ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

На правах рукописи

МОЛОКАНОВ ОЛЕГ НИКОЛАЕВИЧ

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЁТА И АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОНСТРУКЦИЙ БЕСКОНТАКТНЫХ МАГНИТНЫХ ПЕРЕДАЧ

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук
с. н. с. Курбатов П. А.

Москва – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4
ГЛАВА 1. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТОПОЛОГИЙ МАГНИТНЫХ ПЕРЕДАЧ 13
1.1 Магнитные аналоги зубчатых передач 13
1.2 Коаксиальная планетарная магнитная передача 30
1.3 Достигнутые параметры коаксиальной планетарной магнитной передачи 36
1.4 Выбор направления исследования 39
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1 40
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОЙ ПЕРЕДАЧИ 41
2.1 Выбор метода моделирования магнитного поля 41
2.2 Параметры магнитной системы 42
2.3 Представление магнитной передачи в виде расчётной модели 46
2.4 Моделирование электромагнитных процессов в магнитной передаче в статическом режиме 49
2.5 Моделирование электромагнитных процессов в магнитной передаче в рабочем режиме 67
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2 89
ГЛАВА 3. ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МАГНИТНОЙ ПЕРЕДАЧИ 90
3.1 Анализ динамических уравнений магнитной передачи 90
3.2 Методика составления математической макромодели в Matlab/Simulink 94
3.3 Методика определения параметров макромодели 95
3.4 Результаты моделирования механических процессов 97
3.5 Методика составления линеаризованной динамической модели 101
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3 109

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И МЕТОДИКИ ИСПЫТАНИЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА МАГНИТНОЙ ПЕРЕДАЧИ 110
4.1 Общее описание конструкции экспериментального образца 110
4.2 Методика и результаты измерения максимального момента 113
4.3 Методика и результаты измерения момента трогания 115
4.4 Методика и результаты измерения передаточного отношения по углу поворота 117
4.5 Методика и результаты измерения передаточного отношения магнитной передачи по моменту 118
4.6 Методика и результаты определения потерь мощности 119
4.7 Методика и результаты исследования работы магнитной передачи в рабочем режиме 124
4.8 Результаты разработки магнитной системы магнитной передачи для скважинного винтового насоса 126
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4 130
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 131
Список сокращений и условных обозначений 132
Список литературы 135
ПРИЛОЖЕНИЕ А 148
ПРИЛОЖЕНИЕ Б 149
ПРИЛОЖЕНИЕ В 150
ПРИЛОЖЕНИЕ Г 151
ПРИЛОЖЕНИЕ Д 152
ПРИЛОЖЕНИЕ Е 153

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Удельные массогабаритные показатели электрической машины в большой степени зависят от номинальной частоты вращения ротора, чем больше частота вращения, тем меньше габариты электрической машины. Возможность выбора номинальной частоты вращения из широкого диапазона, при проектировании электрической машины, позволяет получить оптимальные массогабаритные и стоимостные показатели электроустановки в целом [1, 2]. Однако номинальная частота вращения зачастую определяется не столько стремлением создать оптимальную электрическую машину, сколько требованиями потребителя механической энергии в случае электродвигателя или её источника в случае электрогенератора. Такие области применения электрических машин как ветроэнергетика, автомобилестроение, кораблестроение, нефтедобыча и ряд других характеризуются крайне низкими частотами вращения, находящимися на уровне десятков оборотов в минуту. В этих случаях прямое соединение вала электрической машины с нагрузкой становится экономически невыгодным, а зачастую и попросту невозможным. К примеру, существующая тенденция к увеличению мощности единичной установки в ветроэнергетике потребовала отказа от прямого привода электрогенератора ветряной турбины из-за возрастания массогабаритных показателей генератора до значений, затрудняющих транспортировку и монтаж такой электрической машины [3]. Аналогичная ситуация наблюдается и в области нефтедобычи из скважин с малым дебетом, где используются низкоскоростные винтовые насосы. Так как габаритный размер корпуса приводного двигателя ограничен диаметром скважины, то для развития необходимого электромагнитного момента длина двигателя может достигать десятка метров, что ухудшает эксплуатационные характеристики. Снижение массогабаритных показателей электрических машин в подобных случаях возможно только путём значительного увеличения их номинальной частоты вращения, что ведёт к необходимости использования зубчатых передач в качестве согласующего устройства между двигателем и

нагрузкой. Эффективность такого подхода обусловлена тем, что номинальный механический момент зубчатой передачи, отнесённый к объёму её активных материалов, более чем в два раза выше по сравнению с современной синхронной электрической машиной с возбуждением от постоянных магнитов [2, 4]. За счёт этого обеспечиваются лучшие массогабаритные показатели комплекса высокоскоростная электрическая машина-зубчатый редуктор по сравнению с системой прямого привода. Однако наличие зубчатого зацепления в механических трансмиссиях влечёт за собой ряд недостатков, таких как низкая надёжность, необходимость смазки и периодического обслуживания, пожароопасность, высокий уровень шума, а также низкая перегрузочная способность. Создание новых согласующих устройств, которые не имеют указанных недостатков и сохраняют преимущества зубчатых передач, представляет актуальную задачу электромеханики. Одним из таких устройств является магнитная передача, в которой момент передаётся не за счёт зубчатого зацепления, а посредством силового взаимодействия магнитных полей. Это делает возможным бесконтактное преобразование скорости и момента, благодаря чему магнитные передачи сокращают характерные для их зубчатых аналогов недостатки, сохраняя при этом сопоставимые с ними массогабаритные показатели [4].

В энергетических установках с установленной мощностью в несколько мегаватт, например в ветроэнергетике, применение магнитных передач вместо зубчатых может быть направлено на достижение технических преимуществ и преодоление существующих в отечественной промышленности технологических трудностей производства качественных зубчатых колёс большого диаметра для редукторов мультимегаваттного класса [5, 6]. Сложная технология производства зубчатых редукторов повышает риски применения этих устройств и увеличивает зависимость от импорта [7, 8]. В то же время производство магнитных передач как электромеханических устройств не требует освоения передовых технологий в механообработке и может быть осуществлено на имеющейся в России базе по производству электрических машин.

Степень разработанности темы исследования. Впервые идея создания бесконтактных магнитных передач возникла в начале XX века [9]. Однако долгое время они не привлекали внимание инженеров, что связано со сложностями в технической реализации и низкими массогабаритными показателями первых магнитных передач. С развитием технологии производства электрических машин и появлением редкоземельных постоянных магнитов с высокой плотностью энергии в конце 60-х гг. XX века вновь возник интерес к созданию магнитных передач. Значительный вклад в исследование магнитных передач в отечественной электротехнике внесла научная группа под руководством Ганзбурга Л. Б (СССР) [10, 11], результаты исследования которой изложены в трудах Рейфе Е. Д. [12] и Вейца В. Л. [13], посвящённых вопросам теории проектирования синхронных магнитных механизмов, к числу которых авторами относятся и магнитные редукторы. Однако, доступные в то время магнитные материалы и методы анализа электромагнитных процессов не позволили создать эффективное устройство, способное в полной мере конкурировать с зубчатыми передачами по массогабаритным показателям.

Зарубежные учёные начали активно изучать магнитные передачи в начале 2000-х гг. [14]. Исследования в этой области выполнялись научной группой под руководством Аталлаха Каиса из университета Шеффилда (Великобритания). В дальнейшем на их базе было создано единственное известное коммерческое предприятие *Magnomatics LTD*, продукцией которой являются магнитные передачи и электрические машины на их основе [15]. Участники этой научной группы впервые показали эффективность применения магнитных передач и тем самым привлекли внимание к проблемам проектирования таких устройств. В настоящее время над вопросами разработки магнитных передач работают несколько зарубежных научных групп. Наиболее заметные из них: научная группа под руководством Питера Расмуссена из университета г. Ольборга (Дания), Роджера Ванга из университета г. Стелленбоса (ЮАР) и Николаса Франка из университета Техаса (США). Несмотря на значительное число имеющихся современных зарубежных публикаций по магнитным передачам, в большинстве своём они носят

описательный характер и не затрагивают особенностей физических процессов, вопросов разработки методик проектирования таких устройств и конструктивных решений. Основная методическая проблема при создании магнитных передач состоит в необходимости глубокого и точного анализа сложных электромагнитных и механических процессов, которые определяют их коэффициент полезного действия и технико-экономическую эффективность. Существующие отечественные методики проектирования [12] относятся к 1970-м годам и требуют значительной переработки с учётом последних достижений как в области материаловедения, так и в области методов расчёта магнитных систем. Кроме того, в современной отечественной литературе не встречалось описание опыта создания прототипа магнитной передачи.

Объектом исследования являются бесконтактные магнитные передачи.

Предметом исследования являются электромагнитные и механические процессы в магнитных передачах, определяющие их эффективность.

Целью диссертационной работы является разработка методической базы для проектирования магнитных передач, позволяющая ускорить и расширить их внедрение в промышленность.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. выполнить критический анализ известных конструкций магнитных передач и методик их расчёта, а также определить существующие методические проблемы, возникающие при разработке магнитных передач;

2. разработать методику для более глубокого анализа электромагнитных и механических процессов в магнитных передачах и на её основе составить математические модели для расчётов динамики работы устройства в составе различных электромеханических систем;

3. выполнить расчётно-теоретические исследования электромагнитных и механических процессов в магнитных передачах и получить количественные оценки влияния различных факторов на коэффициент полезного действия и технико-экономическую эффективность;

4. разработать и изготовить экспериментальный лабораторный образец магнитной передачи, на котором выполнить необходимые экспериментальные исследования с целью подтверждения достоверности данных расчётов, полученных по разработанным уточнённым математическим моделям;

5. выполнить проектирование прототипа промышленного образца магнитной передачи для скважинного винтового нефтяного насоса и оценить его основные технические показатели;

6. на основе полученных данных исследований сделать обоснованные выводы о перспективности применения магнитных передач в промышленных электромеханических системах.

Методы решения поставленных задач. Для решения поставленных задач использованы численные методы моделирования стационарных и нестационарных электромагнитных полей, методы макроскопического моделирования физических процессов, а также экспериментальные исследования на лабораторном образце магнитной передачи.

В результате выполненной работы были получены следующие **новые научные результаты:**

1. методика более глубокого анализа электромагнитных и механических процессов и составленные на её основе новые математические модели для расчётов статических и динамических характеристик магнитных передач в составе различных электромеханических систем, отличающиеся от известных более подробным учётом топографии магнитного поля, распределений индуцированных токов, конструктивных параметров и магнитных свойств материалов;

2. данные и выводы из теоретического анализа электромагнитных и механических процессов, позволившие расширить знания о магнитных передачах, определить их предельные технические характеристики, требования к конструктивному исполнению для достижения высоких значений КПД и технико-экономической эффективности;

3. методика экспериментальных исследований, состоящая из набора опытов для определения основных параметров магнитной передачи, которая позволила подтвердить достоверность данных расчётов по разработанным моделям и обоснованность принятых конструктивных решений;

4. обоснованные выводы о перспективности применения магнитных передач в промышленных электромеханических системах.

Достоверность полученных результатов обусловлена применением строго обоснованных математических методов анализа физических процессов, соответствием полученных в диссертационной работе теоретических и экспериментальных данных, согласованности их с выводами в отечественных и зарубежных научно-технических публикациях, положительными результатами дискуссий по представленным докладам на ряде отечественных и зарубежных научно-технических конференций.

Практическая значимость:

1. созданные в результате выполнения диссертационной работы математические модели и методики, подтверждённые экспериментальными исследованиями, составляют методическую базу для проектирования промышленных магнитных передач;

2. полученные оценки предельных удельных технических параметров магнитных передач позволяют обоснованно давать рекомендации по применению этих устройств;

3. реализованный в экспериментальном образце магнитной передачи практический задел конструкторско-технологических решений даёт основу для дальнейших разработок;

4. разработанный по предложенной методике проект промышленного магнитного редуктора для скважинного винтового насоса для ООО «Производственной компании «Борец» позволяет снизить массогабаритные показатели привода насоса.

Личный вклад автора. Выполнение всех представленных в работе расчётов, составление математических моделей и разработка методики проектирования, а также основное участие в проведении экспериментальных исследований, разработке конструкции экспериментального лабораторного образца магнитной передачи и магнитного редуктора для скважинного винтового насоса.

