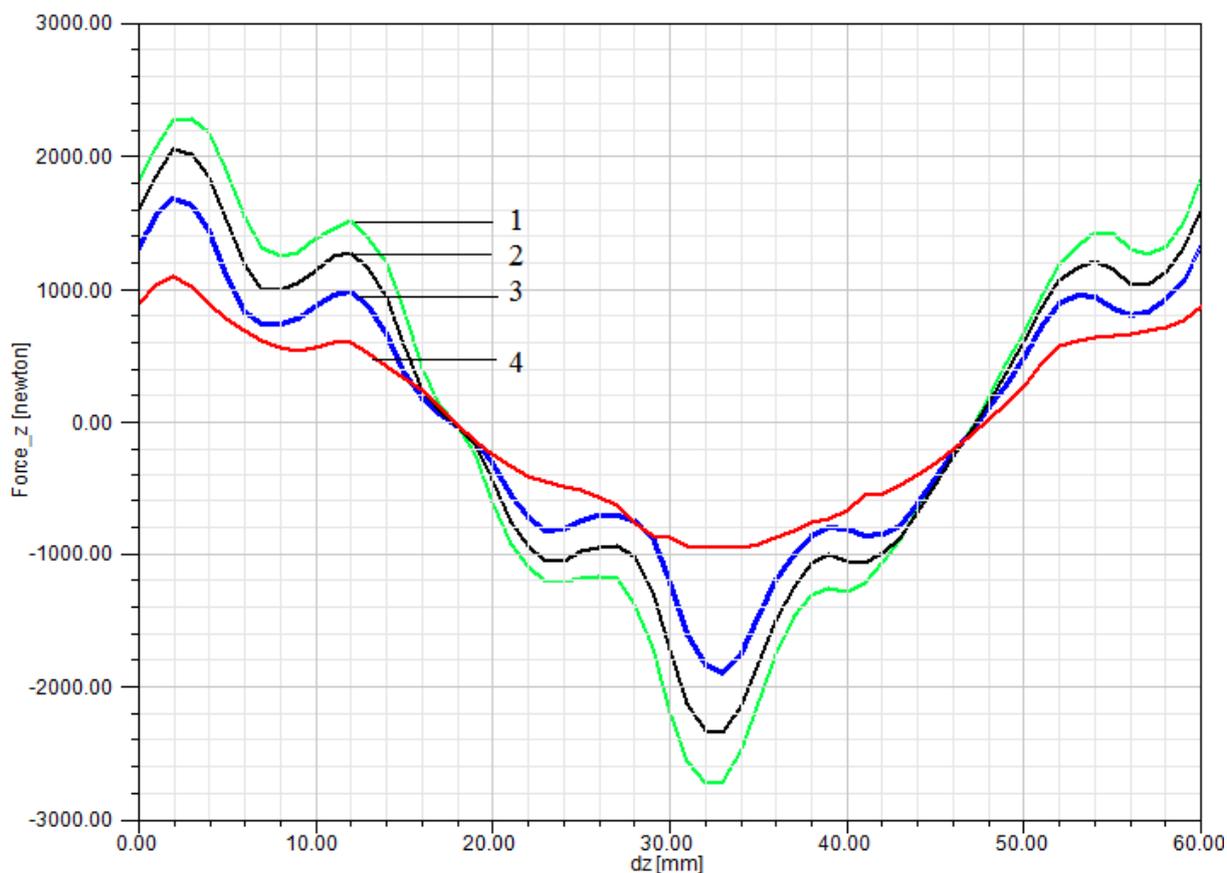


Рис.4.17 Статические характеристики оригинального и рационализированных ЦЛВД с магнитами разных марок.

Сравнение оригинальной конструкции ЦЛВД с рационализированной

№	Конструкция ЦЛВД	Характеристики магнитов		F <sub>B</sub> , Н	F <sub>H</sub> , Н	F <sub>BM</sub> , Н	F <sub>HM</sub> , Н	КПД при f=7 Гц, %
		B <sub>r</sub> , Тл	H <sub>b</sub> , 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

Максимальное тяговое усилие существующей конструкции ЦЛВД, рассчитанное в ANSYS Maxwell magnetostatic составляет 4400 Н. Максимальное тяговое усилие, развиваемое рационализированной конструкцией двигателя с существующими магнитами №5 из таблицы 1, составляет 1685 Н или 6740 Н/м, что в 1.53 раза больше усилия текущей конструкции. Это уже позволит создать погружной двигатель для добычи нефти на глубине более 3-х км приемлемой длины. При этом усилие двигателя в обратном направлении увеличилось в 1.96 раза. Так как машина в этот раз абсолютно симметрична, а токи неподвижны, объяснением этому может быть только погрешность расчёта усилия в magnetostatic. Если использовать магниты № 3 из таблицы 4.1, то максимальное тяговое усилие можно увеличить в 1.86 раза до значения в 8210 Н/м, а если магниты №1, то в 2,08 раза до значения 9140 Н/м. С увеличением усилия увеличивается и КПД двигателя (таб. 4.9). Так КПД ЦЛВД на частоте 7 Гц, в результате рационализации конструкции, может достичь значения в 51%. При этом в данной конструкции двигателя зубцы сделаны из шихтованной электротехнической стали, благодаря чему он может работать на большей частоте, при ещё большем КПД рабочего хода. Так же важно отметить, что несмотря на возможность повышения действующего значения тока в обмотках

двигателя до 31.6 А представленные характеристики рассчитаны на ток в 30 А, что бы не увеличивать потери в кабеле питания. Конструкция развивающая 9140 Н на метр длины двигателя содержит в себе неодимовые магниты с рабочей температурой 80 градусов цельсия, что не позволит использовать его 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 из таблицы с удельным тяговым усилием 8210 Н/м, в конструкции 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. Чертежи получившейся конструкции ЦЛВД приведены в приложении В.

#### **4.4. Экономическая оценка изменения конструкции ЦЛВД**

Нельзя не отметить, что представленные изменения двигателя увеличат объём магнитов в 2.12 раза, а объём слайдера на 15%. Эти замечания ставят под сомнение технико-экономическую рациональность предложенной конструкции двигателя. Однако, при повышении максимально возможной глубины добычи, увеличение стоимости двигателя является приемлемым. Когда для не глубоких (до 2-х км) низко- и среднедебитных скважин значительное повышение максимального тягового усилия позволит уменьшить длину погружного двигателя, что компенсирует собой повышение стоимости оборудования, а значительное повышение КПД двигателя сильно сократит затраты на его эксплуатацию.

Наиболее важным является то, что на основе данной конструкции можно создать двигатель длиной 8 метров, с которым можно будет вести добычу на сверхглубоких скважинах, что превышает поставленные ожидания и возможности существующих ПБНА и открывает новые возможности для нефтедобывающей промышленности.

Далее приведено сравнение себестоимости двигателя старой конструкции и новой на примере себестоимости изготовления двух полюсных делений двигателя. Сравнение идёт по затратам на покупку исходного материала.

Из-за уменьшения числа витков обмотки количество обмоточного провода в двигателе сократится примерно на 8,5%.

Изготовление одной чашки магнитопровода из стали 3 в массовом производстве обойдётся примерно в 70 руб, когда из шихтованной стали 1212 примерно 25 руб. Причина в том, что чашки старой конструкции вытачиваются из цельного круга и большая часть материала становится отходами производства, а сама выточка чашек является весьма трудоёмкая. Штамповка же в свою очередь позволяет значительно сократить расход материала и труда, благодаря чему стоимость значительно сокращается, несмотря на то, что сама сталь 1212 почти в 2 раза дороже стали 3.

Стоимость двух немагнитных вставок старой конструкции составляет примерно 6 р, новой же примерно 4.5 р. Кольца изготавливаются из труб, поэтому отходы производства минимальны и разница сопоставима с разницей в объёме металла.

Стоимость двух полюсов старой конструкции составит 22 р. , новой - 22.5 р.

Единственным значимым пунктом повышения стоимости двигателя является замена магнитов. Стоимость магнитов первоначальной конструкции составляет 1405 р. за штуку, т.е. 2810 р. на одну пару полюсов. стоимость же новых магнитов составляет 4104 р за штуку, т.е. 8208 р. на одну пару полюсов.

Шток и корпусная труба остаются без изменений и их стоимость не меняется и остаётся для пары полюсов 4 р. и 50 р. соответственно.

В таблице 4.10 представлены денежные затраты на производство одной пары полюсов ЦЛВД.

