

На правах рукописи

*Салах*

Салах Ахмед Абдель Максуд Селим

МНОГОПОЛЮСНЫЙ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДВИГАТЕЛЬ С  
ДРОБНЫМИ ЗУБЦОВЫМИ ОБМОТКАМИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА  
ПОГРУЖНЫХ НАСОСОВ

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
Шевченко Александр Федорович

**Официальные оппоненты:** Симонов Борис Ферапонтович  
доктор технических наук, старший научный сотрудник, Институт горного дела СО РАН, г. Новосибирск, заведующий отделом виброимпульсных систем

Петренко Юрий Васильевич  
кандидат технических наук, доцент,  
Новосибирский государственный технический университет, доцент кафедры теоретических основ электротехники

**Ведущее предприятие:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск

Защита состоится «07» июня 2012 г. в 10<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.04 при Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан «03» мая 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д. т. н., профессор



Нейман В. Ю.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Важнейшим фактором современной мировой экономики, во многом определяющим и политику, является наличие и использование нефтяных ресурсов. Современная цивилизация не может существовать без нефти и нефтепродуктов, потребление которых постоянно растет. Основным является энергетическое направление их использования.

В подавляющем числе случаев добыча нефти не обходится без специального оборудования и такой его важной составляющей, как электрический погружной насос (ЭПН). Одним из основных видов техники добычи нефти в России являются установки электроцентробежных насосов (УЭЦН) и электровинтовых насосов (УЭВН). За последние годы изготовителями проделана большая работа по повышению качества традиционных погружных насосных установок. Однако и сегодня они нуждаются в дальнейшем техническом совершенствовании, которое позволило бы удовлетворить возросшие требования потребителей и обеспечить рост эффективности их использования.

До настоящего времени в большинстве случаев в составе электропривода (ЭП) для погружного электронасоса используются погружные асинхронные двигатели серии (ПЭД). Этому типу ЭП присущи невысокие значения КПД и коэффициент мощности, большие пусковые токи, относительно большая длина электродвигателя, а также сложность реализации алгоритма эффективного управления.

Возможности дальнейшего повышения параметров энергетической эффективности погружных асинхронных двигателей практически исчерпаны, поэтому около десяти лет назад по техническому заданию ОАО «ЛУКОЙЛ» были начаты работы по созданию приводов погружных центробежных насосов на основе вентильных электродвигателей с постоянными магнитами в роторе. Помимо улучшенных, по сравнению с ПЭД, энергетических характеристик возможность регулирования частоты вращения вентильных электродвигателей существенно повышает технологические возможности при эксплуатации центробежных и винтовых погружных насосов.

Для скважин с осложненными условиями добычи нефти разработаны установки электровинтовых насосов с погружным электродвигателем (УЭВН) и винтовые насосы с поверхностным приводом (УВНП). Следует отметить, что винтовой насос может эффективно работать на низкой скорости. Существующие погружные двигатели не могут быть непосредственно использованы для привода винтовых насосов из-за их высокой скорости вращения. Понижающие редукторы, которые делают работу всей системы более эффективной очень сложно применить в узких нефтяных скважин. Таким образом, создание и исследование погружного электродвигателя с низкой частотой вращения, высоким крутящим моментом и большим диапазоном регулирования является одной из важных задач в настоящее время.

Объектом исследования являются синхронные электродвигатели с дробными зубцовыми обмотками с возбуждением от постоянных магнитов. Регулируемые магнитоэлектрические синхронные двигатели дают ощутимый положи-

тельный эффект. Показатели качества магнитоэлектрических синхронных двигателей в значительной степени зависят от оптимальности их конструкции и режимов работы. В современном регулируемом приводе очевидна актуальность оптимизации двигателя для работы во всем диапазоне мощностей и частот вращения. Такие двигатели, работающие в составе частотно-регулируемого привода, требуют применения специальных алгоритмов управления, например, векторного, специальной формы питающего напряжения и др. А реализация системы векторного управления обеспечивает регулировочные характеристики таких ЭП близких к регулировочным характеристикам ЭП постоянного тока.

**Целью работы** является разработка и исследование магнитоэлектрических синхронных двигателей с дробными зубцовыми обмотками с радиальными и тангенциальными магнитами на роторе для электропривода погружных насосов.

Для достижения цели поставлены следующие **задачи**:

1. Разработка расчетной математической модели для моделирования и исследования магнитного поля, электромагнитного момента и индуктивных параметров магнитоэлектрических двигателей с дробными зубцовыми обмотками с учётом реальной геометрии зубцовой зоны и насыщения магнитной системы;
2. Исследование влияния конструктивного исполнения ротора на магнитное поле и электромагнитный момент двигателей при различных значениях коэффициента полюсного перекрытия;
3. Исследование влияния размеров активного ядра (статора и ротора), их соотношений и конструктивного исполнения ротора (с радиально и тангенциально расположенными магнитами) с учётом реальной геометрии зубцовой зоны и насыщения магнитной системы на характеристики погружных магнитоэлектрических двигателей с дробными зубцовыми обмотками (на индуктивные параметры, на электромагнитный момент, на объём и размеры магнитов);
4. Разработка математической модели «магнитоэлектрические двигатели в системе координат  $(d-q)$ , связанной с ротором – управляемый инвертор – система управления – адаптивная система с настраиваемой моделью»;
5. Исследование характеристик магнитоэлектрических двигателей с дробными зубцовыми обмотками в различных скоростных режимах;
6. Разработка имитационных моделей магнитоэлектрических двигателей в программной среде MatLab 7.5 – Simulink для исследования процесса пуска двигателей с бездатчиковым векторным управлением.

**Методы исследования.** При решении поставленных задач в диссертации использовались методы математической физики, теории поля, электромеханики, методы теории электропривода, теории автоматического управления, теории пространства состояний, теории матричной алгебры и дифференциальных уравнений, математического и имитационного моделирования. Моделирование электромагнитного поля выполнено с помощью программы конечно-элементного анализа FEMM (Finite Element Method Magnetics). Для разложения

коэффициентов само - и взаимной индуктивности контуров обмотки используется функция быстрого разложения в ряд Фурье  $fft(V)$ , встроенная в Mathcad. Исследование процесса пуска двигателей с бездатчиковым векторным управлением осуществляется методом цифрового моделирования в пакете программ MatLab 7.5 – Simulink.