Апробация работы. Научные результаты и положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-практических конференциях:

II Международная конференция «IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conference», 5 – 8 декабря 2016 г., Новая Зеландия, г. Окленд;

XX Международная конференция по постоянным магнитам, 21 – 25 сентября 2015 г., г. Суздаль;

XVIII Международная конференция «International Conference on Electrical Machines and Systems», 28 – 28 октября 2015 г., Таиланд, г. Паттайя;

XVIII Международный симпозиум «International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies», 29 – 31 мая 2014 г., Болгария, г. Бургас;

Международная научно-техническая конференция «Инновационное развитие нефтегазового комплекса Казахстана», 25 – 26 мая 2013 г., г. Актау;

XIX Международная конференция по постоянным магнитам, 23 – 27 сентября 2013 г., г. Суздаль;

XI Международная научно конференция студентов и аспирантов «Students' Science Conference», 3 – 6 октября 2013 г., Польша, Бедлево;

XIV Международная конференция «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты», 23 – 29 сентября 2012 г., г. Алушта;

Две международные научно-технические конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» г. Москва: МКРЭЭ – 2012, МКРЭЭ – 2013.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 14 печатных работ: из них 2 статьи из перечня ВАК, 3 статьи, входящих в международную базу цитирования *Scopus*, 7 тезисов докладов в сборниках трудов международных конференций, 2 патента на полезную модель.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 142 наименований и шести приложений. Общий объём работы составляет 153 страницы машинописного текста, в диссертации содержится 79 рисунков и семь таблиц.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. математические модели и методика для анализа электромагнитных и механических процессов, расчётов статических и динамических характеристик магнитной передачи. Методика определения параметров моделей на основе анализа электромагнитного поля;

2. результаты теоретического анализа электромагнитных и механических процессов, расширяющие знания о магнитных передачах и их предельных технических характеристиках;

3. методика проведения и результаты экспериментальных исследований лабораторного образца магнитной передачи, подтверждающие данные теоретических исследований;

4. требования к конструктивному исполнению для достижения высоких значений КПД магнитной передачи и конструктивные решения, применённые в экспериментальном лабораторном образце магнитной передачи и разработанном прототипе промышленного магнитного редуктора для скважинного винтового насоса;

5. выводы о перспективности применения магнитных передач в промышленных электромеханических системах.

В **первой** главе анализируются известные топологии магнитных передач на базе выполненного обзора научно-технических публикаций по теме исследования. Сформулированы предельные технические характеристики магнитных передач и основные особенности каждой из конструкций. Обоснована необходимость исследования коаксиальных планетарных магнитных передач, отмечена перспективность их применения в электромеханических системах и актуальность создания методики для анализа электромагнитных и механических процессов.

Во **второй** главе представлены математические модели магнитных передач и методика для анализа электромагнитных процессов в статическом и рабочем режимах. Получены и проанализированы результаты теоретического анализа магнитной передачи, на основании которых сформулированы требования к конструктивному исполнению магнитных передач для достижения высоких значений КПД.

Предложена и подтверждена результатами моделирования методика по определению периода основной гармоники реактивного момента в коаксиальной планетарной магнитной передачи.

С помощью разработанных методик и математических моделей выполнен расчёт характеристик экспериментального образца магнитной передачи.

В **третьей** главе разработаны математические макромодели для расчёта динамических механических процессов в магнитной передаче и методика определения их параметров на основе данных полевого расчёта. Разработана методика определения параметров свободных колебаний. Приведены результаты расчётов магнитной передачи в переходных режимах.

В **четвёртой** главе приведены конструктивные решения, применённые в экспериментальном лабораторном образце магнитной передачи и разработанном прототипе промышленного магнитного редуктора для скважинного винтового насоса. Представлена методика проведения и результаты испытаний лабораторного образца магнитной передачи, подтвердившие правильность разработанных математических моделей.

ГЛАВА 1. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТОПОЛОГИЙ МАГНИТНЫХ ПЕРЕДАЧ

1.1 Магнитные аналоги зубчатых передач

Схемы механизмов, включающих в себя зубчатые передачи, были представлены уже в работах античных авторов [16]. В настоящее время производство зубчатых передач имеет промышленные масштабы, а теория их расчёта постоянно совершенствуется [17]. Однако, несмотря на неоспоримые преимущества, которые обеспечивает использование зубчатых передач в технических устройствах, они имеют ряд недостатков, таких как высокий уровень шума, низкую надёжность, необходимость в смазке, а также низкую перегрузочную способность [18]. Перечисленные недостатки связаны с самим принципом действия этих устройств, заключающимся в преобразовании параметров движения за счёт зубчатого зацепления, и поэтому непреодолимы в рамках зубчатой передачи. В начале двадцатого столетия Чарльзом Армстронгом (США) была подана заявка на патент, в котором описывалось устройство для бесконтактного преобразования вращательного движения посредством электромагнитного силового взаимодействия [9]. Данное устройство стало первым запатентованным магнитным редуктором, за основу которого была взята цилиндрическая зубчатая передача. Несмотря на имеющиеся у данного изобретения недостатки, этот принципиально новый подход в создании устройств для преобразования параметров движения дал начало череде изобретений. Часть этих изобретений касалась совершенствования конструкции Армстронга, в то время как другие изобретатели предлагали устройства совершенно новых топологий, некоторым из которых не существует аналогов среди зубчатых передач. Систематическое изучение магнитных передач в СССР началось с 1960 г. научной группой под руководством Ганзбурга Л. Б. [19].

В теории расчёта зубчатых передач принят ряд терминов, содержащихся в ГОСТ 16530–83 «Передачи зубчатые. Общие термины, определения и

обозначения» [20]. В этом стандарте даётся определение терминам зубчатая передача, зубчатое колесо, цилиндрическая зубчатая передача и т. д. В связи с отсутствием единой принятой терминологии по магнитным передачам далее эквивалентные термины из ГОСТ 16530–83 употребляются с заменой определения «зубчатый» на «магнитный»: магнитная передача, магнитное колесо, цилиндрическая магнитная передача и т. д. Такая замена сделана для отражения природы возникновения усилия в месте «зацепления». Для некоторых понятий в теории зубчатых передач таких как, например, червяк, червячное колесо, определение «зубчатый» опускается. В этом случае для магнитных передач определение «магнитный» добавляется искусственно, например, магнитный червяк, магнитное червяное колесо, и т. д.

В качестве основного критерия оценки магнитных передач выбрана плотность момента, определяемая как отношение максимального электромагнитного момента магнитной передачи к занимаемому объёму её активных частей. В отечественной литературе этот параметр известен также как машинная постоянная Эссена [1]. Плотность момента позволяет оценить эффективность магнитной системы для создания силового взаимодействия. В качестве количественных ориентиров по значениям плотности момента можно принять следующие устройства:

– магнитные муфты на постоянных магнитах имеют плотность момента до 400 кН·м/м^3 [21]. Данная плотность момента является теоретическим верхним пределом для магнитных передач, так как конструкция магнитной системы магнитной муфты обеспечивает наилучшую магнитную связь вращающихся частей и может рассматриваться как идеальная магнитная передача с передаточным отношением равным единице;

– зубчатые планетарные передачи имеют максимальную теоретически возможную плотность момента около 1000 кН·м/м^3, однако во избежание срезания зубцов в реальных устройствах принимается ряд коэффициентов запаса, снижающих плотность момента в среднем до 150 кН·м/м^3 [4, 21] и ниже [23];

– синхронная электрическая машина с возбуждением от постоянных магнитов и естественным воздушным охлаждением имеет плотность момента около 10 кН·м/м^3 [24, 25].

Цилиндрическая магнитная передача. Первые попытки создания магнитных передач заключались в использовании известных топологий зубчатых передач и замены зубчатого зацепления силой взаимодействия магнитных полей. Так, первая изобретённая в 1900 г. Чарльзом Армстронгом (США) магнитная передача [9] была основана на цилиндрической зубчатой передаче.

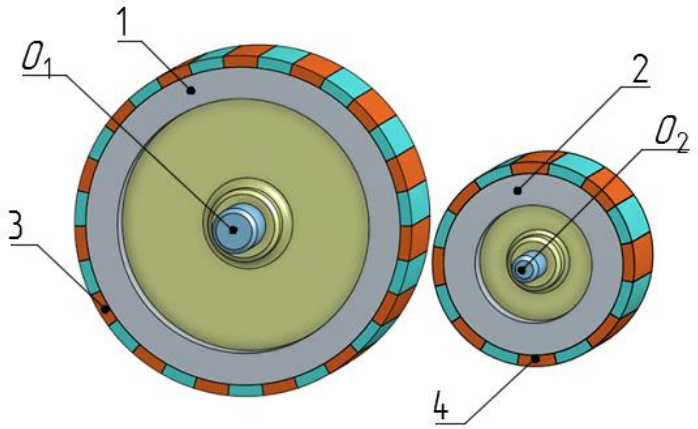


Рисунок 1 – Принципиальная схема цилиндрической магнитной передачи:
1, 2 – магнитопроводы; 3, 4 – радиально намагниченные постоянные магниты; O_1, O_2 – оси вращения

Цилиндрическая магнитная передача (рисунок 1) состоит из низкоскоростного и высокоскоростного магнитных колёс с осями вращения O_1 и O_2 соответственно. Магнитные колёса, в свою очередь, представляют собой магнитопроводы 1 и 2, на которые установлены радиально намагниченные постоянные магниты или электромагниты чередующейся полярности 3, 4. Полюсные деления обоих магнитных колёс равны между собой, а отношение их диаметров равно отношению числа пар полюсов на них. Передаточное отношение цилиндрической магнитной передачи определяется как

$$i = \frac{p_{\text{н}}}{p_{\text{в}}}, \qquad (1)$$

где $p_{\text{н}}$ — число пар полюсов на низкоскоростном магнитном колесе;

$p_{\text{в}}$ — число пар полюсов на высокоскоростном магнитном колесе.

Устройство Армстронга имело электромагнитное возбуждение одного из магнитных колёс, которое осуществлялось через щёточно-коллекторный узел, что определяло низкую энергетическую эффективность устройства. К тому же схема реализации электромагнитного возбуждения подразумевала одновременную работу всех катушек возбуждения, в то время как максимальную роль в силовом взаимодействии имеют только катушки, находящиеся вблизи зоны магнитного зацепления. Недостатки конструкции Армстронга частично преодолены Эриком Торденом (США) [26] добавлением специального магнитопровода, который обеспечивает расширение зоны зацепления, а также применением постоянных магнитов вместо электромагнитного возбуждения. Дальнейшее развития цилиндрической топологии магнитной передачи связано с изобретениями Леона Девона (США) [27], в котором он описывает цилиндрических магнитную передачу с перпендикулярными осями магнитных колёс, Макс Бермана (Германия), впервые запатентовавшего ременную цилиндрическую магнитную передачу [28], в которой за счёт применения магнитных колёс и магнитного ремня повышается сила сцепления между ними по сравнению с обычной механической ременной передачей.

Для расширения зоны взаимодействия более эффективно использовать не внешнее, а внутреннее зацепление магнитных колёс, что обосновано Федотовым А. И. [29] (СССР) наряду с идеей выполнения внутреннего магнитного колеса из эластичного материала. Существует также возможность увеличения силы взаимодействия между зубцами за счёт помещения их в магнитную жидкость, что было предложено Бансевичусом Р. Ю. (СССР) [30].

Характерной особенностью магнитной передачи является то, что при превышении моментом привода некоторого максимального значения происходит её проскальзывание подобно «срыву» магнитной муфты, что прерывает передачу мощности от ведущего к ведомому магнитному колесу. Это может быть недопустимо для некоторых применений, требующих высокой надёжности. В связи с этим Гарольд Фаус (США) предложил устройство [31], которое представляет собой гибрид цилиндрической магнитной и зубчатой передач,

отличительной особенностью которого является конструкция с тангенциально намагниченными постоянными магнитами, обеспечивавшая с одной стороны лучшие по сравнению с вариантом Армстронга [9] удельные силовые характеристики, а с другой стороны позволяющая при превышении электромагнитным моментом своего максимального значения передавать часть усилия за счёт механического зацепления.

Замена зубчатого зацепления магнитным открывает широкие возможности по регулированию передаточного отношения цилиндрических магнитных передач при помощи изменения чисел пар полюсов на магнитных колёсах. Так Химан Хурвитз (США) впервые запатентовал многоступенчатую цилиндрическую магнитную передачу [32] с независимым электромагнитным возбуждением для каждой из ступеней. Ступени соединены между собой параллельно таким образом, что передаточное отношение устройства может регулироваться путём активации той или иной ступени. Другое техническое решение было предложено Джонатаном Клюеном (Голландия) [33], в котором предлагается использовать составное магнитное колесо, которое представляет собой несколько соединённых по торцам элементарных магнитных колёс одинакового диаметра, но с различными числами пар полюсов. Регулировка передаточного отношения осуществляется при помощи осевого перемещения одного из магнитных колёс магнитной передачи. Похожий способ регулирования передаточного отношения предлагался Сидни Рэндом (США) [34]. Однако изменение числа пар полюсов на одном из магнитных колёс осуществляется путём изменения схемы соединения катушек возбуждения при помощи их коммутации электронными ключами. Ещё один принцип регулирования передаточного отношения, но для цилиндрической магнитной передачи с перпендикулярными осями, был предложен Киясбейли А. Ш. (СССР) [35]. В этом устройстве одно из магнитных колёс выполнено в виде диска с концентрическими магнитными дорожками с разным числом пар полюсов, а регулирование передаточного отношения осуществляется при помощи перемещения другого магнитного колеса между дорожками.