Таблица 4.10

Деталь	Стоимость для старой конструкции, р.	Стоимость для новой конструкции, р.
Корпус	50	50
Обмотка статора	1460	1330
Чашки статора 6 шт.	420	150
Полюса вторичного элемента 2 шт.	22	22,5
Магниты 2 шт.	2810	8208
Защитные кольца 2 шт.	6	4.5
Шток	4	4
Сумма затрат на пару полюсов	4772	9769

Как видно стоимость одной пары полюсов ЦЛВД увеличилась в 2,04 раза, когда при этом его усилие выросло только в 1,86 раза. Однако у новой конструкции двигателя также выше КПД на 15 % и при тех же частотах работы двигателя новая конструкция будет тратить в 1,455 раза меньше электроэнергии. Что при глубине 2000 м, частоте работы двигателя 7 Гц и плунжерном насосе диаметром 32 мм будет потреблять на 6.24 кВт меньше. Что бы развить такое усилие потребуется 78 пар полюсов двигателя старой конструкции и 40 новой. При длине хода плунжера 1.2 м равному 10 парам полюсов. Себестоимость материалов двигателя старой модели равняется 400.636 р, новой - 473.150 р. Добавив стандартную наценку производителя в 100% получим разницу 145.028 р. Таким образом, при цене электроэнергии 4 р/(кВт\*ч) разница стоимости двигателей окупится за 243 суток, когда минимальный межремонтный период работы таких насосов равняется 365 суток, что означает данное изменение конструкции двигателя не только позволит работать на большей глубине, но и является рентабельным. Данный экономический расчёт приведён для рабочих частот существующей конструкции двигателя, когда новая конструкция позволяет работать на больших частотах, большей глубине, с большим КПД и большим дебитом, что делает новую конструкцию намного более выгодной.

#### 4.4 Выводы по главе 4

1. Тяговое усилие ЦЛВД принимает наибольшее значение при наибольших значениях остаточной магнитной индукции и коэрцитивной силы магнитов и максимальных размерах магнитов. Больше всего на тяговое усилие влияют остаточная магнитная индукция и диаметр магнита.

2. Расчётный коэффициент полюсного деления, при котором достигается максимальное тяговое усилие, равен 0.63.

Максимальное тяговое усилие двигателя, развиваемое по направлению коронки зубцов, не меняется с изменением открытия паза. При открытом пазу статическая характеристика ЦЛВД становится симметричной. Таким образом ЦЛВД можно производить с открытым пазом потерь тягового усилия. Открытый паз позволит делать статорные чашки двигателя из шихтованной электротехнической стали и сильно упростит технологию изготовления двигателя.

Число витков в пазу равное 18 позволяет развить наибольшее тяговое усилие при номинальном токе в 30 А. С 18 витками в пазу номинальный ток ориентировочно можно увеличить до 31.6 А что ещё больше увеличит тяговое усилие.

3. Таким образом, в результате рационализации тяговое усилие ЦЛВД возможно увеличить в 1,86 раза, что позволит сделать двигатель длиной 8 метров, с которым можно будет вести добычу на сверхглубоких скважинах.

4. Рационализированная конструкция ЦЛВД хоть и значительно дороже в изготовлении чем существующая, но так как разница в стоимости готовой продукции окупается по затратам на электроэнергию уже за 8 месяцев, приобретение двигателя данной конструкции является выгодным. А значит и его производство будет востребованным.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 разработана математическую 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.

Таким образом, цели исследования можно считать достигнутыми, а задачи выполненными.

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.

## Список используемой литературы

1. Абдулин, Ф.С. Добыча нефти и газа / Ф.С. Абдулин. - М.: Недра, 1983. - 256 с.
2. Адонин, А.Н. Добыча нефти штанговыми насосами / А.Н. Адонин. - М.: Недра, 1979. - 425 с.
3. Адонин, А.Н. Процессы глубиннонасосной добычи нефти / А.Н. Адонин. - М.: Недра, 1964. - 263 с.
4. Добыча нефти штанговыми насосами / А. К. Мухаметзянов, И. Н. Чернышов, А.И. Липерт, С.Б. Ишемгужин. - М.: Недра, 1993. - 352 с.
5. Нефть новой России. Ситуация, проблемы, перспективы / Общ. ред. В. Ю. Александров, Российская академия естественных наук (РАЕН). - М.: Древлехраиилище, 2007. - 688 с.
6. Бурмакин, А.М. Низкоскоростной дугостаторный асинхронный двигатель для станков-качалок малодебитных нефтяных скважин: дис.... канд.техн. наук: 05.09.01 / Бурмакин Артём Михайлович. - Екатеринбург, 2011. - 166 с.: ил.
7. Семенов, В.В. Специальные асинхронные электрические двигатели для нефтедобычи: монография / В.В. Семенов, Е.М. Огарков, А.Д. Коротаев. - Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2014. – 286 с.
8. Основные решения магнитофугального привода для ударно-вращательного бурения: техн. отчет / Л.Н. Штурман; Нефтемашпроект. – М., 1939.
9. Штурман, Л.Н. Гидроэлектрический бесштанговый погружной насос / Л.Н. Штурман // Нефтяное хозяйство. – 1946. - № 9. - С. 10-17.
10. Аракелян, А. К. Вентильный электропривод с синхронным двигателем и зависимым инвертором / А.К. Аракелян, А.А. Афанасьев, М. Г. Чиликин. - М.: Энергия, 1977. - 224 с.
11. Локшин, Л.И. Глубинный плунжерный насос с цилиндрическим индукторным двигателем / Л.И. Локшин, В.В. Семенов // Электропривод с линейными электродвигателями : Труды всесоюзной научной конференции. – Киев: 1976. - С. 39-43. – 2 т.
12. Линейные электродвигатели погружного исполнения для привода глубинных плунжерных насосов / Л.И. Локшин, В.В. Семенов, А.Н. Сюр, Г.А. Чазов // Тезисы докладов Уральской конференции по магнитной гидродинамике. – Пермь, 1974.
13. Линейные погружные электронасосы / Л.И. Локшин, В.В. Семенов и др. // Тезисы докладов Уральской конференции по магнитной гидродинамике. – Пермь, 1974.
14. Семенов, В.В. Линейный асинхронный двигатель плунжерного насоса с вторичным элементом, совмещающим функцию рабочего тела и управления //

- автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. (05.09.01) / Семенов Виталий Вадимович. - Свердловск, 1982. - 18 с.
15. Семенов, В.В. Основные тенденции в построении систем управления линейным двигателем привода глубинных насосов / В.В. Семенов // Сб. науч. тр. УПИ, - Свердловск, 1977, С. 47-53.
16. Локшин, Л.И. К вопросу создания бесштангового насоса с линейным электроприводом / Л.И. Локшин, А.Н. Сюр, Г.А. Чазов // Машины и нефтяное оборудование. – М.: 1979. - №12.
17. Семенов, В.В. Перспективы эффективного использования глубинно-насосного бесштангового поршневого агрегата с линейным двигателем / В.В. Семенов, Г.А. Чазов // Геология, разработка, бурение и эксплуатация нефтяных месторождений Пермского Приуралья: сб. науч.тр. / ПермНИПИнефть. – М., 1978. – С. 90–95.
18. Локшин, Л.И. Электромагнитные соотношения в линейном цилиндрическом двигателе погружного типа: «Специальная электрическая машина и системы электропривода» / Л.И. Локшин // сб. науч. тр. – Пермь, 1976. - № 194. - С. 212-222.
19. Локшин, Л.И. Расчет радиальной силы в линейных цилиндрических двигателях: «Специальные электрические машины и системы электропривода» / Л.И. Локшин, В.А. Леванов // Сборник научных трудов. - Пермь, 1976. - № 194. - С. 55-62
20. Локшин, Л.И. Электромагнитные процессы в линейной цилиндрической многополюсной машине / Л.И. Локшин, М.Г. Резин// Уральская конференция по применению магнитной гидродинамики в металлургии: материалы конф. - Пермь, 1974. - № 2.
21. Семенов, В.В. Система управления скважинным насосом с погружным линейным электродвигателем / В.В. Семенов, Л.И. Локшин. // Геология, разработка и эксплуатация нефтяных месторождений Пермского Приуралья: сб. статей. – М., 1975. - № 13
22. Семенов, В.В. Регулирование процессе разработки залежи с использованием линейного двигателя плунжерного насоса / В.В. Семенов, Г.А. Чазов; ПермНИПИнефть // Особенности геологии и разработки нефтяных месторождений Пермского Приуралья: сб. науч. тр.. – М.: ИГ и РГИ, 1981. – С. 107-110
23. Семенов, В. В. Цилиндрические линейные асинхронные двигатели для привода погружных плунжерных насосов: Дис.... канд. техн. наук: 05.09.01 / Семенов Виталий Вадимович, Ур. федер. ун-т имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. - Екатеринбург, 1982. - 329 с.: ил.