**Научная новизна** заключается в следующем:

1. Обоснована целесообразность применения многополюсных магнитоэлектрических двигателей с дробными зубцовыми обмотками для электропривода погружных насосов;
2. Разработана математическая модель для исследования магнитного поля с учётом реальной геометрии, конструктивного исполнения ротора и особенностей дробной зубцовой обмотки, обеспечивающая требуемую достоверность результатов;
3. На основе разработанной математической модели впервые выполнены исследования магнитного поля в погружных двигателях с дробными зубцовыми обмотками и возбуждением от постоянных магнитов, позволяющие выявить влияние геометрических размеров статора и ротора, их соотношения, модификаций ротора, насыщения магнитной системы и других факторов на объём магнитов, индуктивные параметры и электромагнитный момент;
4. Результаты моделирования двигателей показывают, что система бездатчикового векторного управления двигателями на основе адаптивной системы с настраиваемой моделью имеет высокую реакцию скорости при низких и высоких скоростях, позволяет обеспечить необходимое качество процесса пуска и обеспечивает эффективность управлять двигателями и плавный разгон двигателей.

**Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Численные модели погружных магнитоэлектрических двигателей с радиальными и тангенциальными расположениями магнитов на роторе и дробной зубцовой обмоткой на статоре для исследования магнитного поля;
2. Результаты исследований с использованием разработанной математической модели влияния геометрических размеров статора и ротора, их соотношений, особенностей дробной зубцовой обмотки, конструктивного исполнения ротора и других факторов на электромагнитный момент, индуктивные параметры, объём магнитов и других характеристик, позволяющих оптимизировать технико-экономические показатели как погружного двигателя с дробной зубцовой обмоткой, так и системы электропривода в целом;
3. Результаты исследований процесса пуска бездатчикового векторного управления магнитоэлектрическими двигателями погружного насоса на основе адаптивной системы с настраиваемой моделью.

**Практическая значимость работы.**

1. Совокупность полученных в диссертационной работе результатов создает объективные предпосылки для внедрения в практику рекомендаций по проектированию и проектированию синхронных двигателей с постоянными магнитами с дробными зубцовыми обмотками. Предложенные рекоменда-

- ции по выбору геометрии постоянных магнитов для получения электромагнитного момента позволяют повысить массогабаритных и энергетических показателей этих машин;
2. Разработанная математическая модель погружного двигателя с дробными зубцовыми обмотками и возбуждением от постоянных магнитов позволяет повысить точность результатов исследования распределения магнитного поля с учётом реальной геометрии зубцовой зоны и насыщения магнитной системы;
  3. Результаты исследований влияния реальной геометрии статора и ротора, конструктивного исполнения ротора, особенностей дробной зубцовой обмотки и других факторов на электромагнитный момент, индуктивные параметры, объём магнитов и т.д. позволяют разработать инженерные методики расчёта, обеспечивающие высокую точность и комплекс конкретных рекомендаций по обеспечению оптимальных технико-экономических показателей при разработке погружных двигателей с дробной зубцовой обмоткой и возбуждением от постоянных магнитов, а также системы электропривода в целом;
  4. Разработаны подробные имитационные модели электропривода с магнито-электрическим двигателем с бездатчиковым векторным управлением в программной среде MatLab/Simulink, которые могут быть использованы при расчёте как установившихся, так и переходных режимов магнитоэлектрических двигателей, применяющихся не только для погружных насосов, но и для машин общего применения;
  5. Доказано, что синхронный электродвигатель с возбуждением от постоянных магнитов при оптимальных алгоритмах бездатчикового векторного управления обладает наилучшей энергетической эффективностью по сравнению с другими видами электромеханических преобразователей.

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на различных российских и международных конференциях. На Всероссийской научной конференции молодых ученых “Наука. Технологии. Инновации” (г. Новосибирск, 2010, 2011 г.). На Всероссийской научно-практической конференции «Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов» (г. Томск, 2010, 2011 г.). На XVII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых “Современные техника и технологии” СТТ-2011(г. Томск, 2011 г.). На Международной молодежной конференции “Радиоэлектроника, электротехника и энергетика” РЭЭиЭ -2011(г. Томск, 2011 г.).

**Реализация.** Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе на кафедре «Электромеханика» Новосибирского государственного технического университета при курсовом и дипломном проектировании.

**Публикации.** По результатам выполненных исследований опубликовано 11 печатных работ, в том числе 3 статьи входящих в перечень, рекомендованный ВАК РФ, 1 публикация в сборнике научных трудов, 7 статей в материалах международных и всероссийских конференций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 106 наименований и приложений. Работа выполнена на 185 страницах основного текста, включая 103 рисунка и 15 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность, изложены цели и задачи диссертационной работы, методы решения поставленных задач. Описаны состав и структура работы, показана научная новизна и практическая ценность работы, сформулированы положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** освещено современное состояние и тенденции развития разработок ЭПН. Предложен обзор существующих конструктивных исполнений и типов ЭПН с погружными электродвигателями, и приведена их сравнительная характеристика.

До последнего времени в большинстве случаев в составе ЭП для погружного электронасоса используются погружные АД серии ПЭД. При эксплуатации УЭЦН с таким электродвигателем в определенных режимах отбора жидкости из скважины возникают некоторые технологические проблемы, которые приводят к существенному снижению энергетической эффективности работы УЭЦН. Особенность УЭВН заключается в том, что она может эффективно работать на низкой скорости. Существующие погружные двигатели не могут непосредственно приводить во вращение винтовой насос из-за высокой скорости вращения. Крупногабаритные редукторы, применяемые в УЭВН, снижают эффективность всей системы. Таким образом, разработка погружного электродвигателя с низкой скоростью вращения, высоким крутящим моментом и большим диапазоном регулирования стало одной из важных задач в настоящее время.

Таким двигателем является магнитоэлектрический электродвигатель с дробными зубцовыми обмотками, который позволяет существенно поднять эксплуатационные характеристики УЭЦН и УЭВН.

В диссертационной работе проведено исследование двигателей с двумя разными типами роторов с постоянными магнитами. Первая модель – ротор коллекторного типа с тангенциальной намагниченностью магнитов. Благодаря такой конструкции ротора удастся сконцентрировать магнитный поток в воздушном зазоре и тем самым значительно повысить использование активного объема машины. Вторая модель – ротор с радиально-ориентированными магнитами на поверхности ротора. На статоре расположена обмотка с дробным числом пазов на полюс и фазу  $q < 1$ . Она состоит из отдельных катушек, намотанных на зубец статора. Такая обмотка позволяет повысить линейную токовую нагрузку за счет увеличения коэффициента заполнения паза и максимального использования объема статора под обмотку.

В погружном исследуемом двигателе применена обмотка с  $q = 2/5$ . Такая обмотка создаёт магнитное поле с рабочей гармоникой полюсностью  $p=5$ .

При этом она расположена на статоре с числом пазов  $Z=12$ . Рассмотрены устройство и методы построения дробных зубцовых обмоток на примере данной обмотки. Схема обмотки приведена на рис. 1.