За счёт отсутствия механической связи между магнитными колёсами становится возможным передавать движение в герметичные объёмы. Конструктивные особенности такого устройства описаны Максом Хэтзелом (Швейцария) [36].

Магнитная передача имеет малую по сравнению с зубчатыми передачами торсионную жёсткость, представляя собой упругий элемент, что отрицательно сказывается на её динамических характеристиках. Для увеличения торсионной жёсткости магнитной передачи Ганзбургом Л. Б. (СССР) было предложено техническое решение, согласно которому цилиндрическая магнитная передача состоит из двух ступеней, которые смещены друг относительно друга на определённый угол.

Анализ публикаций показал следующие достигнутые удельные параметры магнитных передач. Для реактивной цилиндрической магнитной передачи с внутренним зацеплением и электромагнитным возбуждением, представленной в [14], с диаметром внешнего магнитного колеса 227 мм, аксиальной длиной 220 мм плотность момента составила 0,5 кН·м/м^3. В [37] приведены данные испытаний цилиндрической магнитной передачи с передаточным отношением равным трём, с постоянными магнитами из сплава самарий-кобальт. Экспериментально получен максимальный электромагнитный момент равный 5,5 Н·м при плотности момента 1,5 кН·м/м^3. В [38] осуществлено моделирование цилиндрической магнитной передачи при помощи метода конечных элементов. Магнитная передача состоит из двух колец радиусом 200 мм и аксиальной длиной 60 мм, выполненных из магнитомягкого материала, с установленными на их поверхности постоянными магнитами из сплава неодим-железо-бор. Передаточное число равно единице. Максимальный электромагнитный момент составил 32 Н·м, что даёт плотность момента 2 кН·м/м^3. В [39] проведено моделирование цилиндрической магнитной передачи с перпендикулярными осями и единичным передаточным числом. Магнитные колёса представляют собой усечённые конусы с радиусами оснований 22,4 мм и 43,6 мм и аксиальной длиной 21,2 мм. Возбуждение осуществлялось при помощи постоянных магнитов из сплава неодим-железо-бор с энергетическим

произведением 2,5 Дж/м^3. Экспериментально измеренный момент составил 60 Н·м, что соответствует максимальной плотности момента 4,6 кН·м/м^3. В диссертации [22] проведены аналитический расчёт цилиндрической магнитной передачи и оптимизация её размеров с целью максимизации плотности момента. Возбуждение осуществлялось от постоянных магнитов из сплава неодим-железо-бор. В результате максимальная плотность момента для оптимальных геометрических соотношений составила 34,6 кН·м/м^3.

Основной особенностью цилиндрической магнитной передачи, которую отмечают многие авторы, является то, что в каждый момент времени в создании электромагнитного момента участвует лишь пара полюсов магнитных колёс, находящаяся в области зацепления или хотя бы в непосредственной близости от неё. Остальные полюса магнитных колёс в силовом взаимодействии не участвуют, что приводит к крайне неэффективному использованию магнитных материалов и низкой плотности момента. Степень неэффективности растёт с увеличением передаточного отношения за счёт увеличения разности диаметров магнитных колёс. Решением этой проблемы является использование внутреннего зацепления. Однако максимальная эффективность в использовании магнитных материалов в этом случае достигается лишь при близких диаметрах магнитных колёс, что значительно понижает передаточное отношение устройства. Количественные оценки эффектов от многих запатентованных и описанных выше конструктивных технических решений в научно-технических статьях не представлена.

Червячная магнитная передача. Червячные зубчатые передачи характеризуются возможностью получения передаточного отношения вплоть до нескольких сотен в одной ступени [40]. Ценой за эту возможность является низкий КПД и невысокая надёжность, которые определяются высоким коэффициентом трения между червяком и червячным колесом. Замена зубчатого зацепления на магнитное позволило бы преодолеть эти недостатки, сохраняя при этом преимущества данной кинематической схемы.

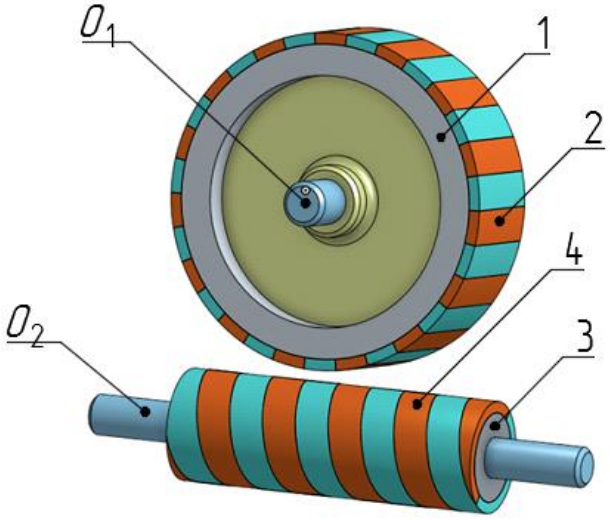


Рисунок 2 – Принципиальная схема червячной магнитной передачи:
1, 2 – магнитопровод и радиально намагниченные ПМ магнитного червячного колеса; 3, 4 – магнитопровод и радиально намагниченные ПМ магнитного червяка; O_1, O_2 – оси вращения

Червячная магнитная передача (рисунок 2) состоит из магнитного червячного колеса с осью O_1 и магнитного червяка с осью O_2. Магнитное червячное колесо состоит из цилиндрического магнитопровода 1 с установленными на его поверхности радиально намагниченными постоянными магнитами 2. В перпендикулярной плоскости к магнитному червячному колесу располагается магнитный червяк, состоящий из цилиндрического магнитопровода 3, на котором установлены радиально намагниченные постоянные магниты 4, образующие спиральную структуру. Для корректной работы устройства шаг спирали магнитного червяка должен быть равен полюсному делению магнитного червячного колеса. При выполнении этого соотношения передаточное отношение магнитной червячной передачи определяется через число пар полюсов на червячном колесе

$$i = \frac{1}{p_н}, \tag{2}$$

где $p_н$ — число пар полюсов на низкоскоростном магнитном колесе (червячном магнитном колесе).

Начало развития этой топологии магнитной передачи дал Джулес Лекоше (Великобритания) [41]. В своём изобретении автор предлагает вариант создания такого червячного редуктора, в котором усилие или его часть передаётся не за счёт механического контакта, а за счёт электромагнитной силы. Для реализации этой

идеи предлагается выполнить модификацию зубчатого червячного редуктора, а именно разместить соосно с червяком катушку возбуждения так, чтобы витки червяка стали намагничены. Одна половина зубца червячного колеса изготавливается из магнитного материала, а другая из немагнитного, в результате чего в месте зацепления действуют две противоположно направленные силы — механическая сила взаимодействия между червяком и червячным колесом и магнитная сила. Вследствие этого уменьшается сила трения между червяком и немагнитной частью зубца червячного колеса. Для заданной нагрузки возможно подобрать такой ток в катушке возбуждения, при котором всё усилие будет передаваться за счёт электромагнитной силы, делая такую червячную передачу полностью бесконтактной. Стремясь увеличить максимальный электромагнитный момент устройства, Хуг Столлер (США) [42] предложил использовать постоянные магниты в магнитном червячном колесе совместно с электромагнитным возбуждением самого червяка. В дальнейшем Харольдом Фаусом (США) в [31] была предложена конструкция, в которой постоянные магниты содержались не только в магнитном червячном колесе, но и в магнитном червяке, что значительно увеличило как передаваемый момент, так и КПД устройства. В магнитной передаче увеличение площади взаимодействия магнитного червяка и червячного колеса ведёт к увеличению максимального электромагнитного момента и не оказывает значительного влияния на КПД. По этой причине Кощеевым Л. Г. (СССР 1959) [43] и Свечарником Д. В. (СССР) [44] была предложена конструкция червячной передачи, в которой магнитное червячное колесо выполнено таким образом, что охватывает магнитный червяк, увеличивая тем самым электромагнитную силу посредством увеличения площади поверхности взаимодействия. Кроме того, Кощеевым Л. Г. предложен способ размещения катушки возбуждения на магнитном червячном колесе [43].

В [45] произведён аналитический расчёт, а также экспериментальные исследования червячной магнитной передачи с передаточным отношением 33. Магнитное червячное колесо выполнено охватывающим магнитный червяк, а для возбуждения использовались постоянные магниты из сплава самарий-кобальт с

остаточной магнитной индукцией 0,2 Т. Диаметр червячного колеса 364 мм, диаметр магнитного червяка 145 мм, а его длина червяка 150 мм. При этом экспериментально был получен максимальный электромагнитный момент 11,5 Н·м, что соответствует плотности момента около 1,1 кН·м/м^3.

Топология червячной магнитной передачи, также, как и цилиндрической магнитной передачи, характеризуется низкой степенью использования постоянных магнитов. Для получения высокой плотности момента в червячной магнитной передаче необходимо использовать постоянные магниты как на магнитном червячном колесе, так и на магнитном червяке. При этом спиральная структура из постоянных магнитов представляет технологическую сложность при изготовлении, тем не менее имеется опыт создания спиральных структур из современных редкоземельных постоянных магнитов для магнитных передач по типу винт-гайка, преобразующих линейное движение во вращательное [46, 47].

Планетарная магнитная передача. Зубчатые планетарные передачи обладают одним из самых высоких КПД и плотностью момента среди других зубчатых передач. Это достигается за счёт того, что зацепление осуществляется сразу в нескольких точках, а не в одной как у цилиндрических и червячных передач [40].

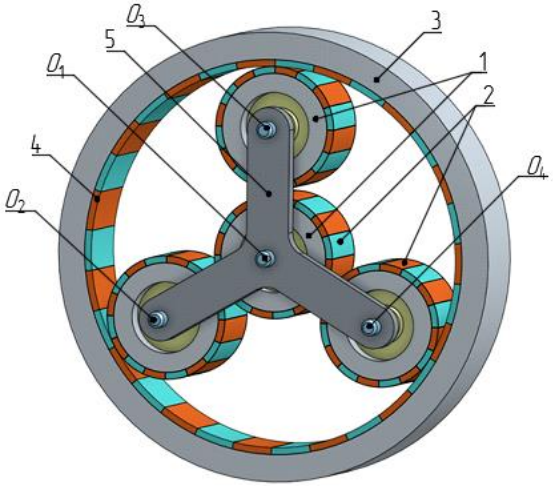


Рисунок 3 – Принципиальная схема планетарной магнитной передачи:
1, 2 – магнитопровод и радиально намагниченные ПМ магнитных сателлитов и магнитной солнечной шестерни; 3, 4 – магнитопровод и радиально намагниченные ПМ магнитной коронной шестерни; 5 – водило; O_1 – O_4 – оси вращения

В состав планетарной магнитной передачи (рисунок 3) входят солнечная магнитная шестерня, магнитные сателлиты и магнитная коронная шестерня, которые могут вращаться вокруг общей оси O_1. Магнитные сателлиты дополнительно могут вращаться относительно своих собственных осей $O_2 - O_4$. Магнитная солнечная шестерня и магнитные сателлиты представляют собой цилиндрический магнитопровод 1 с установленными на его поверхности радиально намагниченными постоянными магнитами 2 чередующейся полярности. Магнитная коронная шестерня состоит из цилиндрического магнитопровода 3 и постоянных магнитов на его внутренней поверхности 4. Сателлиты соединены между собой водилом 5. Соотношение скоростей вращения магнитных колёс определяется формулой Виллиса [48]

$$p_к n_к - \left(p_к + p_{сол} \right) n_{вод} + p_{сол} n_{сол} = 0, \tag{3}$$

где $p_к$ — число пар полюсов на коронной магнитной шестерне;

$p_{сол}$ — число пар полюсов на солнечной магнитной шестерне;

$n_к$ — частота вращения коронной магнитной шестерни;

$n_{сол}$ — частота вращения солнечной магнитной шестерни;

$n_{вод}$ — частота вращения водила.