24. Веселовский, О.Н. Линейные асинхронные двигатели / О.Н. Веселовский, А.Ю. Коняев, Ф.Н. Сарапулов. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
25. Ижеля, Г.И. Линейные асинхронные двигатели / Г.И. Ижеля, С.А. Ребров, А.Г. Шаповаленко. – Киев: Техника, 1975. – 135 с.
26. Ижеля, Г.И. Создание линейных электродвигателей, перспективы внедрения в народное хозяйство и их экономическая эффективность / Г.И. Ижеля, В.И. Шевченко // Электропривод с линейными электродвигателями: сб. науч. тр. всесоюзной науч. конф. по электроприводам с линейными электродвигателями. - Киев, 1975. - С. 13-20.
27. Свечарник, Д.В. Линейный электропривод / Д.В. Свечарник. - М.: Энергия, 1979.
28. Свечарник, Д.В. Электрические машины непосредственного привода / Д.В. Свечарник. – М.: Энергоатомиздат, 1988. - 208 с.: ил.
29. Постоянные магниты: справочник / под ред. Ю.М. Пятина. - М.: Энергия, 1980. - 376 с.
30. Мишин, Д. Д. Магнитные материалы: Учеб. пособие / Д. Д. Мишин. - М.: Высш. школа, 1981. - 335 с.: ил.
31. Бакиров, Р.И. Первый опыт применения плунжерных насосов с погружным линейным электроприводом в ОАО "НК "РОСНЕФТЬ" / Р.И. Бакиров, М.С. Попов, С.М. Бердин . // Научно-технический вестник ОАО "НК "РОСНЕФТЬ". – М.: Изд-во «Нефтяное хозяйство», 2016. - № 2. – С. 72-75.
32. Ключников, А.Т. Моделирование цилиндрического линейного вентильного двигателя / А. Т. Ключников, А. Д. Коротаев, С. В. Шутемов // Электротехника. – М.: Знак. - 2013. - № 11. - С. 14-17.
33. Цилиндрический линейный вентильный электродвигатель для погружного бесштангового насоса / А. Т. Ключников, А. Д. Коротаев, Н. В. Шулаков, С. В. Шутемов // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике : материалы междунар. науч.-техн. конф. (Пермь, 24-25 сентября 2015). - Пермь : Изд-во ПНИПУ, 2015. - С. 158-162.
34. Промышленное использование нетрадиционных технических и технологических решений для нефтедобычи на промыслах Пермского края / Э.Ю. Вдовин, Л.И. Локшин, В.В. Семенов и др.// Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике: материалы междунар. науч.-техн. конф. (Пермь, 21–22 апреля 2016 ). – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2016. – С. 212–222.
35. Шулаков, Н.В. Применение цилиндрического линейного вентильного двигателя в качестве привода плунжерных нефтедобывающих агрегатов / Н.В. Шулаков, С.В. Шутемов // Автоматизация в электроэнергетике и

- электротехнике: материалы междунар. науч.-техн. конф. (Пермь 21-22 апреля 2016). – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2016. - С. 161-167.
36. Шулаков, Н.В. Перспективы использования цилиндрического линейного вентильного двигателя в качестве привода плунжерных нефтедобычных агрегатов / Н.В. Шулаков, С.В. Шутемов // Фундаментальные исследования. – Пенза: Изд-во Акад. естествознания, 2016. – № 12. – С. 795–799. – 4 т.
37. Шутемов, С.В. Исследование цилиндрического линейного вентильного электродвигателя для погружного бесштангового насоса / С.В. Шутемов // Фундаментальные исследования. – Пенза: Изд-во Акад. естествознания, 2016. – № 12. – С. 800–805. – 4 т.
38. Коротаев, А.Д. Экспериментальные исследования цилиндрического линейного вентильного электродвигателя / А.Д. Коротаев, Н.В. Шулаков, С.В. Шутемов // Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий АПЭЭТ-2014 : сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. (Екатеринбург, 17-20 марта 2014). - Екатеринбург : Изд-во УрФУ, 2014. - С. 198-200.
39. Мирзин, А.М. 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. – Пенза: Изд-во Акад. естествознания, 2013. – № 6.
40. Шулаков, Н.В. Метод расчета электромагнитных процессов в цилиндрическом линейном вентильном двигателе / Н.В. Шулаков, С.В. Шутемов // Электротехника. – М.: Знак, 2014. – № 11. – С. 18–22.
41. Шутёмов, С. В. Разработка и исследование цилиндрического линейного вентильного двигателя для погружного плунжерного насоса: дис.... канд.техн. наук: 05.09.01/ Шутёмов Сергей Владимирович. - Екатеринбург, 2017. - 133 с.: ил
42. Шулаков Н. В. Метод расчета электромагнитных процессов в цилиндрическом линейном вентильном двигателе / Н. В. Шулаков, С. В. Шутемов // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике: материалы междунар. науч.-техн. конф. (Пермь, 24-25 сентября 2015). - Пермь. - С. 11-12.
43. Ивановский, В.Н. Скважинные насосные установки для добычи нефти: учеб. пособие. / В.Н. Ивановский, В.И. Дарищев, А.А. Сабиров. - М.: Изд-во "Нефть и газ" РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2002. - 824 с.
44. Мищенко, И. Т. Скважинная добыча нефти: учеб. пособие / И.Т. Мищенко. – М.: Изд-во "Нефть и газ" РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. - 816 с.
45. Гинзбург, М. Я. Вентильные приводы УЭЦН - энергоэффективная техника нефтедобычи / М. Я. Гинзбург, В. И. Павленко // Нефтесервис. – М.: «Нефть и капитал», 2006. - № 4. - С. 66-69.

46. Гинзбург, М. Я. Привод УЭЦН на основе вентильного двигателя / М. Я. Гинзбург, В. И. Сагаловский // Тезисы доклада VI горно-геологического форума (С-Пб. 17-18 ноября 1998). – С-Пб., 1998 г. - С. 134-135.
47. Ломакин, А. А. Центробежные и осевые насосы / А. А. Ломакин. - Л.: Машиностроение, 1966. - 364 с.
48. Вирновский, А.С. Теория и практика глубиннонасосной добычи нефти / А.С. Вирновский. - М.: Недра, 1982. - 267 с.
49. Архипов, К.И. Справочник по станкам-качалкам / К.И. Архипов, В.И. Попов, И.В. Попов. - Альметьевск, 2000. - 146 с.
50. Огарков, Е. М. 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.
51. Вдовин, Э.Ю. Новые технологии эксплуатации малодебитного и периодического фонда. / Э.Ю. Вдовин, Л.И. Локшин, М.А. Лурье и др.// Эксплуатация осложненного фонда скважин: сб. тр. произв.-техн. конф.. – Сургут, 2017. - С. 40-43.
52. Рыжков, А.В. Анализ и выбор рациональных конструкций цилиндрического линейного двигателя с магнитоэлектрическим возбуждением : Дис. канд. техн. наук: 05.09.01 / Рыжков Александр Викторович. – Воронеж, 2008. - 154 с.
53. Анненков, А.Н. Методика электромагнитного расчета цилиндрических линейных синхронных двигателей / А.Н. Анненков, С.Ю. Кобзистый // Известия вузов. Электромеханика. - Новочеркасск, 2008. - № 3.
54. Белозеров, С.А. Моделирование электромагнитных процессов в цилиндрическом линейном синхронном двигателе при неферромагнитных щитах / С.А. Белозеров, Р.О. Нюхин // Сб. тр. конф. Воронежского государственного технического университета.– Воронеж, 2009. - С. 61-62.
55. Артыкаева, Э.М. Разработка решений по повышению эффективности нефтедобывающих штанговых насосных установок с применением вентильных электродвигателей. / Э.М. Артыкаева // Ученые записки Альметьевского государственного нефтяного института. – Альметьевск, 2014. - № 1. - С. 274-281. - 12 т.
56. Артыкаева, Э.М., Романов Р.А. Выбор главных размеров линейного цилиндрического вентильного двигателя. / Э.М. Артыкаева // Ученые записки Альметьевского государственного нефтяного института.- Альметьевск, 2017. - С.160-162. – 16 т.
57. Аипов, Р.С. Математическая модель плунжерного насоса с цилиндрическим линейным асинхронным двигателем в приводе / Р.С. Аипов, Д.Е. Валишин, Д.С. Леонтьев // Научный журнал Куб ГАУ. - 2014. - № 96 (02). - С. 573-583.

58. Медведев, В.В. Проектирование и оптимизация линейного цилиндрического индукторного двигателя / В.В. Медведев // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: технические науки. Изд-во Южный Федеральный университет. - Ростов-на-Дону, 2017. - № 2. - С. 10-17.
59. Шутемов, С.В. Система управления цилиндрическим линейным вентильным двигателем возвратно-поступательного движения / С.В. Шутемов, М.С. Байбаков, А.Д. Коротаев, А.Т. Ключников // Информационно-измерительные и управляющие системы. – М.: Знак, 2015. – № 9. – С. 64–69. – 13 т.
60. Милюша, И. 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. – Пенза: Изд-во Акад. естествознания, 2013. - № 6. – С. 882.
61. Байбаков, М.С. Алгоритм управления цилиндрическим линейным вентильным двигателем с постоянными магнитами / М.С. Байбаков, А.Т. Ключников, А.Д. Коротаев, С.В. Шутемов // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. (Пермь, 24-25 сентября 2015). – Пермь 2015. – № 9. – С. 184–189. – 13 т.
62. Управление вентильным двигателем без датчика положения / А.М. Мирзин, С.А. Бэетрэу, А.Т. Ключников, А.Д. Коротаев // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика (INNOTECH 2013): материалы Международ. интернет-конф. (Пермь, 30 ноября 2013). – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – С. 158–166.
63. Бездатчиковое управление вентильным двигателем / С.А. Бэетрэу, А.Т. Ключников, А.Д. Коротаев, А.М. Мирзин, С.В. Шутемов // Автоматизированные системы управления и информационные технологии: материалы краевой науч.-техн. конф. (г. Пермь, 22 мая 2013 г.). – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. – С. 352–360.
64. Чирков, Д.А. Алгоритм управления цилиндрическим вентильным двигателем возвратно-поступательного движения: дипломная работа инженера по специальности электромеханика; Пермский национальный исследовательский политехнический университет. – Пермь, 2015. – 90 с.: ил
65. Вишняков, С. В. Расчет электромагнитных полей с помощью программного комплекса ANSYS: Учебное пособие по курсу "Теория электромагнитного поля" по направлению "Информатика и вычислительная техника" / С. В. Вишняков, Н. М. Гордюхина, Е. М. Федорова; под ред. Ю. А. Казанцева. - М.: Изд-во МЭИ, 2003. - с. 100.