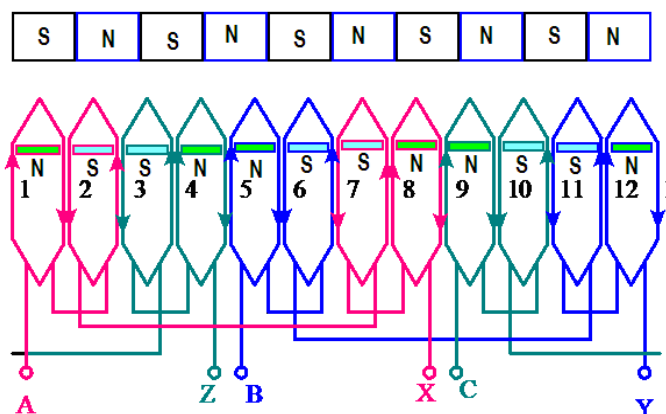


Рис. 1 – Схема обмотки якоря и ротора полюсов

В этой же главе рассматриваются методы построения, устройство дробных зубцовых обмоток с  $q < 1$ , магнитодвижущие силы зубцовой дробной обмотки и на основе анализа магнитного поля в воздушном зазоре и электромагнитного момента методом гармонических проводимостей сделано пояснение принципа действия двигателя.

**Во второй главе** проведены исследования влияния конструктивного исполнения статора и ротора на магнитное поле, угловые характеристики и индуктивные параметры магнитоэлектрических двигателей с тангенциально - и радиально-ориентированными магнитами на роторе.

В первом разделе рассмотрена математическая модель для исследования электромагнитного момента и индуктивных параметров. Применение аналитических методов для расчета магнитного поля и определения индуктивных параметров электрических машин с дробными зубцовыми обмотками является проблематичным из-за сложной конфигурации зубцовой зоны, из-за наличия в магнитной цепи постоянных магнитов, насыщении магнитной системы, а также из-за отсутствия раскрытия пазов статора и ротора. По этой причине для проведения исследований создана модель расчёта магнитного поля магнитоэлектрического двигателя с постоянными магнитами на роторе и зубцовой обмоткой на статоре, в основу которой положена программа FEMM.

Во втором разделе рассмотрены магнитное поле и электромагнитный момент электродвигателя. Рассматривались роторы с радиальным и тангенциальным расположением магнитов. Сравнение двигателей проводилось по угловой характеристике  $M_{эм} = f(\theta_r)$ . При этом нагрузка магнитной системы, индукция в зубцах и ярмах статора для обеих конструкций ротора не превышает допустимых пределов. Линейная нагрузка и плотность тока, т.е. тепловой фактор, для всех рассматриваемых случаев оставались постоянными.

Представляет теоретический и практический интерес решение следующей задачи – определение зависимости максимального момента двигателя от объёма магнитов на роторе при различных значениях коэффициента полюсного перекрытия  $\alpha_\delta = b_M / \tau$  для двигателя с радиальным



расположением магнитов и при различных значениях отношения  $b_M / h_M$  для двигателя с тангенциальным расположением магнитов. Проведённые исследования позволят сделать: сопоставление двигателей с различной конструкцией ротора при одинаковых объёмах магнитов на роторе; определение объёма и размеров магнитов, обеспечивающих максимальный электромагнитный момент двигателя.

Условные обозначения размеров магнитов ротора для двух двигателей представлены на рис. 2, где обозначены:  $h_M$  (высота магнита) – размер в направлении намагниченности;  $b_M$  (ширина магнита) – размер в направлении перпендикулярном к намагниченности.

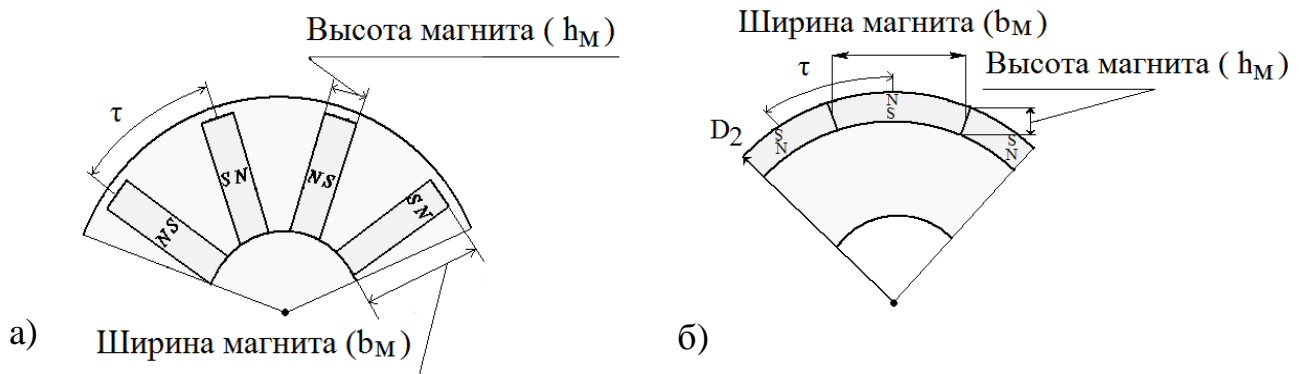


Рис.2 – Условные обозначения размеров магнитов ротора: а – ротор коллекторного типа; б – ротор с рад. магнитами;

Алгоритм расчёта был принят следующий. При неизменной высоте магнита проводились расчёты при разных коэффициентах полюсного перекрытия. При этом изменялся и объём магнитов. Затем эти расчёты повторялись при других значениях высоты магнита. В результате моделирования двигателей при изменении ширины магнита и фиксировании высоты магнита получены максимальные значения момента двигателей с тангенциально - и радиально-ориентированными магнитами в зависимости от объёма магнитов при различных соотношениях между шириной магнита и полюсным делением ( $b_M / \tau$ ) (с.м. рис. 3).

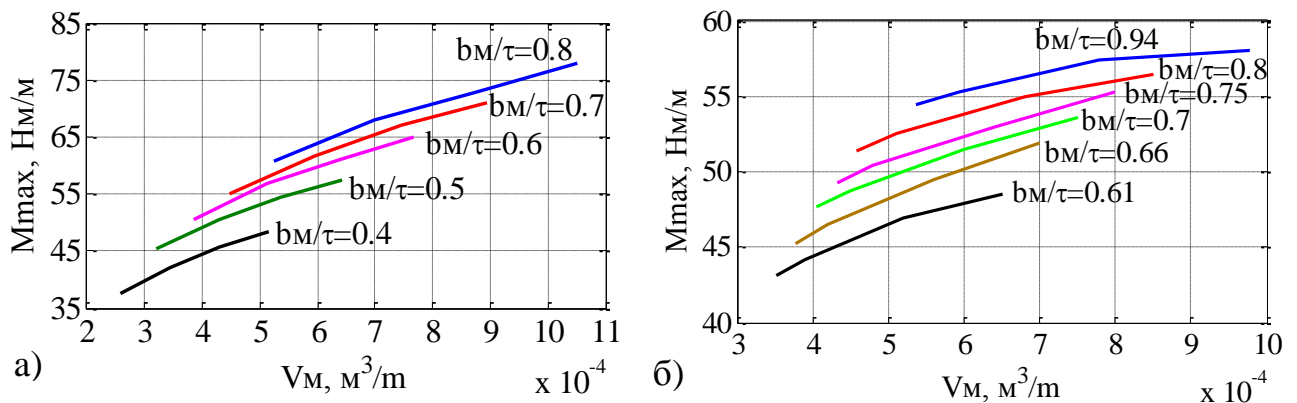


Рис. 3 – Максимальное значение момента двигателей в зависимости от объёма магнитов при различных соотношениях между шириной магнита и полюсным делением ( $b_M / \tau$ ): а – ротор коллекторного типа; б – ротор с рад. магнитами