Для надёжного зацепления и эффективной работы полюсные деления всех роторов должны быть равны друг другу. Из геометрических соображений следует, что число пар полюсов на каждом из сателлитов определяется как

$$p_{сат} = \frac{p_к - p_{сол}}{2}. \tag{4}$$

К примеру, при заблокированном водиле передаточное отношение будет равно

$$i = -\frac{p_к}{p_с}. \tag{5}$$

Эффективная техническая реализация магнитной передачи, выполненной по данной топологии, долгое время встречала сложности вплоть до того момента, когда стали доступны высокоэнергетические постоянные магниты. Это было связано с трудностями в организации электромагнитного возбуждения, так как в

передаче присутствуют сразу несколько вращающихся частей. Во многом по этой причине впервые заменить зубчатое зацепление силой электромагнитного взаимодействия в планетарной передаче было предложено лишь в 1990 г. Вильямом Мэби (США) [49]. Запатентованное им устройство является полным аналогом классического одноступенчатого планетарного зубчатого редуктора с тем лишь отличием, что зубцы заменены на радиально намагниченные постоянные магниты. Несколько позже Осетров В. Г. и Семаков К. Н. (Россия) [50] предложили конструкцию многоступенчатого планетарного магнитного редуктора, в котором число ступеней выбирается исходя из передаточного отношения и необходимого значения общего КПД.

Одной из немногих работ, в которых проведено детальное исследование планетарной магнитной передачи является [51]. В ней проведено 3D моделирование устройства с передаточным отношением равным трём при помощи метода конечных элементов и выполнены его экспериментальные исследования. По результатам исследования плотность момента составила 97,3 кН·м/м^3. В [52] проведено 3D моделирование планетарного магнитного редуктора с возбуждением от постоянных магнитов с осевой намагниченностью. Внешний диаметр устройства 100 мм, а аксиальная длина 25 мм, при этом максимальный электромагнитный момент составил 0,13 Н·м, что соответствует плотности момента около 0,7 кН·м/м^3.

Благодаря наличию внутреннего магнитного зацепления в нескольких точках, планетарная магнитная передача может значительно превосходить цилиндрическую и червячную магнитные передачи по плотности момента. Однако она имеет три вращающиеся части и содержит большой объём постоянных магнитов, что определяет её высокую стоимость и технологическую сложность изготовления.

Волновая магнитная передача. Согласно исследованию, проведённому в [22], волновые зубчатые передачи имеют наибольшую плотность момента до 302 кН·м/м^3 среди других зубчатых передач, а также обладают высоким

передаточным отношением вплоть до 120 в одной ступени. В 2006 г. А. Каисом [53] представлен патент на магнитную волновую передачу. Основными отличительными чертами от предыдущих изобретений автор называет большую плотность момента и возможность достигать больших передаточных отношений без уменьшения плотности момента. Принципиальная схема волновой магнитной передачи приведена на рисунке 4.

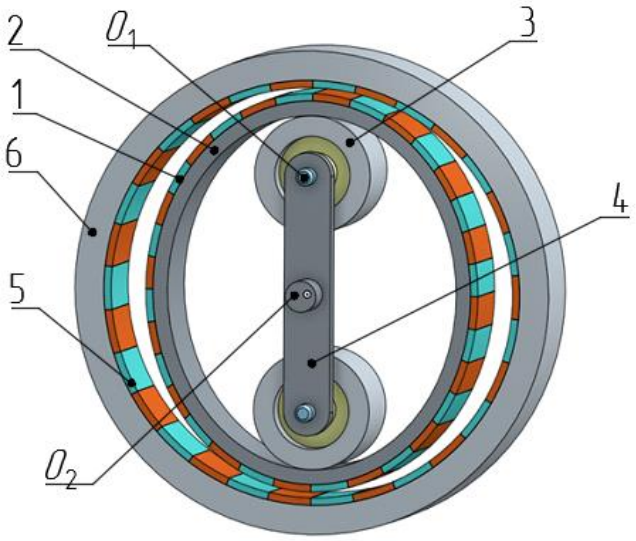


Рисунок 4 – Принципиальная схема волновой магнитной передачи:
1, 5 – Радиально намагниченные ПМ низкоскоростного ротора и статора; 2 – гибкое тело;
3 – ролики; 4 – водило; O_1, O_2 – оси вращения

Волновая магнитная передача состоит из высокоскоростного ротора, низкоскоростного ротора, а также статора. Низкоскоростной ротор в свою очередь состоит из радиально намагниченных постоянных магнитов 1, закреплённых на гибком теле 2, и имеет возможность вращаться относительно оси статора O_2. Высокоскоростной ротор представляет собой два ролика 3, закреплённых на водиле 4. Ролики 3 имеют свою собственную ось вращения O_1, а также могут вращаться относительно оси симметрии статора O_2 и имеют, таким образом, возможность обкатываться внутри гибкого тела 2, создавая пространственную гармонику магнитного поля (волну), необходимую для передачи момента между роторами системы. По этой причине высокоскоростной ротор также называется волновым генератором. На статоре устройства расположены радиально намагниченные постоянные магниты 5, закреплённые на внутренней поверхности его магнитопровода 6. Важной деталью является то, что гибкое тело 2 в свободном

состоянии имеет форму кольца, внутренний радиус которого несколько меньше радиуса окружности, описываемой высокоскоростным ротором при его вращении. При внесении высокоскоростного ротора внутрь низкоскоростного последний деформируется, принимая форму эллипса как это показано на рисунке 4.

Числа пар полюсов на статоре и низкоскоростном роторе отличаются на определённое значение, равное числу волн, создаваемых высокоскоростным ротором, которое в свою очередь равно числу роликов. При повороте высокоскоростного ротора на полный оборот зацепление постоянных магнитов низкоскоростного ротора и статора движется синхронно с ним. Если числа пар полюсов на статоре и низкоскоростном роторе равны, то последний не получит никакого вращательного перемещения относительно статора. Если числа пар полюсов на низкоскоростном роторе и статоре отличаются, то один полный оборот высокоскоростного ротора приведёт к повороту низкоскоростного ротора относительно статора и своей оси вращения O_2 на число полюсных делений, соответствующее разности чисел пар полюсов на статоре и низкоскоростном роторе. Для стабильной работы устройства необходимо выполнение следующего соотношения [53]

$$p_{\text{с}} = p_{\text{н}} + N_{\text{в}}, \tag{6}$$

где $p_{\text{с}}$ — число пар полюсов на статоре;

$p_{\text{н}}$ — число пар полюсов на низкоскоростном роторе;

$N_{\text{в}}$ — число роликов на высокоскоростном роторе (число волн).

Передаточное отношение магнитной волновой передачи определяется как

$$i = \frac{p_{\text{н}}}{N_{\text{в}}}. \tag{7}$$

Основным элементом, вызывающим сложности при реализации волновой магнитной передачи, является гибкое тело низкоскоростного ротора, которое должно одновременно обладать большой механической прочностью и высокими магнитными характеристиками. Кроме того, сложной технической задачей является реализация метода снятия момента с этого элемента. Последняя задача имеет решение, которое успешно применяется при производстве зубчатых

волновых передач, в то время как первое обстоятельство практически делает невозможным производство магнитной передачи такого типа. В связи с этим практическая реализация волновой магнитной передачи возможна только лишь для частного случая при числе волн $N_в$ равным единице [53]. В зарубежной литературе такое устройство также известно как магнитная циклоидная передача [54], а в отечественной литературе встречается название магнитной передачи с катящимся ротором [2, 12].

Циклоидная магнитная передача. Циклоидная магнитная передача представлена на рисунке 5 и внешне напоминает цилиндрическую магнитную передачу с внутренним зацеплением. Отличие заключается в том, что высокоскоростной ротор имеет возможность вращаться не только относительно своей собственной оси O_1, но и относительно оси внешнего магнитного колеса O_2. Внешнее магнитное колесо неподвижно и является статором, внутри которого обкатывается ротор. Статор имеет ось O_2 и состоит из кольцевого магнитопровода 1 и установленных на его внутренней поверхности радиально намагниченных постоянных магнитов 2. Ротор циклоидной магнитной передачи представляет собой кольцо из магнитомягкого материала 3 с радиально намагниченными постоянными магнитами 4 на его внешней поверхности.

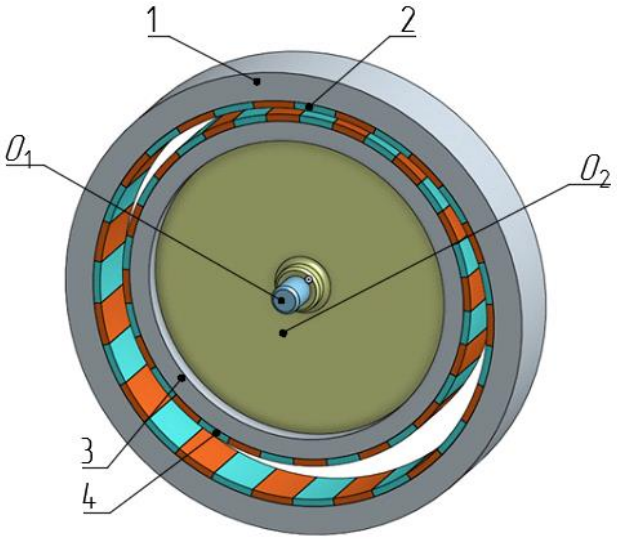


Рисунок 5 – Принципиальная схема циклоидной магнитной передачи:
1, 2 – магнитопровод и радиально намагниченные ПМ статора; 3, 4 – магнитопровод и радиально намагниченные ПМ ротора; O_1, O_2 – оси вращения

Благодаря такому исполнению становится возможным использовать обычный цилиндрический негибкий ротор, расположенный с эксцентриситетом по отношению к оси статора, что необходимо для создания волны. Вращение ротора относительно своей оси O_1 низкоскоростное, а его вращение вокруг оси статора O_2 является высокоскоростным.

Основной недостаток такой топологии заключается в том, что ротор, помимо вращения относительно своей оси, вращается вокруг оси статора, что затрудняет снятие момента и требует использования конструктивных элементов для преобразования сложного вращательного движения в простое относительно одной оси. Такие конструктивные элементы в большинстве своём основаны на использовании силы трения, что снижает КПД и надёжность циклоидной магнитной передачи [22]. Кроме того, эксцентрично установленный ротор вызывает вибрации механического происхождения, а также наличие нескомпенсированных радиальных электромагнитных сил.

Для решения проблемы с конвертацией сложного вращательного движения ротора в [53] предлагается использовать двухступенчатую конструкцию магнитной передачи. Первая ступень представляет собой обыкновенную циклоидную магнитную передачу, которая показана на рисунке 5. Вторая ступень конструктивно аналогична первой ступени с тем отличием, что её статор имеет возможность свободно вращаться относительно своей оси. Магнитные передачи первой и второй ступеней жёстко соединены механически по роторам. Движение ротора первой ступени можно разделить на две составляющие — вокруг собственной оси (низкоскоростное движение) и вокруг оси статора (высокоскоростное движение). Эти два движения без изменения передаются на ротор второй ступени. Если передаточные отношения магнитных передач первой и второй ступеней равны, то в соответствии с формулой Виллиса [54] скорость разблокированного статора второй ступени будет равна скорости заблокированного статора первой ступени, т. е. равна нулю, поскольку магнитные передачи обеих ступеней полностью идентичны. Для передачи мощности необходимо иметь различные передаточные отношения ступеней. Так в

приведённом авторами изобретения [53] примере передаточное отношение магнитной передачи первой ступени равно двадцати, второй ступени двадцати двум, давая общее передаточное отношение 440.

Необходимо отметить, что идея создания двухступенчатой циклоидной магнитной передачи А. Каиса [53] была на несколько десятилетий раньше предложена отечественным учёным Ганзубром Л. Б. (СССР) [10] в 1969 г, который называет своё изобретение двухступенчатым планетарным магнитным редуктором по схеме 2k-h с двумя внутренними зацеплениями. Топология этой передачи принципиально повторяет топологию двухступенчатой циклоидной магнитной передачи, с той лишь разницей, что А. Каис пришёл к этой топологии, отталкиваясь в своих рассуждениях от волновой передачи, а Ганзбург Л. Б от планетарной передачи. В конструкции Ганзбурга Л. Б. используется электромагнитное возбуждение, а также пусковая короткозамкнутая обмотка. Позже это изобретение было усовершенствовано Яковлевым В. А. (СССР) [56] путём применения постоянных магнитов как на ведущем, так и на ведомом магнитном колёсах, что позволило увеличить плотность момента устройства.