66. Беляев, Е.Ф. Дискретно-полевые модели электрических машин: учеб. пособие. Ч. I, II / Е.Ф. Беляев, Н.В. Шулаков. - Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2009. - 457 с.
67. Сильвестер, П. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков: пер. с англ. / П. Сильвестер, Р. Феррари. - М.: Мир, 1986. - 229 с.
68. Сипайлов, Г. А. Математическое моделирование электрических машин (АВМ): учеб. пособие для вузов / Г. А. Сипайлов, А. В. Лоос. - М.: Высш. школа, 1980. - 176 с.
69. Влияние активного сопротивления в частотно-управляемом ЦЛВД / Д. А. Чирков, А. Т. Ключников, А. Д. Коротаев, Э. О. Тимашев // Автоматизированные системы управления и информационные технологии : материалы всерос. науч.-техн. конф. (Пермь, 17 мая 2018). – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2018. - С. 133-138.
70. 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.
71. Тимашев, Э.О. Режим работы цилиндрического линейного вентильного двигателя при добыче нефти / Э. О. Тимашев, Д. А. Чирков, А. Д. Коротаев // Высокие технологии и инновации в науке: материалы междунар. науч. конф. (Санкт-Петербург, 28 января. 2019г.). – С-Пб. - 2019. – С. 76-81.
72. Осин, И. Л. Электрические машины автоматических устройств : учебное пособие для вузов / И. Л. Осин, Ф. М. Юферов. - М.: Изд-во МЭИ, 2003.
73. Хитерер, М. Я. Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения: учебное пособие / М. Я. Хитерер, И. Е. Овчинников. – С-Пб: КОРОНА принт, 2004.
74. Вольдек А.И. Электрические машины. - Л.: Энергия, 1978. - 832 с.
75. Чирков, Д.А. Расчет основных параметров цилиндрического линейного вентильного двигателя по схеме замещения / Д.А. Чирков, А.Д. Коротаев, А.Т. Ключников // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике: материалы II междунар. науч.-техн. конф. (Пермь, 21–22 апреля 2016 ). – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. - 2016. – С. 144–149.
76. 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. – № 9. – С. 64-69. – 14 т.
77. 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. - № 26. - С. 76-91.

78. Проектирование электрических машин : учебник для вузов / И. П. Копылов, Клоков Б. К., Морозкин В. П., Токарев Б. Ф. - Москва: Юрайт, 2011.

79. Тимашев, Э.О. 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.

80. Рационализация конструкции цилиндрического линейного вентильного двигателя/ Чирков Д.А., Шулаков Н.В., Коротаев А.Д.// Радуга знаний: Теоретические и практические аспекты наук: материалы междунар. науч.-прак. конф.(Ростов, 28-29 мая 2019). – Ростов, 2019. – С. 101-109.

450049, г. Уфа,  
ул. Новоженова, д. 86, корп. 4, каб. 21  
тел.: (347) 246-46-03  
e-mail: oil-avtomatika@mail.ru



**ОЙЛАВТОМАТИКА**

ИНН 1831178027  
КПП 183101001  
ОГРН 1161832053261  
р/с 40702810406000016743  
к/с 30101810300000000601

**ПРИЛОЖЕНИЕ А**  
**Сведения о реализации результатов работы**

**АКТ**  
**об использовании результатов диссертационной работы**  
**Чиркова Дмитрия Андреевича**  
**«Моделирование цилиндрического линейного вентильного двигателя»**

Чирковым Д. А. была разработана методика расчета геометрии и параметров ЦЛВД с постоянными магнитами, реализованная с использованием ЭВМ. Были определены геометрические размеры всех узлов индуктора и вторичного элемента, а также число витков и диаметр провода трехфазной обмотки двигателя. Проведена оптимизация геометрии и параметров ЦЛВД с целью увеличения номинального тягового усилия и улучшения его рабочих характеристик. Был предложен ряд мероприятий по увеличению тягового усилия и КПД погружного ЦЛВД.

Результаты диссертационной работы Чиркова Д.А. на тему «Моделирование цилиндрического линейного вентильного двигателя», представленной на соискание степени кандидата технических наук, в которой решаются задачи рационализации конструкции ЦЛВД, использованы в проектно-конструкторской деятельности ООО «Ойл Автоматика» в виде:

- рекомендации к проектированию и режимам работы ЦЛВД;
- методики расчета тягового усилия и рабочих характеристик ЦЛВД;
- проекта лабораторного стенда для испытаний прототипов ЦЛВД.

Использование результатов диссертационной работы Чиркова Д.А. позволяет: определить рабочие характеристики ЦЛВД; увеличить тяговое усилие и энергетические показатели двигателя.

Директор ООО «Ойл Автоматика»

Сухарев Е.В.

Конт. Исаков А.В.  
Тел. 9279531883



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Чертежи основных узлов существующего модуля ЦЛВД

Перв. примен.

Справ. №

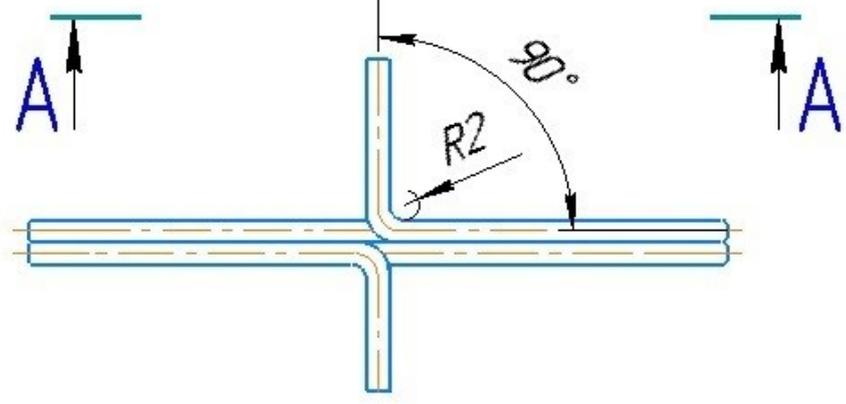
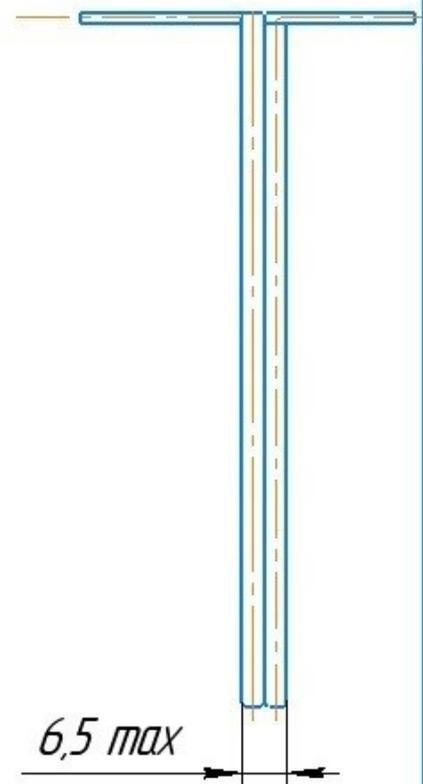
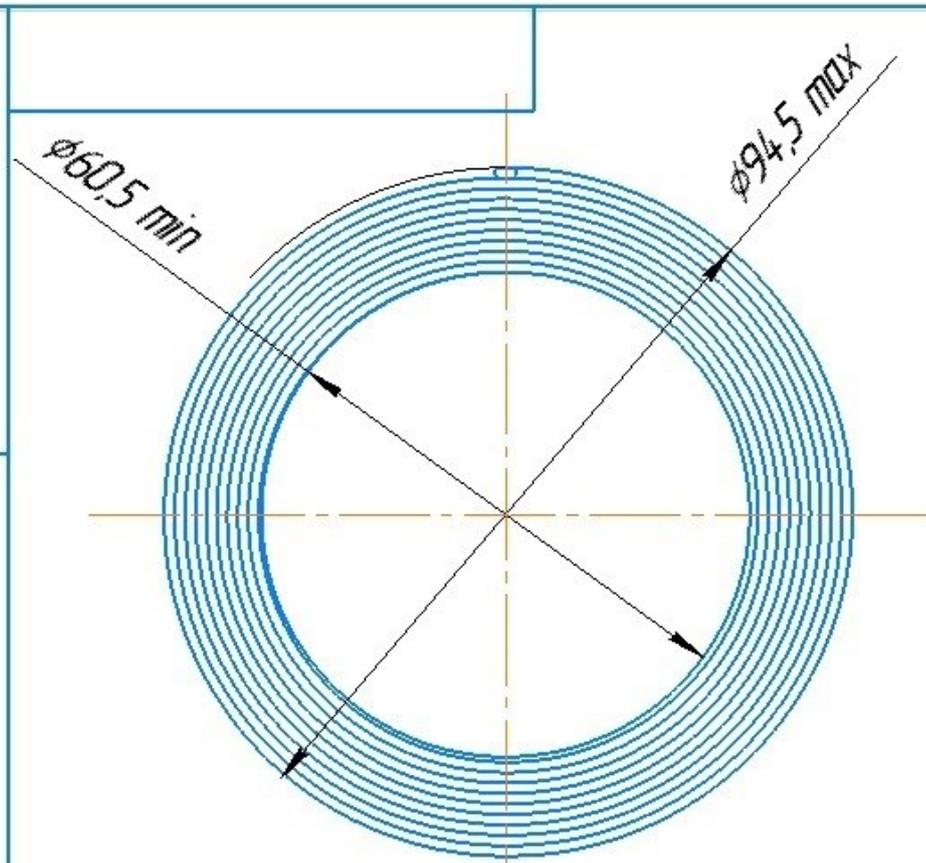
Подп. и дата