Сравнение электромагнитных моментов двух вариантов двигателей с разным исполнением роторов показывает явное преимущество двигателей с тангенциальным расположением магнитов. Полученные зависимости позволяют оптимально производить выбор объёма магнитов, необходимых для обеспечения заданного момента двигателя. Варьируя отношением  $b_M / \tau$  можно обеспечить получение необходимого момента при минимальном расходе магнитов. В результате проведенного моделирования выявлено, что конфигурация магнитной системы существенным образом влияет на поток, индукцию в магнитопроводе, и электромагнитный момент магнитоэлектрических двигателей.

В третьем разделе проведены исследования индуктивностей фазных обмоток магнитоэлектрических машин в зависимости от угла между осью фазы и продольной осью ротора  $d$ . Индуктивности фазных обмоток двигателя с ротором с тангенциальным размещением магнитов являются периодическими функциями угла поворота ротора двигателя. Следует отметить, что индуктивности двигателя с радиальным расположением магнитов с ненасыщенной магнитной системой являются также периодическими функциями угла поворота ротора двигателя (особенно при малых значениях  $(b_M / \tau)$  и только при существенном насыщении они становятся постоянными. В самом общем случае собственные и взаимные индуктивности контуров обмоток электрических машин с постоянными магнитами являются четными периодическими функциями с периодом  $2\pi$ , содержат  $n$  гармоник, определяемых из разложения в ряд Фурье. Проведенные расчеты показали, что в кривой изменения собственных индуктивностей фаз содержится большое количество высших гармоник. При анализе ограничимся постоянной составляющей и второй гармоникой индуктивностей.

Здесь же проводятся исследования индуктивностей по продольной и поперечной осям  $L_d, L_q$ . Их знание необходимо при анализе динамических и установившихся режимов работы двигателя, который проводится путём решения системы дифференциальных уравнений, записанная в координатных осях  $(d, q)$ . Для нахождения продольной и поперечной индуктивностей были проведены расчёты для двух положений ротора при различных значениях фазного тока. Расчёт выполняется отдельно по осям  $d$  и  $q$ . В том и другом случае были запитаны три фазы обмотки статора, причём ток в одной из фаз принимается максимальным, а в двух других он будет равен половине этого тока с обратным знаком. На рис. 4 представлены изменения индуктивности по осям  $d$  и  $q$  в зависимости от фазного тока.

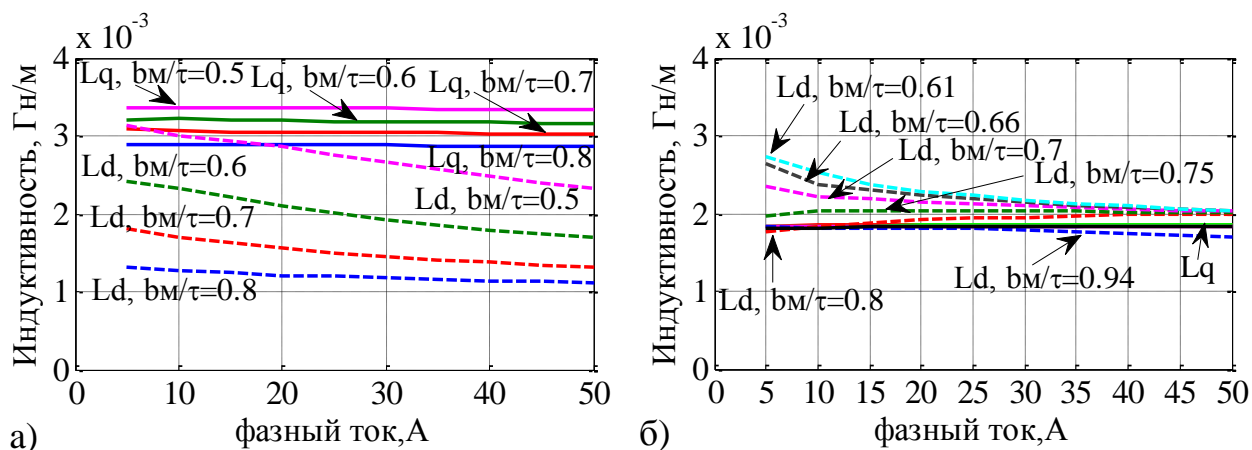


Рис. 4 – Изменение продольной и поперечной индуктивностей двигателя с тангенциально-ориентированными магнитами в зависимости от фазного тока при различных соотношениях между шириной магнита и полюсным делением: а – ротор коллекторного типа; б – ротор с рад. магнитами

**В третьей главе** исследуются характеристики многополюсных магнитоэлектрических двигателей в различных режимах, характерных для погружных насосов. Для этого разработана математическая модель магнитоэлектрического двигателя в основе, которой лежит система дифференциальных уравнений, записанных в системе координат ротора ( $d-q$ ) для реализации векторного управления током статора двигателя.

После определения параметров многополюсных магнитоэлектрических двигателей с дробными зубцовыми обмотками выявили как ряд особенностей, присущих этим обмоткам, так и закономерности присущие электрическим машинам с классическими обмотками. А именно, законы изменения этих индуктивностей имеют гармонический характер в зависимости от угла поворота ротора, как и у двигателей с классическими обмотками. Это даёт возможность воспользоваться известными дифференциальными уравнениями, описывающими поведение двигателя в различных режимах. На основе этих уравнений ниже будут разработаны структурные схемы, позволяющие анализировать режимы работы двигателя.