Одной из первых работ, посвящённых исследованию волновой передачи, является статья [57], в которой авторы выполнили 2 D расчёт магнитного поля методом конечных элементов и показали, что волновая магнитная передача при использовании высокоэнергетических постоянных магнитов может иметь плотность момента 110 кН·м/м^3 при передаточном отношении 15 [57] и 150 кН·м/м^3 при передаточном отношении 18 [58]. Однако, авторы признают принципиальные сложности в реализации такого устройства, которые связаны с изготовлением гибкого ротора. В [58] той же научной группой исследован экспериментальный образец двухступенчатой циклоидной передачи с передаточным отношением 360. Плотность момента составила около 75 кН·м/м^3. Авторами отмечается важный факт, что при переходе от одноступенчатой к двухступенчатой циклоидной магнитной передачи плотность момента уменьшается почти в два раза. В [54] был проведён расчёт циклоидной одноступенчатой магнитной передачи, по результатам которого плотность момента

составила 183 кН·м/м^3. В [58, 59] приведены результаты экспериментальных исследований циклоидной магнитной передачи, в которой ротор установлен в статор без зазора, т. е. ротор катится по внутренней поверхности статора с прямым механическим контактом. Максимальный момент увеличивается за счёт сил трения и увеличенной из-за отсутствия воздушного зазора магнитной силы. Таким образом, решается проблема с возникновением некомпенсированных радиальных магнитных сил, действующих на подшипники. В конструкции также предусмотрено балансировочное колесо для уменьшения механических вибраций. Данных, позволяющих рассчитать плотность момента, в [58, 59] не обнаружено.

В [11] приведена конструкция двухступенчатого планетарного магнитного редуктора, выполненного по схеме 2k-h с электромагнитным возбуждением мощностью 80 Вт, частотой вращения быстроходного вала 3000 об/мин, передаточным отношением 76, внешним диаметром 106 мм и аксиальной длиной 67 мм. Плотность момента составила 32,7 кН·м/м^3, что является хорошим результатом, особенно учитывая факт наличия электромагнитного возбуждения без использования современных высокоэнергетических редкоземельных постоянных магнитов. Такая схема реализации магнитной передачи отмечается автором наиболее перспективной среди прочих топологий. Однако следует отметить, что эта магнитная передача имела воздушный зазор в 0,3 мм, в то время как более востребованный на практике зазор для таких устройств около 1 мм.

1.2 Коаксиальная планетарная магнитная передача

Коаксиальная планетарная магнитная передача не имеет аналогов среди зубчатых передач. В отечественной литературе такие устройства получили название шаговых магнитных редукторов [10, 11]. По своему принципу действия коаксиальная планетарная магнитная передача ближе к электрической машине с электромагнитной редукцией, чем к зубчатой передаче. Принципиальная схема коаксиальной планетарной магнитной передачи приведена на рисунке 6. В её состав входит внешнее магнитное колесо, состоящее из кольцевого

магнитопровода 1 и установленных на его внутренней поверхности радиально намагниченных постоянных магнитов 2. Внутреннее магнитное колесо представляет собой кольцевой магнитопровод 3 с радиально намагниченными постоянными магнитами 4 на его внешней поверхности. Между внешним и внутренним магнитными колёсами находится промежуточное магнитное колесо, состоящее из сегментов 5, выполненных из магнитомягкого материала и разделённых между собой немагнитными промежутками. Обычно внешнее магнитное колесо заблокировано и представляет собой статор, в то время как внутреннее и промежуточное магнитные колёса представляют собой высокоскоростной и низкоскоростной роторы соответственно.

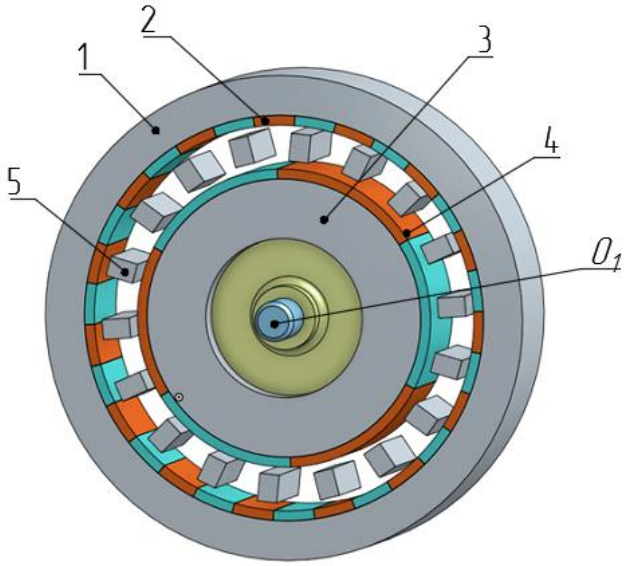


Рисунок 6 – Принципиальная схема коаксиальной планетарной магнитной передачи: 1, 2 – магнитопровод и радиально намагниченные ПМ статора; 3, 4 – магнитопровод и радиально намагниченные ПМ высокоскоростного ротора; 5 – сегменты из магнитомягкого материала низкоскоростного ротора; O_1 – ось вращения роторов

Главный процесс, лежащий в основе принципа действия коаксиальной планетарной магнитной передачи, состоит в явлении модуляции магнитного поля в воздушных зазорах, посредством которой происходит взаимодействие между собой элементов магнитной системы. В отсутствие промежуточного магнитного колеса магнитные системы внешнего и внутреннего магнитных колёс создают магнитные поля с разными числами пар полюсов и стабильная передача мощности между ними невозможна. При установке между внешним и внутренним магнитными колёсами промежуточного магнитного колеса (модулятора),

магнитное поле, создаваемое внешним магнитным колесом, изменит свой гармонический состав, вследствие наличия в модуляторе сегментов из магнитомягкого материала. Число сегментов в модуляторе выбирается таким образом, что в гармоническом составе этого магнитного поля появится пространственная гармоника с числом пар полюсов внутреннего магнитного колеса. Аналогично, магнитное поле, возбуждаемое внутренним магнитным колесом, будет модулироваться с образованием пространственных гармоник с числом пар полюсов внешнего магнитного колеса. Следовательно, создаются условия для устойчивого взаимодействия роторов по взаимно неподвижным пространственным гармоникам магнитного поля [61].

Если промежуточное магнитное колесо (модулятор) является неподвижным, то внешнее и внутреннее магнитные колёса станут низкоскоростным и высокоскоростным соответственно. По принципу действия такая магнитная передача является синхронным механизмом [12], и отношение частот вращения магнитных колёс равно обратному отношению чисел пар полюсов на них и в общем случае определяется формулой [62]

$$\frac{p_{\text{внеш}}}{p_{\text{внутр}}} n_{\text{внеш}} - \left(\frac{p_{\text{внеш}}}{p_{\text{внутр}}} + 1 \right) n_{\text{пр}} + n_{\text{внутр}} = 0, \tag{8}$$

где $p_{\text{внеш}}$ — число пар полюсов внешнего магнитного колеса;

$p_{\text{внутр}}$ — число пар полюсов внутреннего магнитного колеса;

$n_{\text{внеш}}$ — частота вращения внешнего магнитного колеса, об/мин;

$n_{\text{пр}}$ — частота вращения промежуточного магнитного колеса, об/мин;

$n_{\text{внутр}}$ — частота вращения внутреннего магнитного колеса, об/мин.

Кроме того, для эффективной работы необходимо чтобы число сегментов в промежуточном магнитном колесе было равно

$$N_{\text{с}} = p_{\text{внеш}} + p_{\text{внутр}}. \tag{9}$$

Помножив левую и правую части выражения (8) на $p_{\text{внутр}}$ имеем

$$p_{\text{внеш}} n_{\text{внеш}} - \left(p_{\text{внеш}} + p_{\text{внутр}} \right) n_{\text{пр}} + n_{\text{внутр}} p_{\text{внеш}} = 0. \tag{10}$$

Из выражения (10) в частности следует, что при заблокированном внешнем магнитном колесе направления вращения внутреннего магнитного колеса и промежуточного магнитного колеса совпадают. Выражение (10) аналогично выражению для соотношения скоростей планетарной магнитной передачи (3). Между планетарным магнитным редуктором и коаксиальным планетарным магнитным редуктором имеет место аналогия, согласно которой, внешнее магнитное колесо соответствует коронной магнитной шестерне, промежуточное магнитное колесо соответствует водилу, а внутреннее магнитное колесо соответствует солнечной магнитной шестерне. Однако все элементы коаксиального планетарного магнитного редуктора имеют общую ось вращения, в связи с чем он и получил такое отличительное определение как коаксиальный. Необходимо также отметить, что возможен случай, при котором коаксиальная планетарная магнитная передача вместо соотношения (9) удовлетворяет соотношению

$$N_{\text{с}} = p_{\text{внеш}} - p_{\text{внутр}}. \tag{11}$$

В этом случае при заблокированном внешнем магнитном колесе остальные два магнитных колеса будут вращаться в противоположных направлениях, то есть выражение (8) для скоростей элементов магнитной системы примет вид

$$p_{\text{внеш}} n_{\text{внеш}} - \left(p_{\text{внеш}} + p_{\text{внутр}} \right) n_{\text{пр}} - n_{\text{внутр}} p_{\text{внеш}} = 0. \tag{12}$$

Автором идеи такой топологии магнитной передачи является Альфонс Ньюланд (США) [63]. Магнитная передача Ньюланда имеет реактивный принцип действия и электромагнитное возбуждение. Несколько позже Николосом Лэйнгом (Германия) [64] было предложено использовать возбуждение от постоянных магнитов. Сегменты из магнитомягкого материала промежуточного магнитного колеса в этих изобретениях распределены неравномерно таким образом, что все сегменты разделены на группы, смещённые друг относительно друга на половину полюсного деления, что принципиально обеспечивало работу устройства в качестве магнитной передачи, но не давало максимальную эффективность. Льюис Чабб (США) в своём патенте на редукторный электродвигатель [65] помимо самого

двигателя предложил усовершенствование магнитной передачи Ньюланда, которое заключалось в возможности использования постоянных магнитов на внутреннем магнитном колесе, а также в более правильном, равномерном по всей длине окружности, размещении сегментов промежуточного магнитного колеса. Автор называет своё изобретение двигателем Вернье по имени французского математика Пьера Вернье — изобретателя шкалы верньера известную также как нониус, используемой для измерения малых величин, например штангенциркулем [66]. Это отражает суть его изобретения, в основе которого лежит создание разности между числом зубцов внешнего магнитного колеса и промежуточного магнитного колеса, аналогично основной шкале и нониусу на штангенциркуле. Следует также отметить, что именно Льюисом Чаббом было выведено выражение (9). Благодаря возможности создавать подобные устройства с большим передаточным отношением, основным назначением такой конструкции было использование её в качестве привода часов, получающих питание от источника промышленной частоты. В патенте в качестве примера приведено устройство, совмещающее в себе двигатель Вернье и магнитный редуктор с передаточным отношением 3600, что давало возможность подключать секундную стрелку часов напрямую к низкоскоростному ротору устройства, который при частоте питания 60 Гц вращался с частотой 1 об/мин. Необходимо отметить, что этот принцип действия применительно к электрическим машинам был запатентован несколько раньше в 1929 г. Оскаром Диком [67]. Однако идея использования данного принципа для магнитного редуктора принадлежит именно Чаббу [65]. Гленн Рисэ [68] (США) запатентовал вариант реактивной конструкции коаксиальной планетарной магнитной передачи с аксиальным потоком возбуждения как от постоянных магнитов, так и от электромагнита. Следующим этапом развития коаксиальной планетарной топологии стало изобретение Томаса Мартина (США) [62], в котором он впервые предложил конструкцию с постоянными магнитами как на внешнем магнитном колесе, так и на внутреннем магнитном колесе, которая и по сегодняшний день считается одной из самых эффективных. Первые отечественные патенты на конструкцию коаксиальной планетарной магнитной передачи

появились 1968 г. Их авторы Бансевичус Р. Ю. (СССР) [69] и Борисов Л. А. (СССР) [70].

Коаксиальная магнитная передача принципиально может быть выполнена с регулируемым передаточным отношением. Так, например, Ханс Шлаеппи (Швейцария) [71] описывает способ регулирования передаточного отношения посредством специально спроектированных катушек возбуждения. Несколько позже Газбургом Л. Б. (СССР) [72] была запатентована конструкция планетарного коаксиального магнитного редуктора, в которой предусмотрена возможность ступенчатого регулирования передаточного отношения за счёт аксиального перемещения элементов магнитной системы. А. Каисом (Великобритания) для регулирования передаточного отношения было предложено укладывать в пазы статора трёхфазную обмотку, питаемую переменным током от источника с регулируемой частотой. Позже модификация этой идеи была запатентована Афанасьевым А. Ю. и Чихняевым В. А. (Россия) [73].