Инв. № дубл.

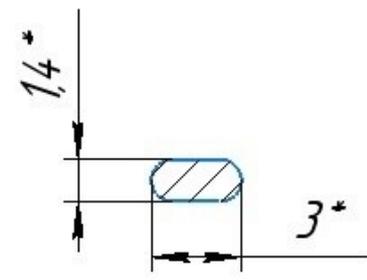
Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.



A-A (4:1)



Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.				
Пров.				
Т.контр.				
И.контр.				
Утв.				

# Катушка

## ПЭТВП-1.2x2.8

Лист	Масса	Масштаб
		1:1
Лист	Листов	1

Перв. примен.

Справ. №

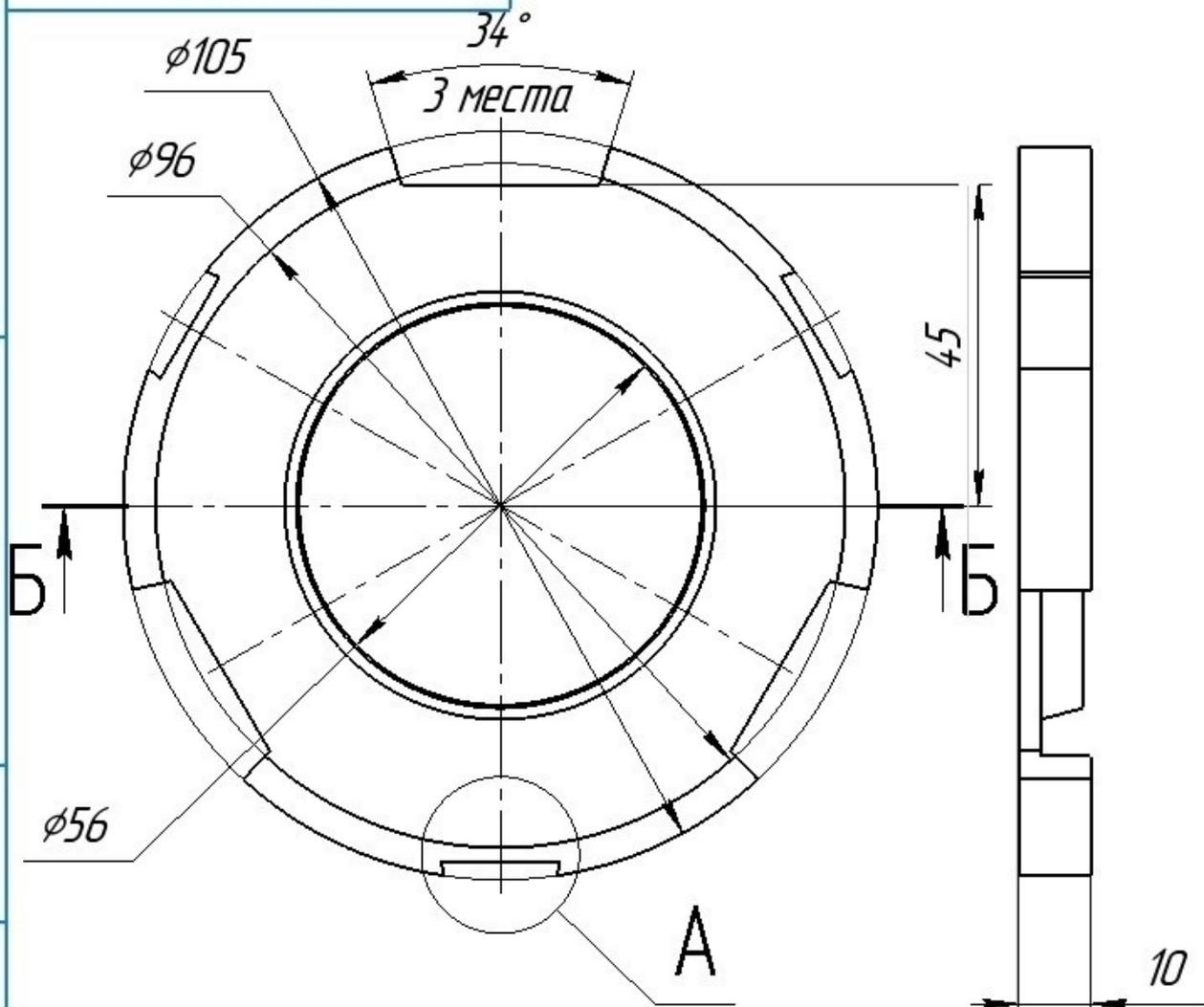
Подп. и дата

Инв. № дубл.

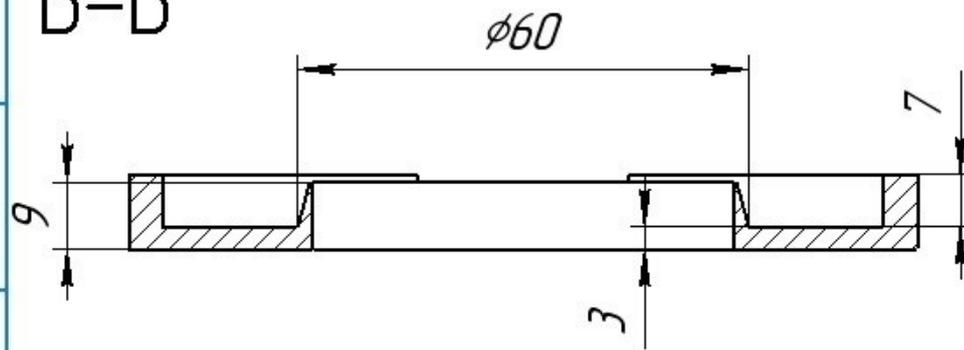
Взам. инв. №

Подп. и дата

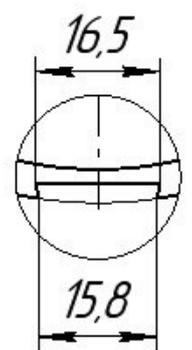
Инв. № подл.



Б-Б



A(1:1) 3 места



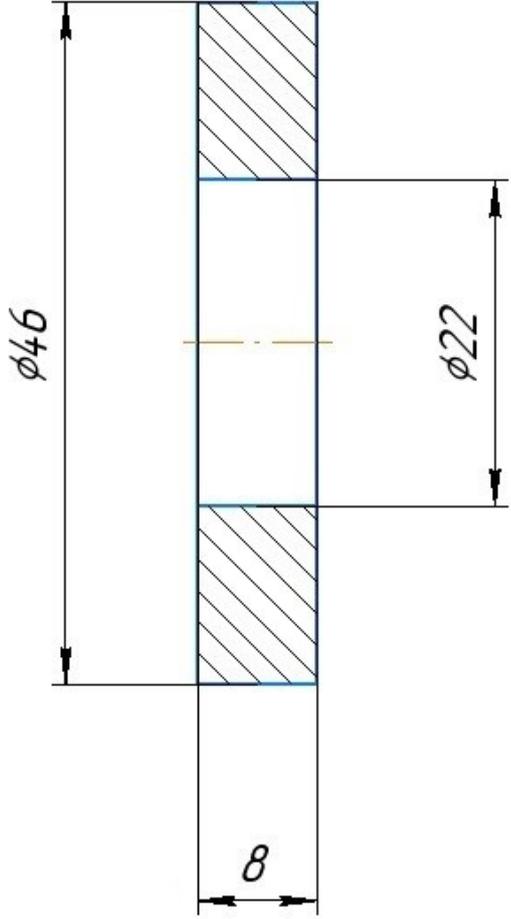
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.				
Пров.				
Т.контр.				
Н.контр.				
Утв.				