Рассмотрим систему координат ( $d-q$ ), связанной с ротором магнитоэлектрического двигателя и неподвижной относительно его. Будем считать, что ось  $d$  совмещена с осью магнитного потока ротора. В данной системе координат уравнения для магнитоэлектрического двигателя можно записать в виде:

$$\begin{aligned}
 u_d &= R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_r \psi_q; \\
 u_q &= R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_r \psi_d; \\
 \psi_q &= L_q i_q; \\
 \psi_d &= L_d i_d + \psi_{PM};
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где  $u_q, u_d$  – напряжения по осям  $q$  и  $d$ ;  $R_s$  – активное сопротивление фазных обмоток статора;  $L_d, L_q$  – индуктивности обмотки статора по продольной и поперечной осям (для частного случая неявнополюсной конструкции ротора двигателя  $L_q \approx L_d \approx L_s$ );  $i_q, i_d$  – компоненты вектора тока статора по осям  $q$  и  $d$ ;  $\psi_{PM}$  – вектор потокосцепления обмотки статора с магнитным потоком ротора;  $\psi_d, \psi_q$  – потокосцепления по осям вращающейся системы координат  $d$  и  $q$ ;  $\omega_r$  – электрическая угловая скорость вращения ротора.

Электромагнитный момент двигателя:

$$M_{\text{ЭМ}} = \frac{P_{\text{ЭМ}}}{\omega_r} = \frac{3}{2} p(\psi_d i_q - \psi_q i_d) = \frac{3}{2} p(\psi_{PM} i_q) + \frac{3}{2} p(L_d - L_q) i_q i_d. \quad (2)$$

Уравнение движения электродвигателя выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} J \frac{d\omega_M}{dt} &= M_{\text{ЭМ}} - F\omega_M - M_c; \\ \omega_M &= \frac{d\theta_r}{dt}; \\ \omega_r &= p\omega_M; \end{aligned} \quad (3)$$

где  $M_{\text{ЭМ}}$  – электромагнитный крутящий момент;  $M_c$  – механический крутящий момент на валу;  $J$  – суммарный момент инерции ротора и нагрузки;  $F$  – суммарное вязкое трение ротора и нагрузки;  $\omega_M$  – механическая угловая скорость вращения ротора.

Для таких машин целесообразно применение векторного управления током статора. Показано, что вводя составляющую тока  $i_d$  можно оптимизировать работу магнитоэлектрического двигателя обеспечивая формирование заданного момента при минимальном токе статора. Этот метод позволяет снижать потери в двигателе, улучшив тем самым энергетические показатели, которые очень важны для электропривода погружных насосов и реализовать таком алгоритм управления.

Фазные токи статора должны быть преобразованы в координатной системе  $q-d$ , вращающейся со скоростью ротора  $\omega_r$ . Значения составляющих  $i_q$  и  $i_d$  представлены ниже:

$$\begin{pmatrix} i_q \\ i_d \end{pmatrix} = I_m \begin{pmatrix} \sin(\gamma) \\ \cos(\gamma) \end{pmatrix}; \quad (4)$$

где  $\gamma$  – угол между полем ротора и фазным током статором;  $I_m$  – полный ток потребления двигателя.

Уравнение электромагнитного момента приводится к виду:

$$M_{\text{ЭМ}} = \frac{3}{2} p \left( \psi_{PM} I_m \sin(\gamma) + \frac{1}{2} (L_d - L_q) I_m^2 \sin(2\gamma) \right). \quad (5)$$

Обеспечение режима постоянства электромагнитного момента производится управлением вектором тока статора, ориентированного по полю. В каче-

стве критерия оптимальности выбран максимум электромагнитного момента, приходящегося на единицу тока потребления в любой момент времени подобно двигателю постоянного тока. Показано, что выбор соответствующего способа управления зависит от конструктивных особенностей двигателя, а также от требуемого диапазона и точности работы двигателя.

В двигателе с радиально-ориентированными магнитами электромагнитный момент однозначно определяется составляющей тока  $i_q$ . При этом инвариантность регулировочных характеристик двигателя достигается при выполнении следующих условий:

$$i_q = I_m; i_d = 0; \gamma = 90^\circ. \quad (6)$$

При этом уравнение электромагнитного момента приводится к виду:

$$M_{\text{эм}} = \frac{3}{2} p \Psi_{\text{пм}} i_q \quad (7)$$

Однако в двигателе с тангенциальной намагниченностью электромагнитный момент вращения двигателя зависит от обоих составляющих тока. Поэтому максимальный электромагнитный момент двигателя при заданной нагрузке может быть получен путем решения следующего уравнения:

$$\frac{dM_{\text{эм}}}{d\gamma} = \frac{3}{2} p \left( \Psi_{\text{пм}} I_m \cos(\gamma) + (L_d - L_q) I_m^2 \cos(2\gamma) \right) = 0 \quad (8)$$

Из (4) и (8), получаем зависимость  $i_q = f(i_d)$ , при которой обеспечивается максимум момента вращения, приходящегося на единицу тока потребления:

$$i_q = \pm \sqrt{\frac{\Psi_{\text{пм}}}{(L_d - L_q)} i_d + i_d^2}. \quad (9)$$

Уравнение (9) определяет кривую максимума момента вращения, приходящегося на единицу тока потребления, и может быть использовано для управления двигателем в области ограничения тока и напряжения.

Погружные насосы чаще всего работают в среде, обладающей ярко выраженными абразивными свойствами. В результате абразивного износа существенно меняются их параметры – уменьшается давление и производительность (расход). Для восстановления производительности приходится производить ремонт насоса, что требует подъема его на поверхность. Подъем насоса это трудоемкая и длительная операция. Для увеличения интервала между подъемами можно увеличить производительность погружного насоса путем увеличения скорости. Такое увеличение частоты вращения будет происходить при постоянстве мощности (если считать что КПД насоса меняется незначительно), и следовательно в этом случае целесообразно применить регулирование с ослаблением поля, т.к. это позволяет снизить установленную мощность регулирующего оборудования. Возможность регулирования с постоянством мощности иллюстрируется рис. 5. Где кривая 1 – характеристика неизношенного насоса. Кривые 2, 3, 4, 5, 6 изменение характеристики по мере износа. Кривая 7 – предельная характеристика при постоянстве мощности.

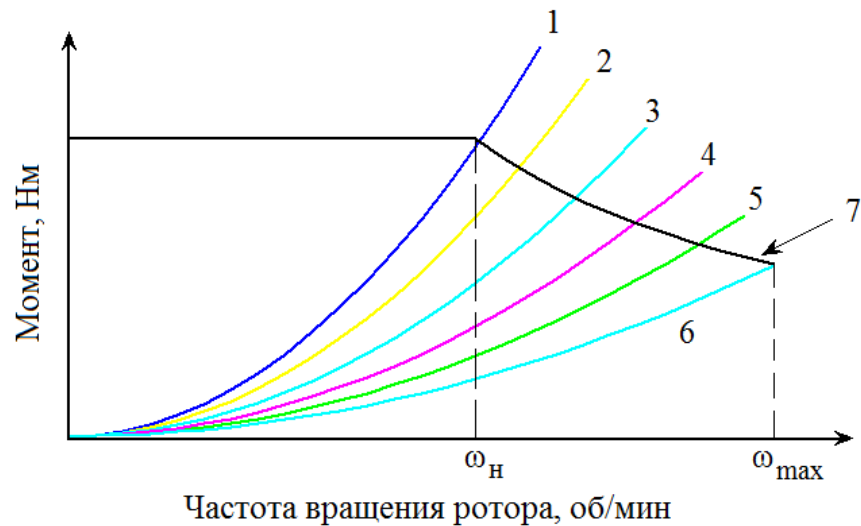


Рис. 5 – Предельная механическая характеристика электропривода погружного насоса с двухзонным управлением