Классическая конструкция, предложенная Томасом Мартином (США) [62], имеет возможности к совершенствованию и увеличению плотности момента. Так, Абрамцевым Е. П. (СССР) [74] была предложена конструкция с использованием диамагнитных материалов в целях улучшения функции модуляции магнитного потока, а также конструкция магнитной системы, выполненная таким образом, что в силовом взаимодействии участвует не только радиальная поверхность элементов магнитной системы, но и их торцевая часть.

Ивашов Е. Н. (СССР) [75] предложил использовать постоянные магниты на всех трёх магнитных колёсах. Яковлев В. А. (СССР) [76] запатентовал реактивный коаксиальный планетарный магнитный редуктор, выполненный двухступенчатым и предложил вариант конструкции, при котором ступени концентричны друг другу, а их соединение является параллельным, что увеличивает максимальный передаваемый момент без увеличения передаточного отношения. Также Яковлевым В. А. (СССР) была запатентована конструкция, в которой ступени соединены последовательно, что приводит к значительному увеличению передаточного отношения устройства [77].

В последнем десятилетии наиболее активные исследования коаксиальных планетарных магнитных передач и патентование их конструкций осуществлялось в Чувашском государственном техническом университете, и Казанском государственном техническом университете им. А. Н. Туполева [73, 78, 79]

1.3 Достигнутые параметры коаксиальной планетарной магнитной передачи

Интерес ведущих мировых учёных к более глубокому изучению магнитных передач вызвала статья [14], опубликованная в 2001 г. группой английских учёных. В этой статье авторы впервые показали теоретическую возможность получения плотности момента в коаксиальной планетарной магнитной передаче более 100 кН·м/м^3. Такая плотность момента в десять раз превышает плотность момента современных синхронных электрических машин с естественным воздушным охлаждением и возбуждением от постоянных магнитов, что открывает широкие перспективы для использования магнитных передач в электромеханических системах. Несколько позже этой же группе авторов удалось экспериментально подтвердить полученные расчётные данные [80], создав и успешно испытав экспериментальный образец с передаточным отношением 5,75 и плотностью момента 72,7 кН·м/м^3. Меньшее значение плотности момента связано с наличием не учтённых в [14] краевых эффектов.

В работе датских исследователей [21] экспериментально получена плотность момента по активным материалам 54,5 кНм/м^3, при этом плотность момента для конструкции в целом составила 15 кНм/м^3, что авторы связывают прежде всего с технологическими сложностями изготовления прототипа.

В 2012 г. американскими учёными [81] была представлена работа, в которой авторы предложили более экономичную, по сравнению со своими предшественниками, схему реализации магнитной передачи, основной особенностью которой является использование более дешёвых, по сравнению с редкоземельными, ферритовых постоянных магнитов, направление

намагниченности которых тангенциальное. Несмотря на применение более слабых магнитов, при помощи оптимизации конструкции удалось достигнуть плотности момента 65,5 кНм/м^3.

В работе [82] приведены результаты оптимизации параметров магнитной системы по критерию максимума плотности момента. За основу была взята линеаризованная аналитическая 2D модель. Целевая функция содержала в себе семь переменных: отношение числа пар полюсов на внешнем и внутреннем роторах (лист дискретных значений), отношение тангенциального размера полюсного наконечника модулятора к полюсному делению модулятора, отношение радиального размера полюсного наконечника модулятора к полюсному делению модулятора, толщина внешних постоянных магнитов, толщина внутренних постоянных магнитов, внешний воздушный зазор, внутренний воздушный зазор. По результатам оптимизации удалось достигнуть плотности момента 157 кН·м/м^3.

В [83] приведена конструкция магнитной передачи, имеющей плотность момента 239 кН·м/м^3, что было подтверждено не только теоретическими расчётами, но и испытаниями экспериментального образца. Данная плотность момента является максимальной из достигнутых в магнитных передачах такой топологии и обеспечена использованием встречно намагниченных постоянных магнитов с остаточной магнитной индукцией 1,25 Т и малого воздушного зазора в 0,5 мм при внешнем диаметре статора 228 мм.

К особенностям топологии коаксиальной планетарной магнитной передачи относятся пульсации момента, что связано с принципиальным наличием зубчатой структуры (модулятора). Однако существуют технические решения по снижению их амплитуды при помощи аксиального разделения одного из роторов на две части с последующим угловым смещением этих частей друг относительно друга, что позволяет снизить пульсации момента более, чем в три раза [84, 85].

Существует зависимость между передаточным отношением и процентной составляющей пульсаций в выходном моменте устройства. В [86] показано, что амплитуда пульсаций пропорциональна наименьшему общему кратному от чисел

пар полюсов на внутреннем и внешнем магнитных колёсах. Чем больше наименьшее общее кратное, тем выше частота пульсаций и меньше их амплитуда. В связи с этим предпочтительны дробные передаточные отношения.

Некоторыми авторами также отмечается, что при заданной частоте вращения максимальные потери на индуцированные токи имеют место на холостом ходу, а увеличение момента нагрузки приводит к уменьшению магнитных потерь [87].

Благодаря коаксиальной структуре, данная топология магнитной передачи подчиняется некоторым общим закономерностям, характерным для электрических машин, среди которых увеличение эффективности с увеличением диаметра при сохранении воздушного зазора неизменным [4].

Наиболее уязвимым с механической точки зрения элементом конструкции является промежуточное магнитное колесо (модулятор) [88, 89]. Для его усиления добавляют перемычки между сегментами. Наименьшее влияние на максимальный момент оказывают перемычки, максимально приближенные в радиальном направлении к внутреннему (с малым числом пар полюсов) магнитному колесу [90]. В одной из моделей такое расположение перемычек при их толщине 0,3 мм привело к уменьшению максимального момента на 2%. Подобная конструкция модулятора уменьшает количество высших гармоник поля в воздушном зазоре, что в значительной степени уменьшает потери на индуцированные токи в постоянных магнитах [91]. Потери в постоянных магнитах могут достигать до 70% от общих потерь, в связи с чем рекомендуется принимать меры по их уменьшению [92].

Значительное усиление конструкции также возможно при изменении классической топологии, а именно, при перемене местами внешнего магнитного колеса и промежуточного магнитного колеса при сохранении высоких значений плотности момента [93].

При работе магнитной передачи возникают механические колебания, которые связаны не только с пульсациями момента (реактивным моментом), но и с некомпенсированными радиальными усилиями [94]. Для минимизации радиальных магнитных сил, воздействующих на подшипники, рекомендуется выполнять конструкцию с азимутальной симметрией [95]. Форма сегментов

модулятора и размеры постоянных магнитов оказывают значительное влияние на максимальный момент и являются предметом оптимизации [96 – 98].

Увеличение плотности момента до 25% и уменьшение пульсаций момента можно достичь при помощи применения структур Хальбаха [99, 100] или тангенциально встречно намагниченных постоянных магнитов [101].

Кольцевая структура коаксиальной планетарной магнитной передачи и соосное расположение её вращающихся частей открывают широкие возможности по интеграции её с низкоскоростной электрической машиной. В результате чего получается компактный моментный двигатель, не требующий принудительного охлаждения, с плотностью момента до 120 кН·м/м^3 [102] и КПД более 96% при 100 об/мин.

1.4 Выбор направления исследования

По результатам обзора научно-технических статей и патентной информации для дальнейшего исследования выбрана коаксиальная планетарная магнитная передача, так по сравнению с другими перспективными топологиями, она обладает большой плотностью момента, требует относительно небольшого объёма постоянных магнитов и имеет малые радиальные усилия. Существующие методики и известные результаты исследований не дают полного представления о сложных электромагнитных и механических процессах при преобразовании энергии и не позволяют достоверно оценивать эффективность таких магнитных передач. Поэтому настоящая работа нацелена на дальнейшее развитие теории коаксиальных планетарных магнитных передач и создание более информативной методической базы для успешного проектирования, которая позволит ускорить и расширить их внедрение в промышленность. Для достижения поставленной цели выполнен цикл расчётно-теоретических и экспериментальных исследований.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

1. Наиболее перспективными топологиями магнитных передач являются планетарная (97,3 кН·м/м^3), планетарная коаксиальная (239 кН·м/м^3) и циклоидная (183 кН·м/м^3).

2. В планетарной передаче используется примерно на 50% больше постоянных магнитов, чем в других перспективных топологиях.

3. Циклоидная магнитная передача применима на практике только в двухступенчатом исполнении (планетарная передача по схеме 2k-h), что понижает её плотность момента до двух раз. Принципиальное наличие эксцентриситета в циклоидной магнитной передаче порождает вибрации и некомпенсированные радиальные электромагнитные силы, уменьшающие ресурс подшипников.

4. Магнитные передачи коаксиальной планетарной топологии могут быть выполнены с минимальными радиальными электромагнитными силами, а соосное расположение вращающихся частей позволяет не прибегать к дополнительным устройствам для снятия момента с её выходного вала как у циклоидной передачи. Её недостатками являются наличие пульсаций момента, и сложная технология изготовления промежуточного магнитного колеса (модулятора).

5. Существующие отечественные методики проектирования магнитных передач относятся к 1970-м годам и требуют значительной переработки с учётом последних достижений как в области материаловедения, так и в области методов расчёта магнитных систем.

6. Существующие современные методики моделирования и известные результаты исследований магнитных передач не дают полного представления о сложных электромагнитных и механических процессах при преобразовании энергии и не позволяют производить проектирование магнитных передач и достоверно оценивать их эффективность.

7. Известные современные исследования детально не затрагивают вопросов конструктивного исполнения магнитных передач для промышленного применения, и методик их экспериментальных исследований.

ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОЙ ПЕРЕДАЧИ

2.1 Выбор метода моделирования магнитного поля

При проектировании коаксиальных планетарных магнитных передач традиционно сложились два принципиальных подхода к расчёту параметров магнитного поля — аналитический и численный. Исторически первым из них появился аналитический метод расчёта в двумерном приближении [103], применение которого предусматривало принятие ряда допущений. Основные из них — это линейность магнитных свойств материалов, эквипотенциальность поверхностей зубцовых элементов, пренебрежение краевыми эффектами и касательной составляющей магнитного поля в воздушных зазорах.

Основным недостатком современных аналитических методов является низкая точность расчёта, обусловленная принципиальной невозможностью точного учёта нелинейности свойств магнитных материалов, что может приводить к возникновению погрешности в определении амплитуды рабочей гармоники магнитного поля до 40% [104], вынуждая проектировать магнитную систему таким образом, чтобы её магнитомягкие элементы оставались на линейном участке основной кривой намагничивания [82]. Для достижения максимальной плотности момента в коаксиальной планетарной магнитной передаче необходимо, чтобы отдельные сегменты модулятора находились в насыщенном состоянии, в результате чего данный недостаток принципиально не позволяет спроектировать максимально эффективное устройство.

К преимуществам аналитических методов расчёта можно отнести значительно меньшее по сравнению с численными методами время расчёта [104].

Второй подход к расчёту магнитного поля базируется на численном решении дифференциальных уравнений Максвелла и позволяет вводить минимальное количество допущений и тем самым получать результат с высокой степенью точности. Наиболее распространёнными методами решения этих

дифференциальных уравнений являются метод конечных элементов и метод пространственных интегральных уравнений [105]. Расчёт магнитных передач при помощи численных методов с постановкой задачи в трёхмерном приближении позволяет получить точность при расчёте электромагнитного момента до 5% [83, 106], а также даёт возможность более точно учитывать магнитные потери.

В диссертации использовано численное математическое моделирование по методу конечных элементов, реализованному в рамках программного обеспечения *COMSOL Multiphysics* [107]. Основным преимуществом данного программного обеспечения по сравнению с аналогами является возможность связанного моделирования нескольких физических подсистем, например, магнитной и механической.

2.2 Параметры магнитной системы

Моделирование проводилось для варианта магнитной системы магнитной передачи, выполненной по коаксиальной планетарной топологии (рисунок 6), называемой далее магнитная передача. Основные размеры магнитной системы приведены на рисунке 7.