Магнитопровод статора

Лит. Масса Масштаб

Лист Листов 1

Ст. 3

Справ. №	Перв. примен.									
Инв. № дубл.	Подп. и дата									
Взам. инв. №	Подп. и дата					<h1>МАГНИТ</h1>				
Инв. № подл.	Подп. и дата								Лит.	Масса
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	<h1>SM-Co</h1>					2:1
Разраб.	Проб.							Лист	Листов	1
Т.контр.	И.контр.									
Утв.	Утв.									

Перв. примен.

Справ. №

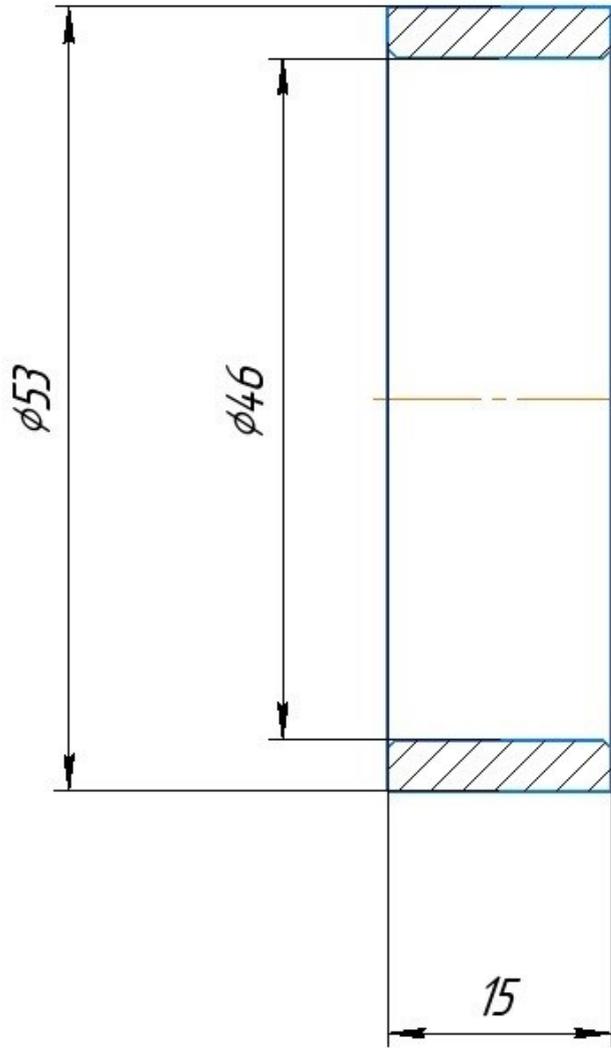
Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.



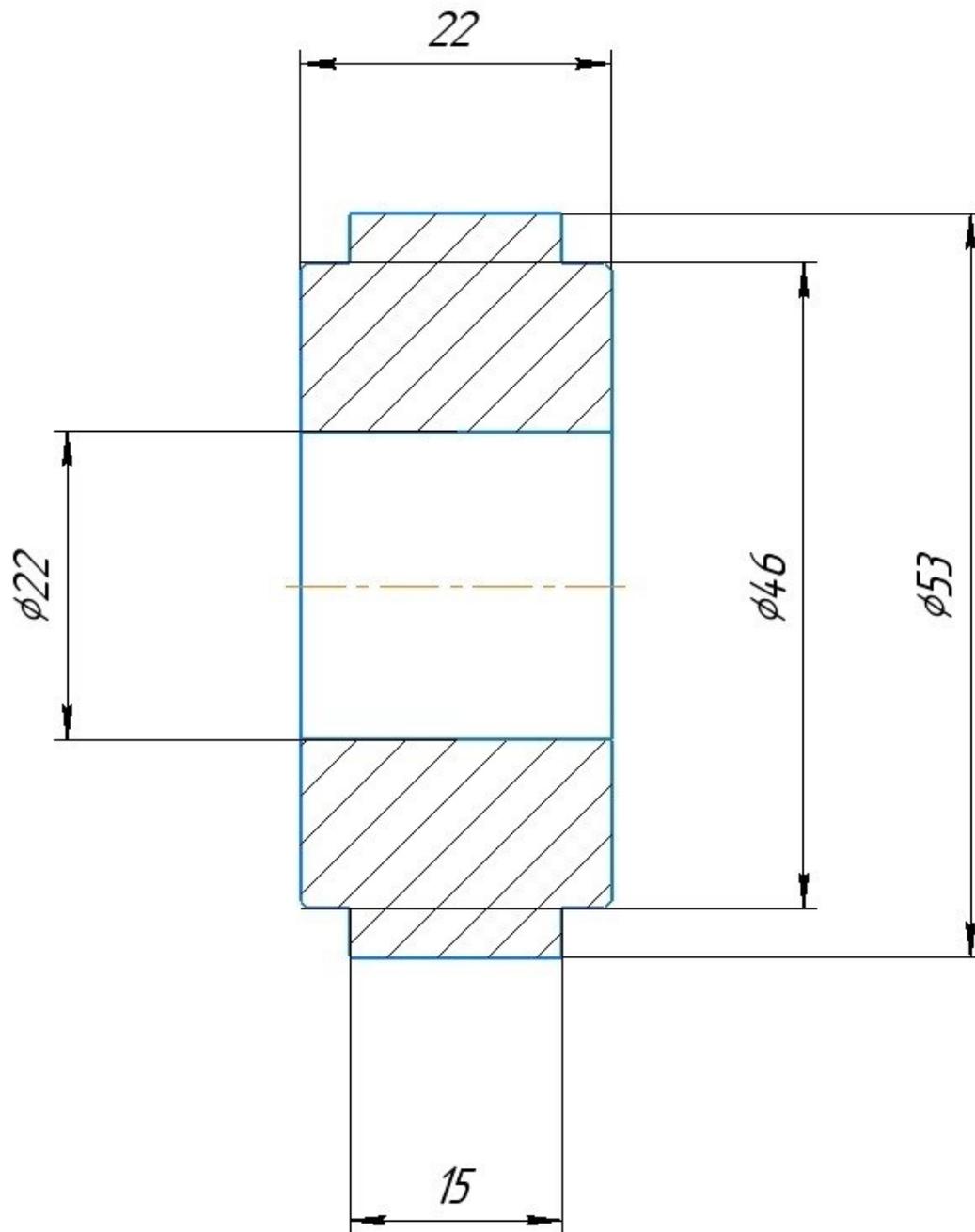
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.				
Проб.				
Т.контр.				
Н.контр.				
Утв.				