В области ослабления потока угол  $\gamma$  регулируется изменением токов  $i_d$  и  $i_q$  при неизменном токе статора. Угол  $\gamma$  может быть получен как:

$$\gamma = \arctg^{-1} \left( \frac{i_q}{i_d} \right). \quad (10)$$

В последнем разделе проведен анализ характеристик двигателей с тангенциально - и радиально-ориентированными магнитами в различных скоростных режимах при различных значениях сигнала управления электромагнитным моментом. Сигнал управления электромагнитным моментом – это соотношение между заданным электромагнитным моментом и максимальным моментом вращения магнитоэлектрического двигателя. На рис. 6 электромагнитный момент в зависимости от частоты вращения ротора.

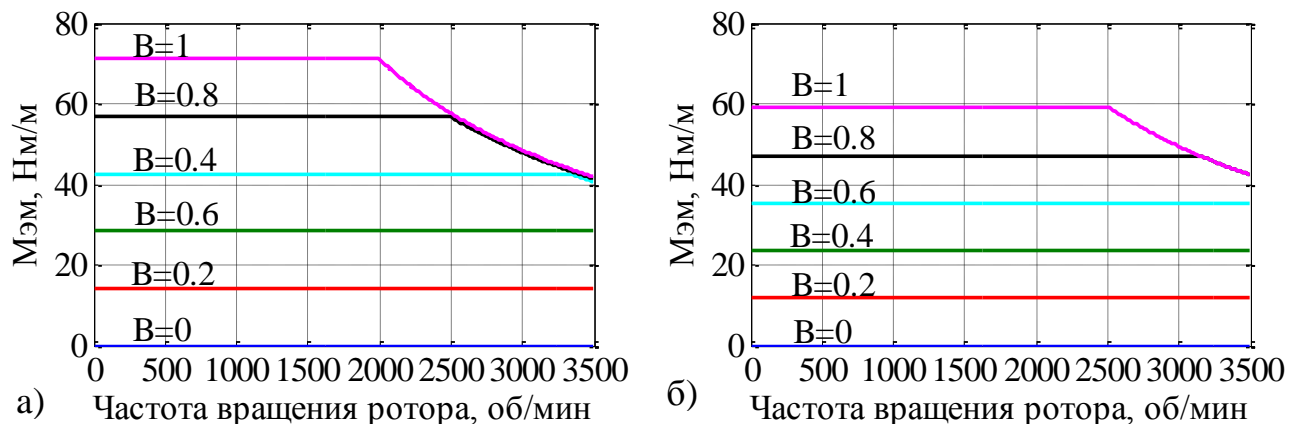


Рис. 6 – Электромагнитный момент в зависимости от частоты вращения ротора при различных значениях сигнала управления электромагнитным моментом: а – ротор коллекторного типа; б – ротор с рад. магнитами

Таким образом, полученные характеристики магнитоэлектрических двигателей в различных скоростных режимах отвечают необходимым условиям для погружных насосов.

**В четвертой главе** исследуется процесс пуска магнитоэлектрического двигателя погружного насоса. Особенностью погружного двигателя является то, что он по ряду причин не имеет датчика положения ротора. Поэтому информация об угловом положении ротора получается косвенным путём. Для анализа процесса пуска разработаны подробные модели электропривода с магнитоэлектрическим двигателем с бездатчиковым векторным управлением в следующем составе: «магнитоэлектрический двигатель – управляемый инвертор – регулятор скорости (ПИ-регулятор) – широтно-импульсная модуляция (ШИМ) регулятора тока – адаптивная система с настраиваемой моделью». Модели составлены для двух типов двигателей – с радиальным и тангенциальным расположением магнитов. Бездатчиковое векторное управление смоделировано на основе адаптивной системы с настраиваемой моделью в соответствии с современными требованиями для погружных насосов. Бездатчиковый электропривод погружного насоса состоит из четырех основных компонентов: электродвигателя с постоянными магнитами, инвертора, блока управления и адаптивной системы с настраиваемой моделью. Управление инвертором осуществляется сигналами, формируемыми блоком на основе ШИМ регулятора тока. ШИМ регулятора тока формирует сигналы управления силовыми ключами инвертора. Реализовано моделирование режима пуска двигателей в режиме постоянства момента (2000 об/мин) и повышенной частоты вращения (2600 об/мин), обеспечиваемой путём ослабления магнитного потока.

В адаптивной системе с настраиваемой моделью вычисление производится одновременно в двух моделях: основной и настраиваемой моделях. Основная модель использует лишь сигналы от токовых электрических переменных статора электродвигателя и не зависит от вычисленного значения скорости вращения. Основной моделью является сам магнитоэлектрический двигатель. Настраиваемая модель кроме электрических переменных статора использует результат оценки искомой переменной (скорости вращения ротора). Настройка системы происходит за счет изменения параметров модели по величине разности вычислений основной и настраиваемой модели, обязательным элементом механизма адаптации является ПИ-регулятор, позволяющий настроить влияние настраиваемой модели. Считается, что истинное значение искомой переменной найдено, если выходные координаты основной и адаптивной модели совпадают.

На рис. 7, 8, 9, и 10 представлены результаты моделирования двигателя с радиально-ориентированными магнитами на роторе при 2000 об/мин. Отметим, что получаемое значение продольной составляющей тока статора  $i_d$  равно нулю с помощью векторного управления током статора. Отметим, что фазные токи не являются синусоидальными в процессе пуска и становятся синусоидальными только в установившемся режиме работы. Представлено изменение во времени электромагнитного момента двигателя и момента нагрузки во время пуска. Пусковой электромагнитный момент больше, чем установившийся электромагнитный момент. Отметим, что момента нагрузки изменяется пропорционально квадрату частоты вращения.