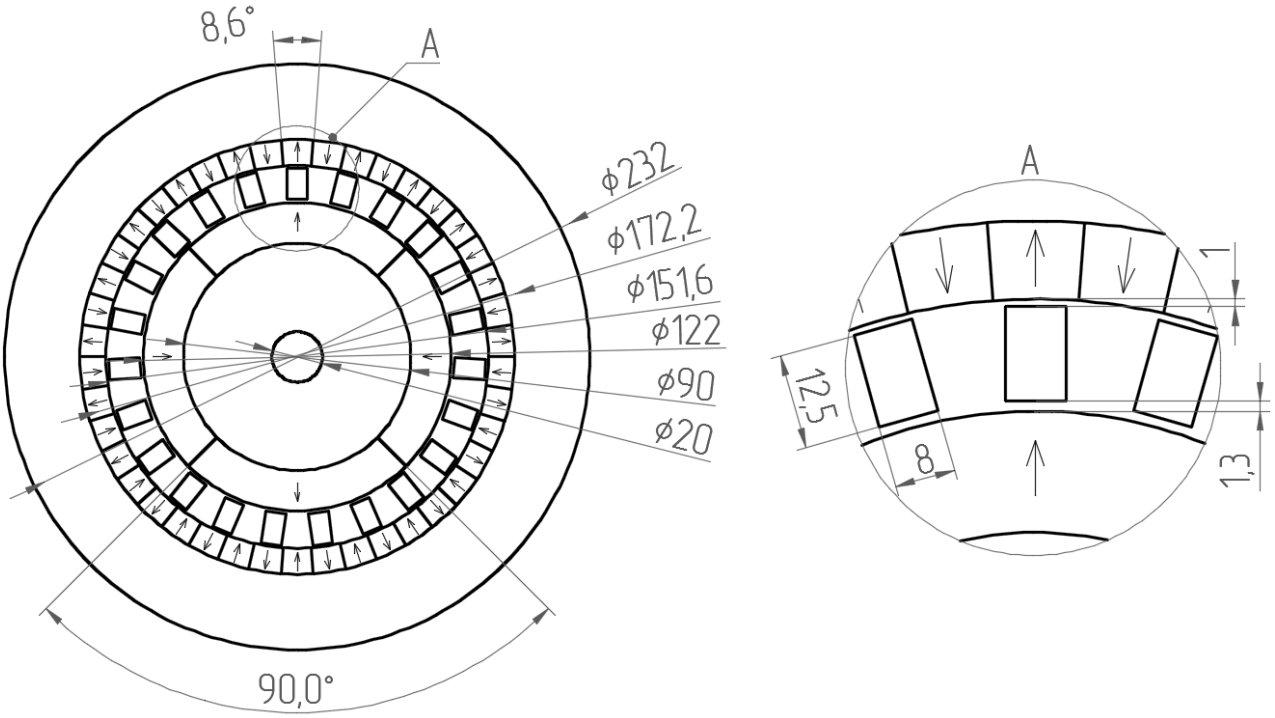


Рисунок 7 – Основные размеры магнитной системы исследуемого варианта магнитной передачи

Внешнее магнитное колесо принято неподвижным и в дальнейшем называется статором. Внутреннее и промежуточное магнитные колёса составляют высокоскоростной и низкоскоростной роторы соответственно. Согласно с соотношением скоростей для коаксиальной планетарной магнитной передачи (8) передаточное отношение определяется как

$$i = \frac{p_{\text{с}} + p_{\text{в}}}{p_{\text{в}}}, \tag{13}$$

где $p_{\text{с}}$ — число пар полюсов на статоре;

$p_{\text{в}}$ — число пар полюсов на высокоскоростном роторе.

или, принимая во внимание выражение (9)

$$i = \frac{N_{\text{с}}}{p_{\text{в}}}. \tag{14}$$

Передаточное отношение положительное, что свидетельствует о сонаправленном вращении роторов магнитной передачи.

В качестве численного примера был использован вариант магнитной передачи с 21 парой полюсов на статоре, двумя парами полюсов на высокоскоростном роторе и 23 сегментами низкоскоростного ротора. Таким образом, согласно (13) передаточное отношение составило 11,5. Основные параметры магнитной системы модели приведены в таблице 1. Постоянные магниты выполнены секторальными с однородной намагниченностью в радиальном направлении из сплава неодим-железо-бор марки *N*38*UH* с остаточной магнитной индукцией 1,26 Т при 20° С [108]. Кривая размагничивания постоянных магнитов приведена на рисунке 8. Ярмо магнитопровода статора выполнено из холоднокатаной изотропной электротехнической стали марки 2411 [109, 110] (рисунок 9, 10), ярмо магнитопровода высокоскоростного ротора — из электротехнической стали марки 21850 [111] (рисунок 9), сегменты низкоскоростного ротора выполнены из композитного магнитомягкого материала на базе *Somaloy* [112], кривая намагничивания которого получена при испытаниях (приложение А) и представлена на рисунке 11. Вал высокоскоростного ротора выполнен из конструкционной стали марки 45 (рисунок 11).

Таблица 1 – Основные параметры магнитной системы

Число пар полюсов высокоскоростного ротора	2
Число пар полюсов статора	21
Число сегментов низкоскоростного ротора	23
Аксиальная длина, мм	60
Остаточная магнитная индукция ПМ, Тл	1,26 (*N*38*UH)*
Передаточное отношение	11,5
Материал магнитопровода статора	Сталь 2411
Материал магнитопровода низкоскоростного ротора	*Samoloy*
Материал магнитопровода высокоскоростного ротора	Сталь 21850
Электропроводность постоянных магнитов, МСм/м	0,56
Электропроводность *Somaloy*, МСм/м	0,14