Немагнитное кольцо

сталь 12Х18Н10Т

Лит.	Масса	Масштаб
		2:1
Лист	Листов	1

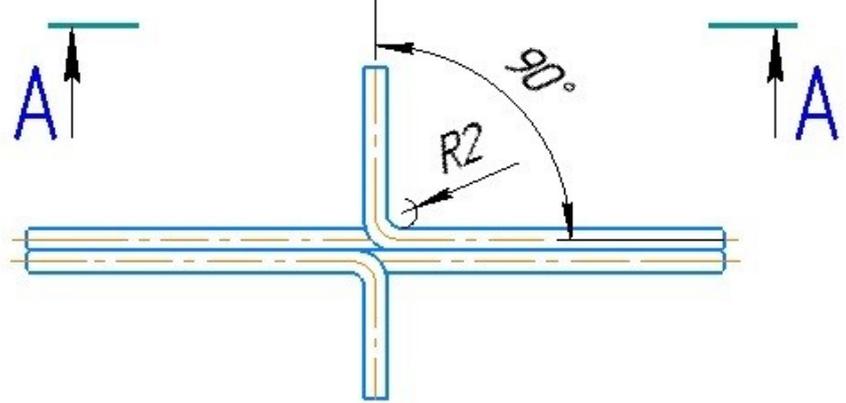
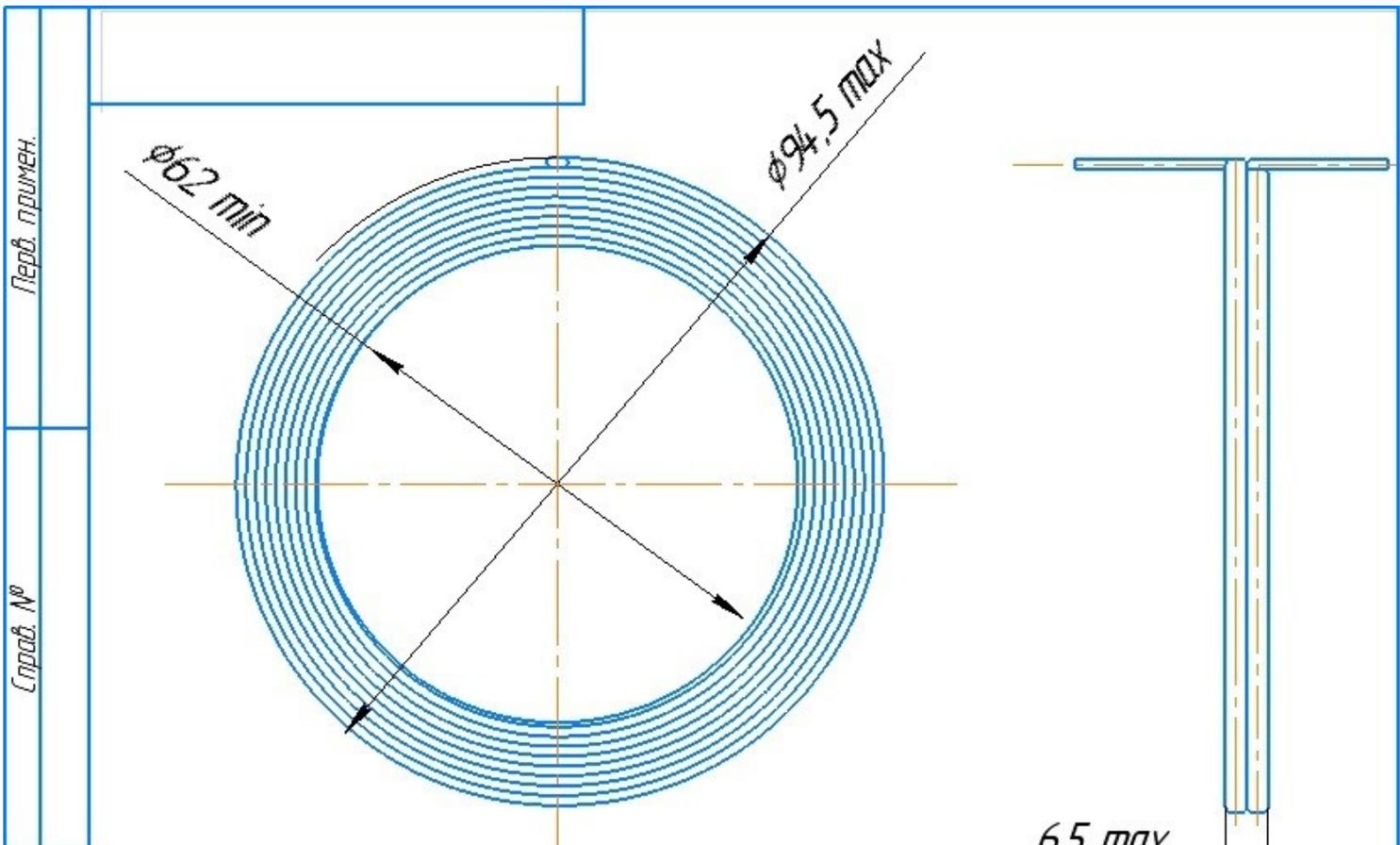
Перв. примен.				
Справ. №				
Подп. и дата	Инв. № дудл.	Взам. инв. №	Инв. № дудл.	Подп. и дата
Инв. № подл.	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Проб.				<b>Полюс</b>
Т.контр.				
И.контр.				Лит.
Утв.				Масса
				Масштаб
				Лист
				Листов
				1
				2:1
				Ст. 3



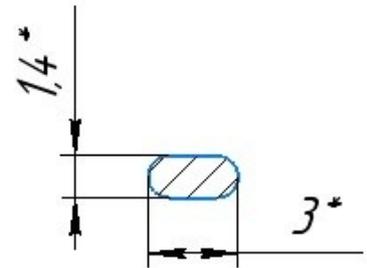
## ПРИЛОЖЕНИЕ В

Чертежи основных узлов улучшенной конструкции ЦЛВД





A-A (4:1)



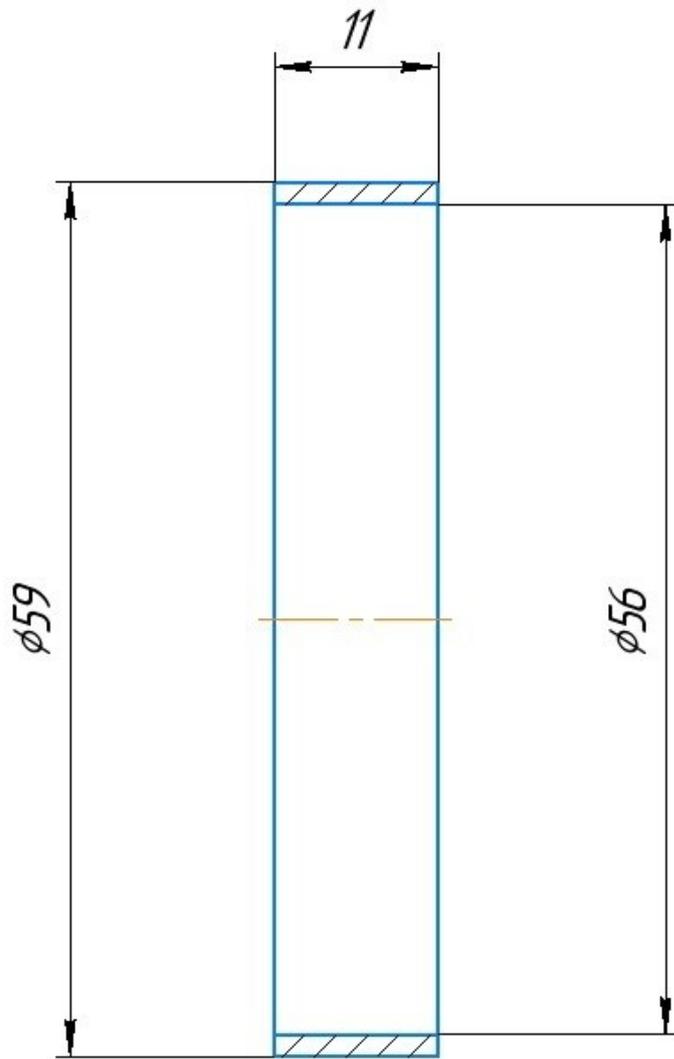
Перв. примен.	Справ. №	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата	Инв. № подл.
---------------	----------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.				
Пров.				
Т.контр.				
И.контр.				
Утв.				

**Катушка**  
ПЭТВП-1.2x2.8

Лист	Масса	Масштаб
		1:1
Лист	Листов	1

Перв. примен.	
Справ. №	



Подп. и дата	
Инв. № дубл.	
Взам. инв. №	
Подп. и дата	

Инв. № подл.				Немагнитное кольцо	Лит.	Масса	Масштаб
Утв.					Лист	Листов	1
Разраб.	№ докум.	Подп.	Дата	сталь 12X18H10T			2:1
Т.контр.							



Перв. примен.

Справ. №

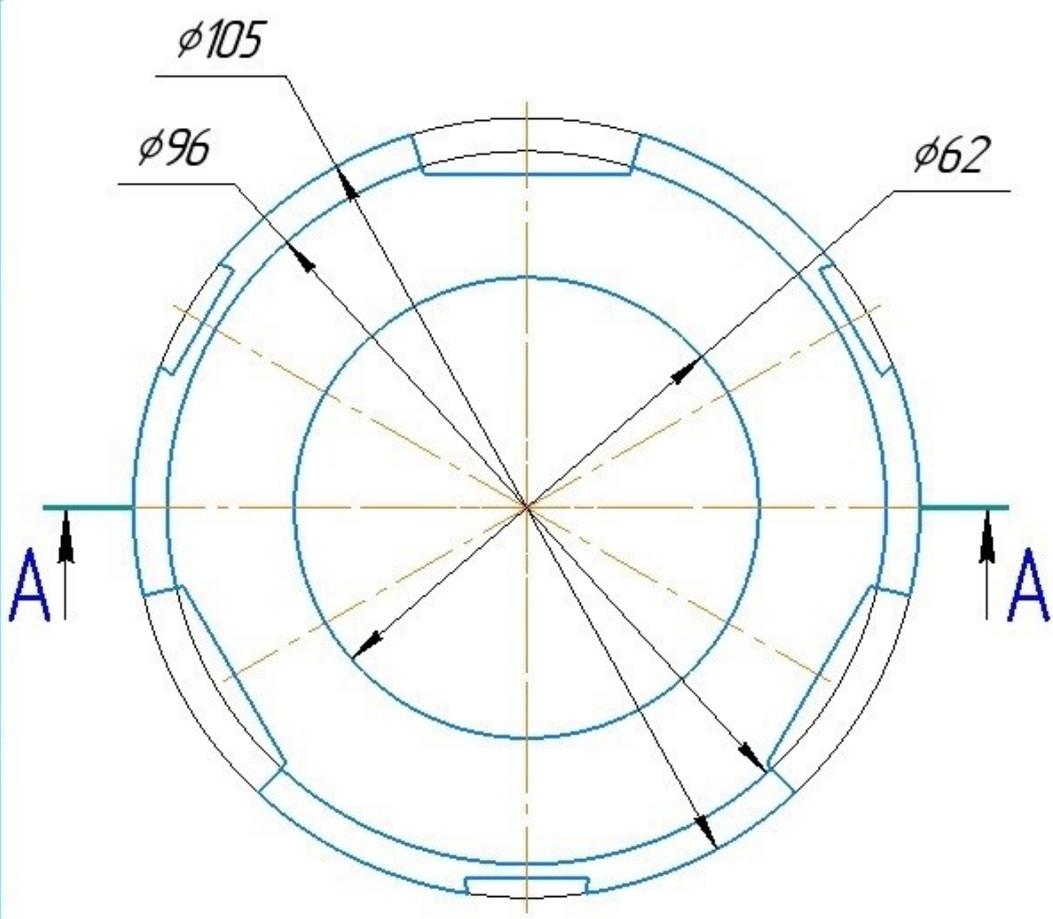
Подп. и дата

Инв. № дробл.