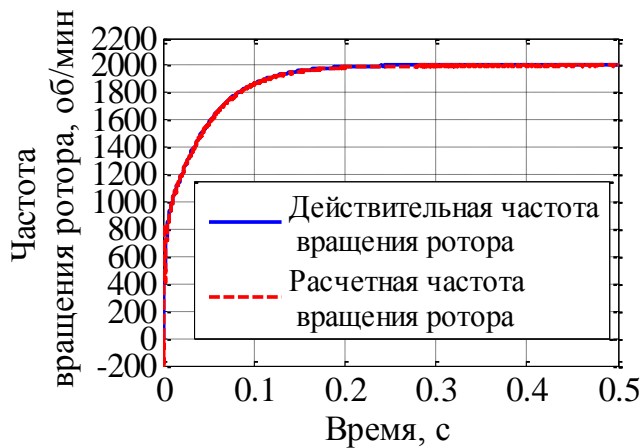


Рис. 7 – Расчетная и действительная частота вращения ротора в зависимости от времени

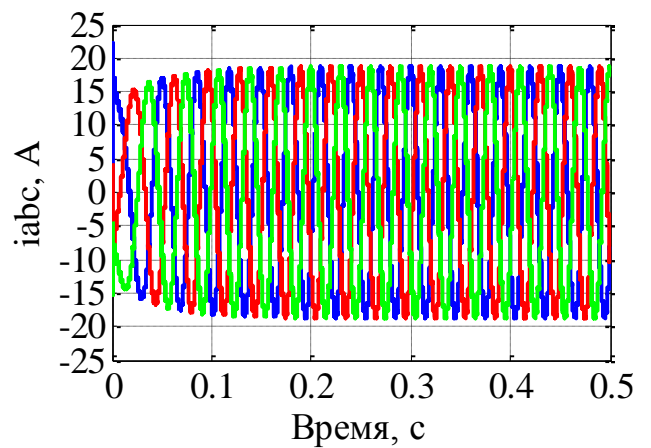


Рис. 8 – Фазные токи в зависимости от времени

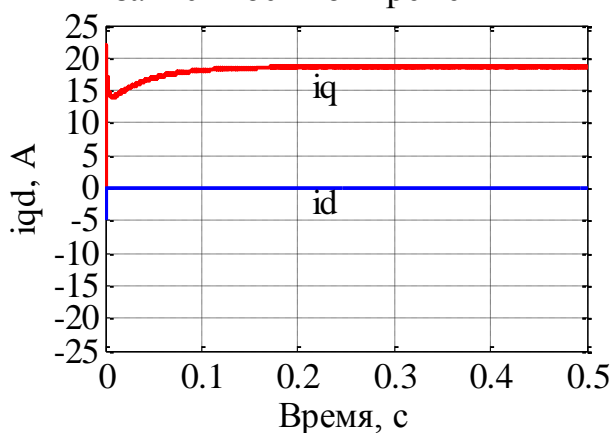


Рис. 9 – Электрические токи осей  $q$  и  $d$  в зависимости от времени

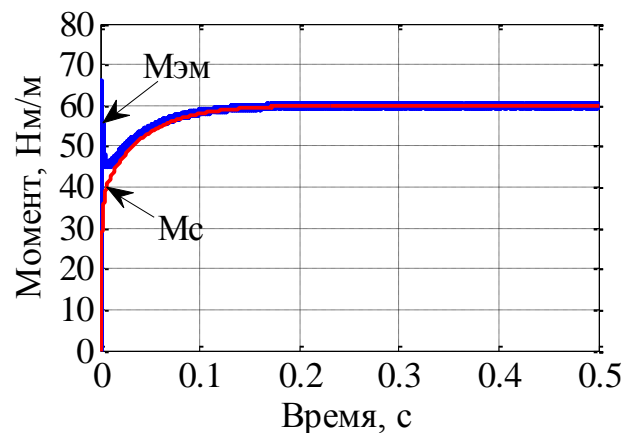


Рис. 10 – Электромагнитный момент и момент нагрузки в зависимости от времени

На рис.11, 12, 13, и 14 представлены результаты моделирования двигателя с тангенциально-ориентированными магнитами при 2000 об/мин. В этом двигателя значение продольной составляющей тока статора  $i_d$  рассчитывается с помощью уравнения (9), и это значение обеспечивает максимум момента вращения, приходящегося на единицу тока потребления.

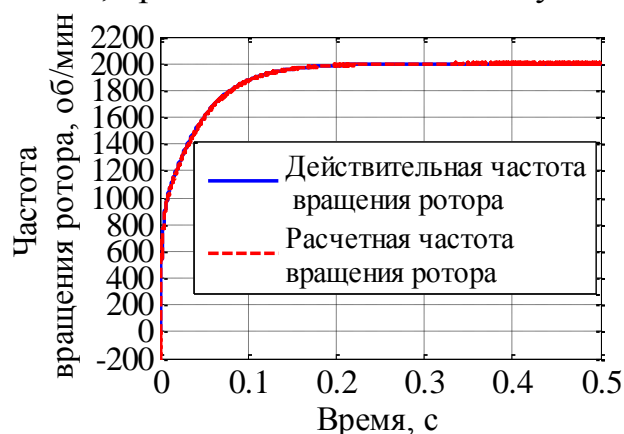


Рис. 11 – Расчетная и действительная частота вращения ротора в зависимости от времени

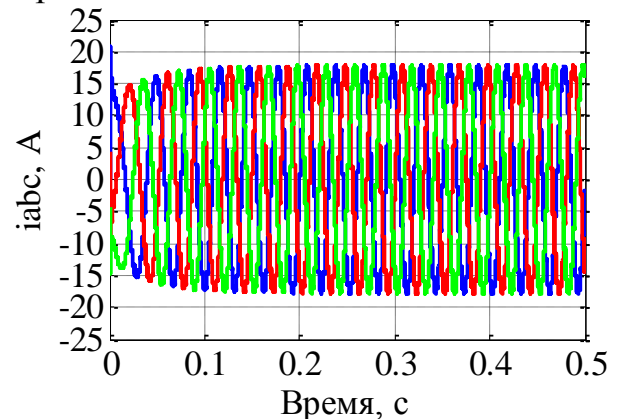


Рис. 12 – Фазные токи в зависимости от времени



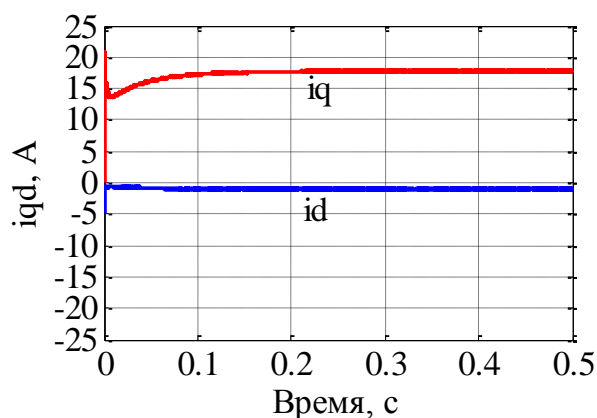


Рис. 13 – Электрические токи осей  $q$  и  $d$  в зависимости от времени

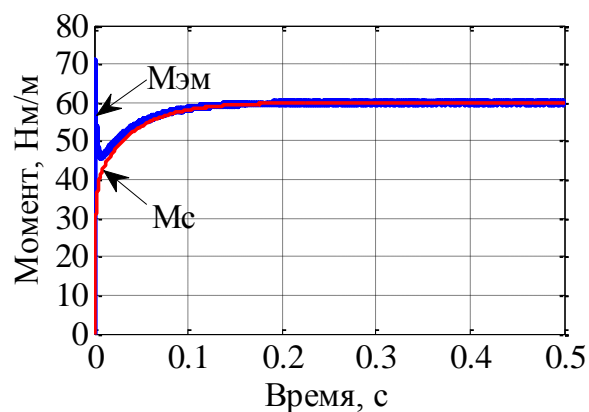


Рис. 14 – Электромагнитный момент и момент нагрузки в зависимости от времени

В главе приведены результаты моделирования процесса пуска двигателей при повышенной частоте вращения ротора. Повышением частоты вращения можно обеспечить сохранение производительности установки при износе насоса, без подъёма его на поверхность.

**В заключении** представлены основные результаты диссертационной работы:

1. Обоснована целесообразность применения многополюсных магнитоэлектрических двигателей с дробными зубцовыми обмотками для электропривода погружных насосов.
2. Исследовано и количественно оценено влияние геометрических размеров статора и ротора, их соотношения, модификаций ротора, насыщения магнитной системы и других факторов на значения электромагнитный момент и величину индуктивных параметров магнитоэлектрических двигателей с дробными зубцовыми обмотками. В работе рассматривались две конструкции индукторов: с внутренним расположением магнитов ориентированных в тангенциальном направлении и с наружным расположением магнитов ориентированных в радиальном направлении.
3. Разработаны математические модели электромагнитных процессов для исследования магнитного поля с учётом реальной геометрии и проектирования погружных магнитоэлектрических двигателей, учитывающие их конструктивные особенности, позволяющие с малыми затратами времени и требуемой точностью.
4. Подробно проведены исследования влияния конструктивного исполнения ротора на магнитное поле, угловые характеристики и индуктивные параметры магнитоэлектрических двигателей с тангенциально - и радиально-ориентированными магнитами при различных значениях коэффициента полюсного перекрытия. Проведён теоретический и практический интерес зависимости максимального момента двигателей от объёма магнитов на роторе при различных значениях коэффициента полюсного перекрытия. Эта зависимость позволяет провести сравнение этих двигателей с различной конструкцией ротора и дать рекомендации для выбора конструктивного испол-

- нения ротора, размеров постоянных магнитов и электромагнитных параметров двигателей с учетом особенностей применения.
5. Разработана математическая модель силовой части и системы управления магнитоэлектрическими двигателями в программе Simulink программного комплекса MatLab, позволяющая проводить анализ процесса пуска работы погружных магнитоэлектрических двигателей.
  6. С использованием разработанной математической модели исследованы магнитоэлектрические двигатели с бездатчиковым способом управления током статора двигателя, отвечающие современным требованиям для электропривода погружных насосов.

**Основные положения диссертации отражены в следующих публикациях:**

Научные публикации по теме диссертации в изданиях рекомендованных ВАК:

1. Шевченко, А. Ф. Векторное управление током статора синхронного двигателя с постоянными магнитами привода погружного насоса /А. Ф. Шевченко, С. А. Абдель Максуд Селим // Научный вестник НГТУ. – Новосибирск 2011. – № 2 (43). – С. 161-174.
2. Шевченко, А. Ф. Характеристики магнитоэлектрического двигателя в допустимых скоростных режимах/А. Ф. Шевченко, С. А. Абдель Максуд Селим // Научный вестник НГТУ. – Новосибирск 2011. – № 2 (43). – С. 175-182.
3. Шевченко, А. Ф. Влияние индуктивных параметров на характеристики магнитоэлектрического двигателя/ А. Ф. Шевченко, В.В. Жуловян, С. А. Абдель Максуд Селим// Доклады академии наук высшей школы Российской Федерации – Новосибирск: НГТУ, 2012 г. – № 1 (18). – С. 141-149.

**Другие научные публикации по теме диссертации:**

4. Torque ripple factor calculation for BLDC motor/ С. А. Абдель Максуд Селим// Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов: Сборник докладов III Всероссийской научно-практической конференции. Томск, 19-21 мая 2010 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. - С. 234-237.[Расчет коэффициента пульсации момента магнитоэлектрического двигателя]
5. Абдель Максуд Селим, С. А. Исследование индуктивных параметров магнитоэлектрического двигателя с дробными зубцовыми обмотками для погружного насоса/ С. А. Абдель Максуд Селим// Наука. Технологии. Инновации: материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 4-х частях. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. Часть 2. – С. 205-206.
6. Абдель Максуд Селим, С. А. Исследование индуктивных параметров и угловых характеристик магнитоэлектрического двигателя с дробными зубцовыми обмотками для погружного насоса/ С. А. Абдель Максуд Селим// Автоматизированные электромеханические системы: сб. научных трудов под общ. ред. В.Н. Аносова.– Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011.– С. 168-177.

7. Абдель Максуд Селим, С. А. Исследование влияния конфигурации магнитной системы на пульсацию электромагнитного момента магнитоэлектрического двигателя с зубцовыми обмотками для электропривода погружных насосов/ С. А. Абдель Максуд Селим// Материалы XVII Междунар. науч.-практ. конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии», Томск: Издательство ТПУ, 2011. Том 1 – С. 522-524.
8. Абдель Максуд Селим, С. А. Исследование влияния конфигурации магнитной системы на электромагнитный момент магнитоэлектрического двигателя с зубцовыми обмотками для электропривода погружных насосов/ С. А. Абдель Максуд Селим// Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции. Томск, 24-26 мая 2011 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – С. 23-27.
9. Improved performance of BLDC motor/ С. А. Абдель Максуд Селим//: Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов: Сборник докладов IV Всероссийской научно-практической конференции. Томск, 24-26 мая 2011 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – С. 297-301.[Улучшенная характеристика магнитоэлектрического двигателя]
10. Абдель Максуд Селим, С. А. Моделирование векторного управления магнитоэлектрическим двигателем с ротором коллекторного типа/ С. А. Абдель Максуд Селим//: Международной молодежной конференции "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика". – 6-8 октября 2011 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. Том 1– С. 108-112.
11. Абдель Максуд Селим, С. А. Исследование влияния конфигурации магнитной системы на индуктивные параметры магнитоэлектрического двигателя с зубцовыми обмотками для электропривода погружных насосов/ С. А. Абдель Максуд Селим// Наука. Технологии. Инновации: материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 6-ти частях, Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. Часть 2. – С. 97-99.

Отпечатано в типографии Новосибирского государственного  
технического университета

630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20  
Формат 60x84/16, объем 1.5 п.л., тираж 100 экз.  
заказ № 767, подписано в печать 02.05.2012г.