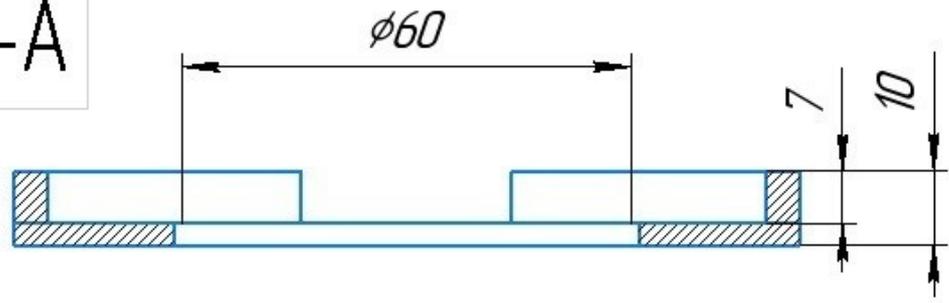
Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.



A-A



Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.				
Пров.				
Т.контр.				
Н.контр.				
Утв.				

Магнитопровод статора

Лит.	Масса	Масштаб
		1:1
Лист	Листов	1

Перв. примен.

Справ. №

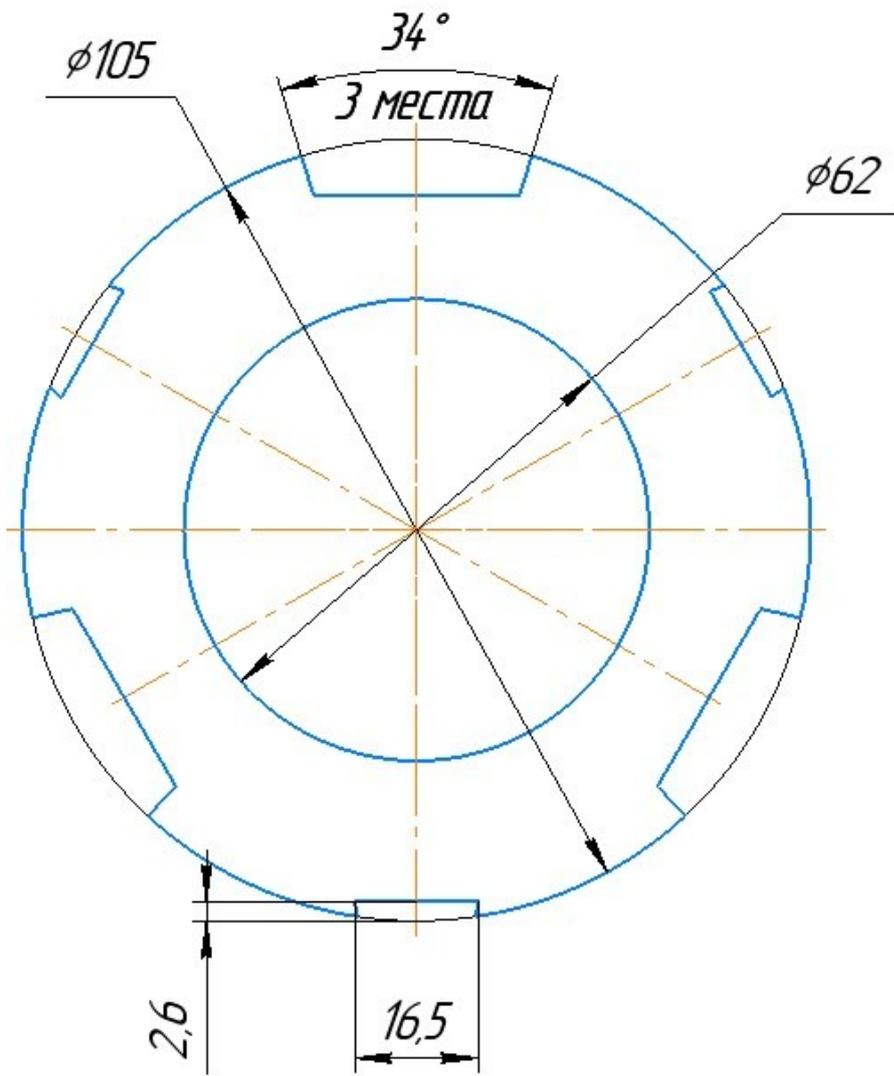
Подп. и дата

Инд. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инд. № подл.



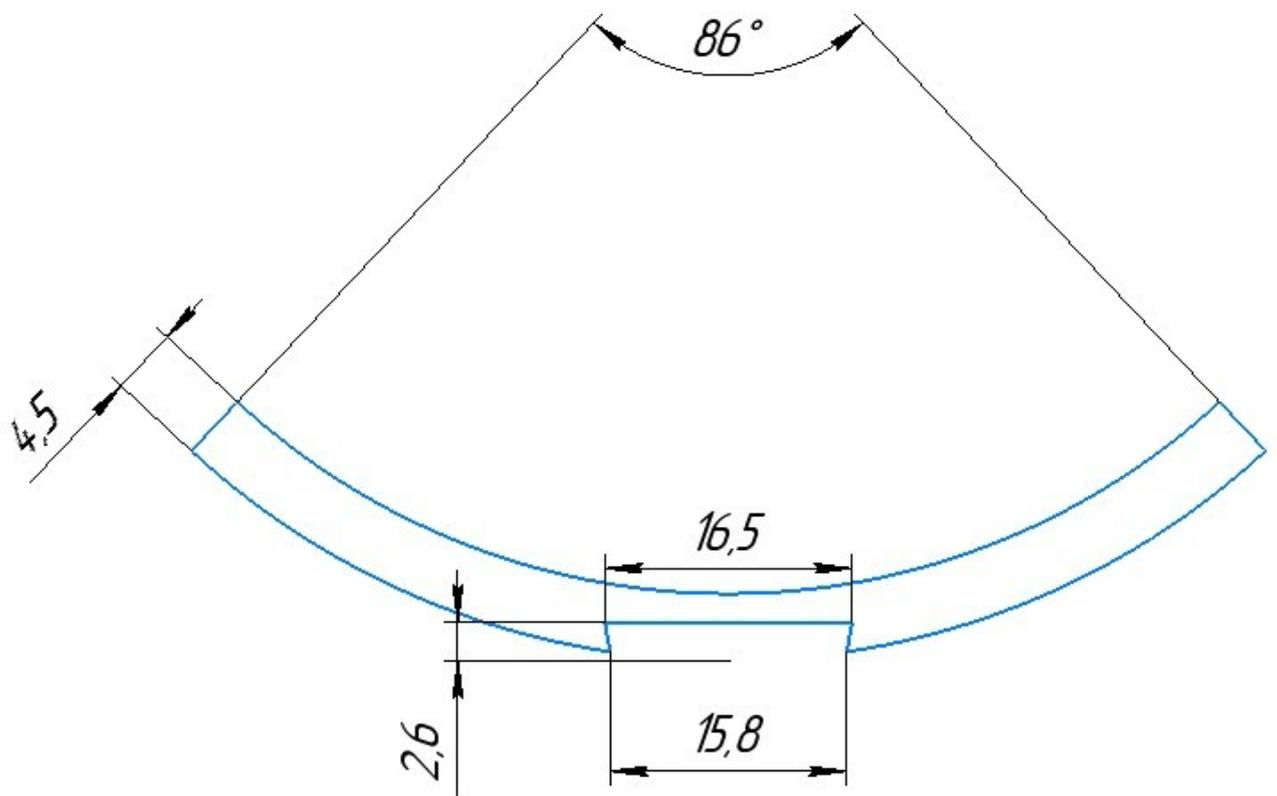
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.				
Пров.				
Т.контр.				
И.контр.				
Утв.				

Диск статора

Сталь 1212, 0.5 мм

Лит.	Масса	Масштаб
		1:1
Лист	Листов	1

Перв. примен.	
Справ. №	



Подп. и дата	
Инв. № дцкл.	
Взам. инв. №	
Подп. и дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.				
Пров.				
Т.контр.				
Н.контр.				
Утв.				

**Ярмо статора**

**Сталь 1212, 0.5мм**

Лит.	Масса	Масштаб
		2:1
Лист	Листов	1