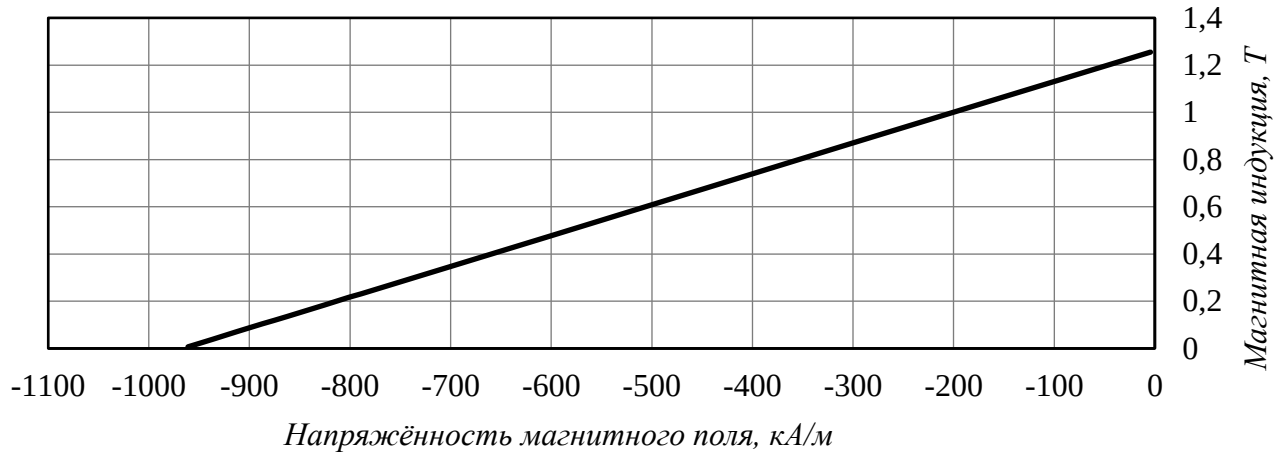


Рисунок 8 – Кривая размагничивания постоянного магнита *N*38*UH* при 20° С

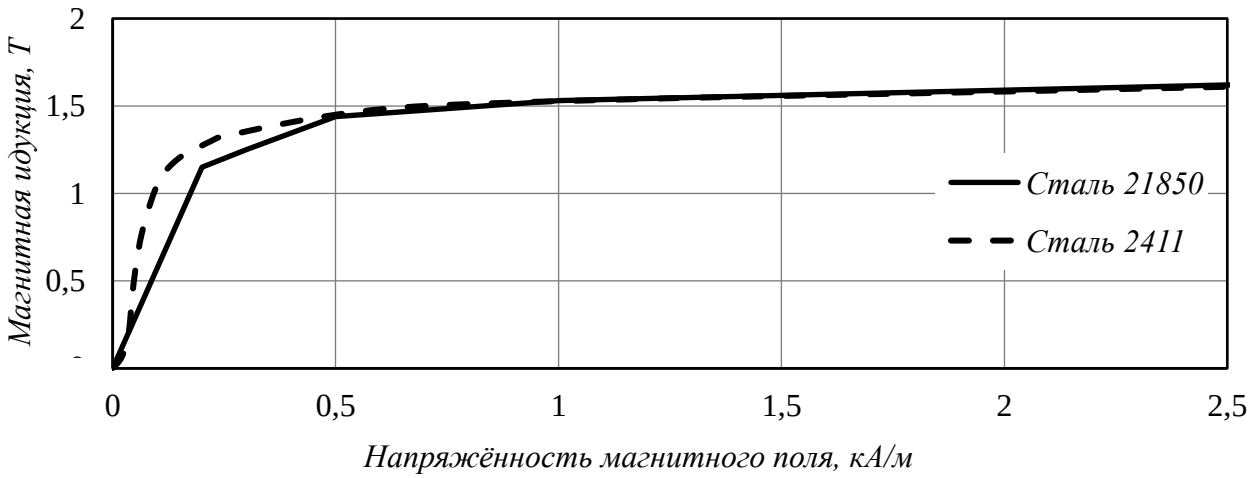


Рисунок 9 – Основные кривые намагничивания сталей марок 2411 и 21850

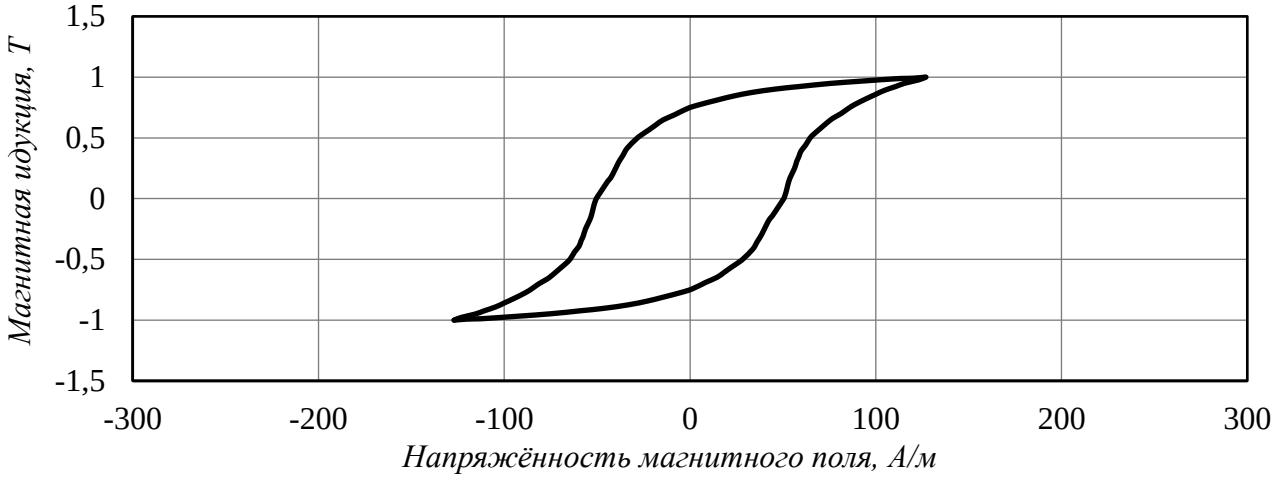


Рисунок 10 – Петля магнитного гистерезиса для стали 2411

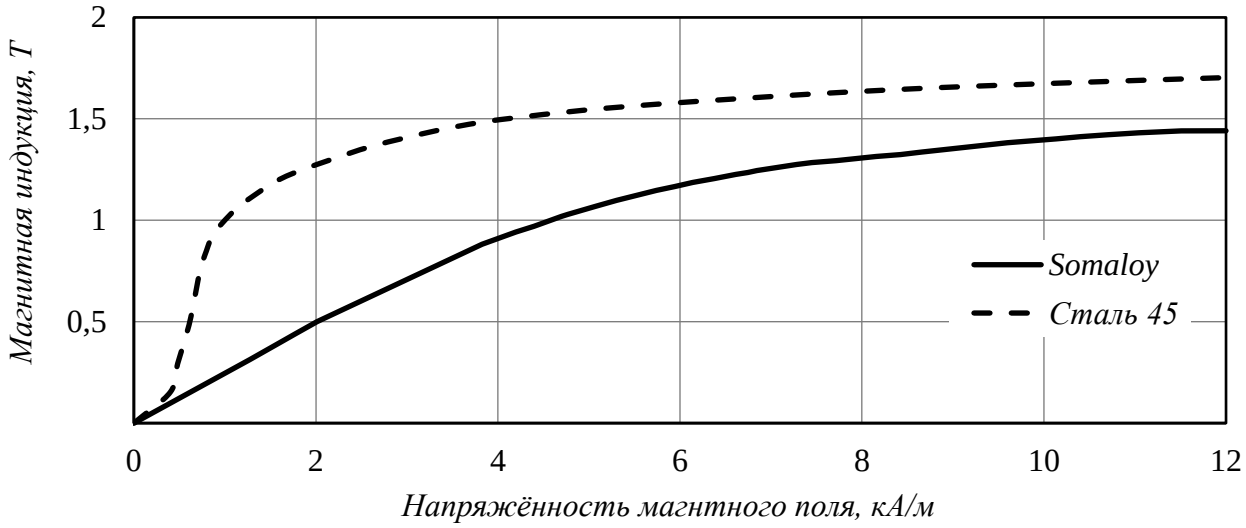


Рисунок 11 – Основные кривые намагничивания *Somaloy* и стали 45

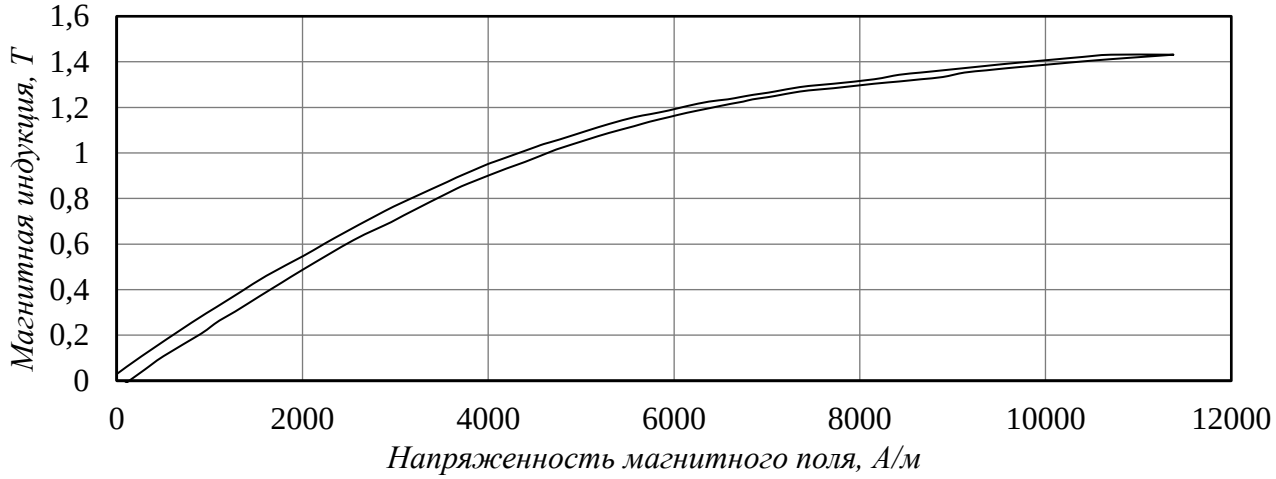


Рисунок 12 – Петля магнитного гистерезиса для *Somaloy*

2.3 Представление магнитной передачи в виде расчётной модели

Геометрия двумерной модели магнитной передачи, выполненная в программном обеспечении *COMSOL Multiphysics*, приведена на рисунке 13.

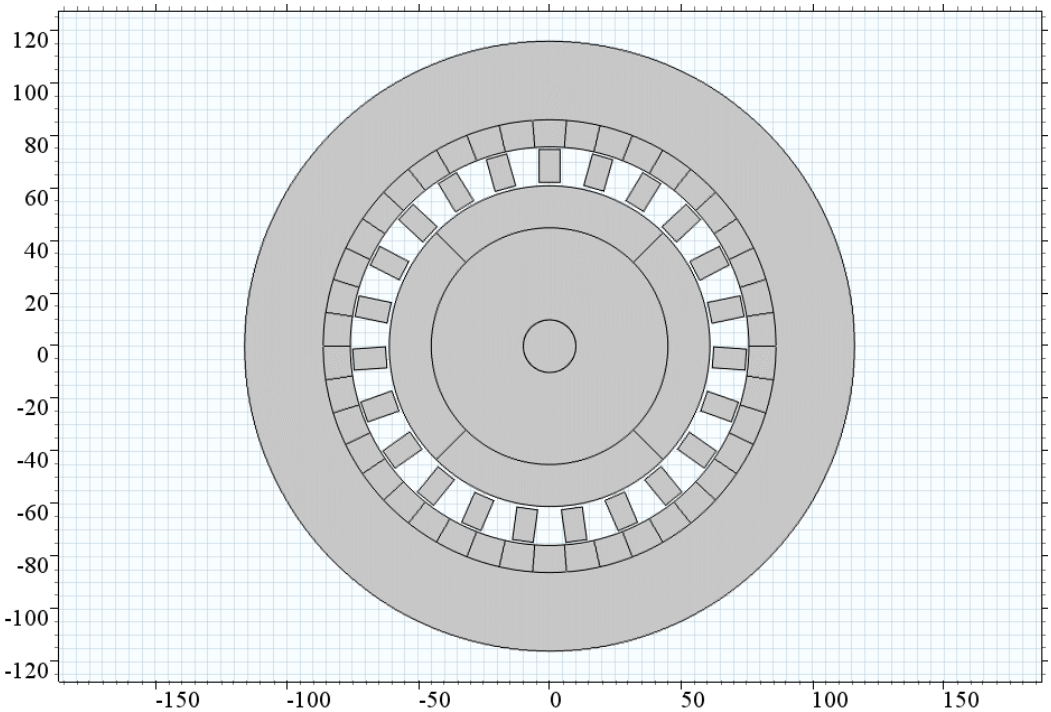


Рисунок 13 – Модель магнитной передачи в *COMSOL Multiphysics*

При построении сетки расчётной области использован встроенный в программное обеспечение генератор сеток. За основной элемент при построении сетки выбран треугольник. Так как точность расчёта электромагнитного поля зависит от погрешностей аппроксимации искомой функции, то для обоснования конечно-элементной модели требуются исследования необходимой частоты разбиения элементов магнитной системы.

Как показывает опыт с наименьшим шагом следует разбивать области, по которым проходит интегрирование при расчёте электромагнитного момента, а также элементы с резким изменением магнитного поля. С этой точки зрения определяющим элементом магнитной системы является низкоскоростной ротор, так как именно в нём происходит модуляция магнитного поля с образованием большого числа пространственных гармоник и, следовательно, распределение магнитного поля в этой области носит резко неоднородный характер. На первом

этапе моделирования была проведена оценка оптимального количества элементов сетки, которое укладывается на гранях сегментов модулятора, обеспечивающее точное решение. За базовые приняты грани, обращённые к воздушным зазорам. Число элементов сетки на этих гранях являлось варьируемой переменной. Число элементов сетки на остальных гранях сегментов определялось автоматически из пропорции, по которой число элементов на базовой грани и число элементов на перпендикулярной ей грани относятся друг к другу также, как их размеры с округлением до ближайшего целого значения. Зависимость рассчитанного электромагнитного момента, действующего на низкоскоростной ротор, от числа элементов сетки на базовой грани приведена на рисунке 14. Ухудшение параметров сетки приводит к значительному занижению расчётного электромагнитного момента. При увеличении числа элементов сетки наблюдается стабилизация решения. Большое число элементов сетки в значительной мере увеличивает время расчёта, в связи с чем для рассматриваемого варианта магнитной системы оптимальным числом элементов сетки на базовой грани принято 11, так как дальнейшее увеличение частоты дискретизации не приводит к значительному увеличению точности расчёта электромагнитного момента. Часть магнитной системы с оптимальной расчётной сеткой представлена на рисунке 15. Общее число элементов сетки в двумерной модели 62458. Расчётная картина поля для этой модели в статическом режиме представлена на рисунке 16.

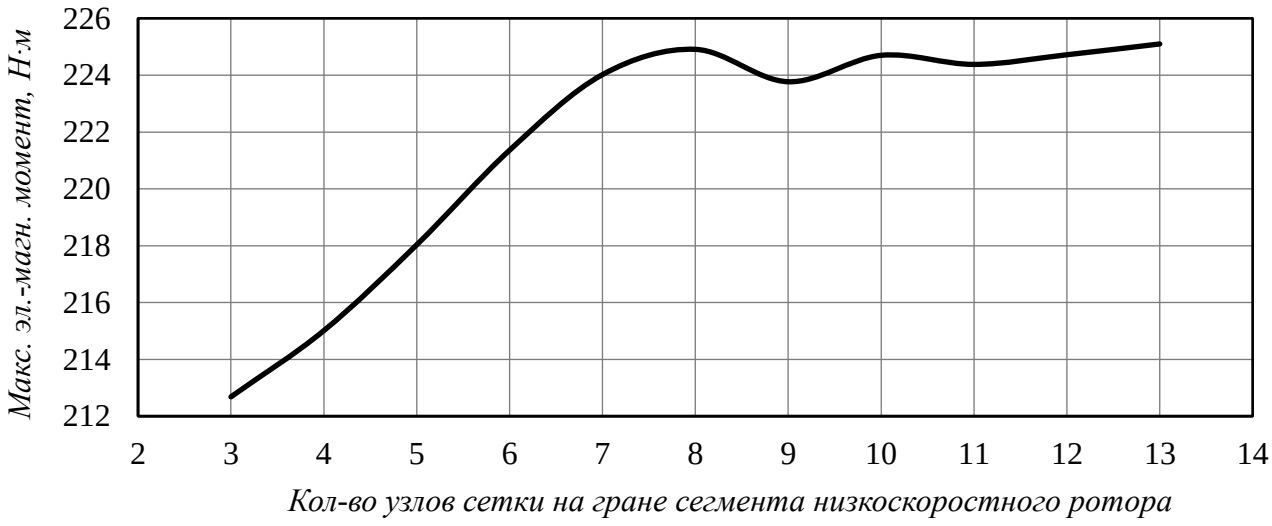


Рисунок 14 – Зависимость максимального момента низкоскоростного ротора от числа элементов сетки на базовой грани

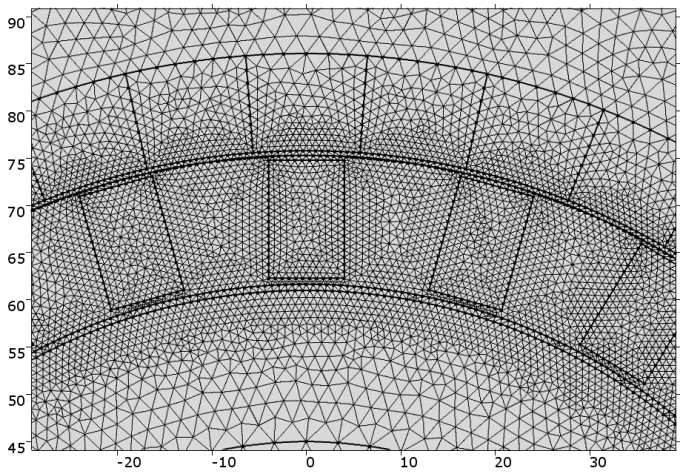
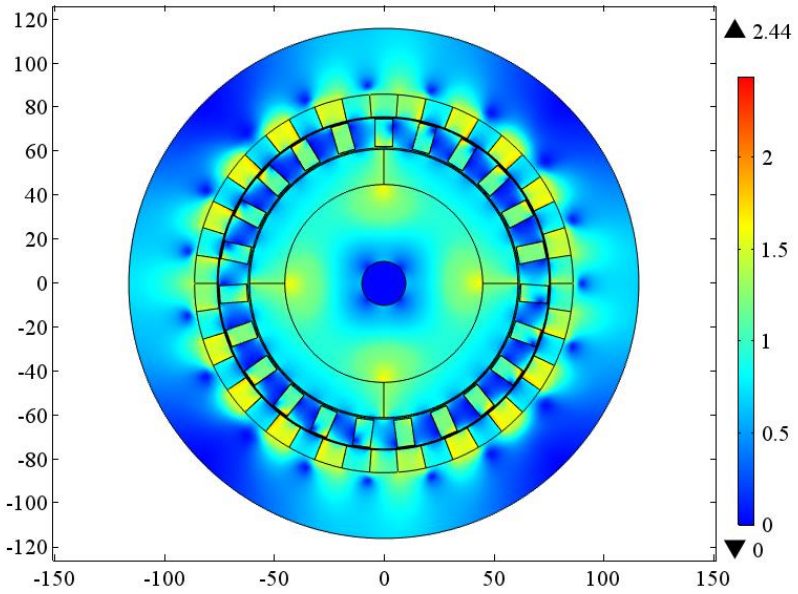
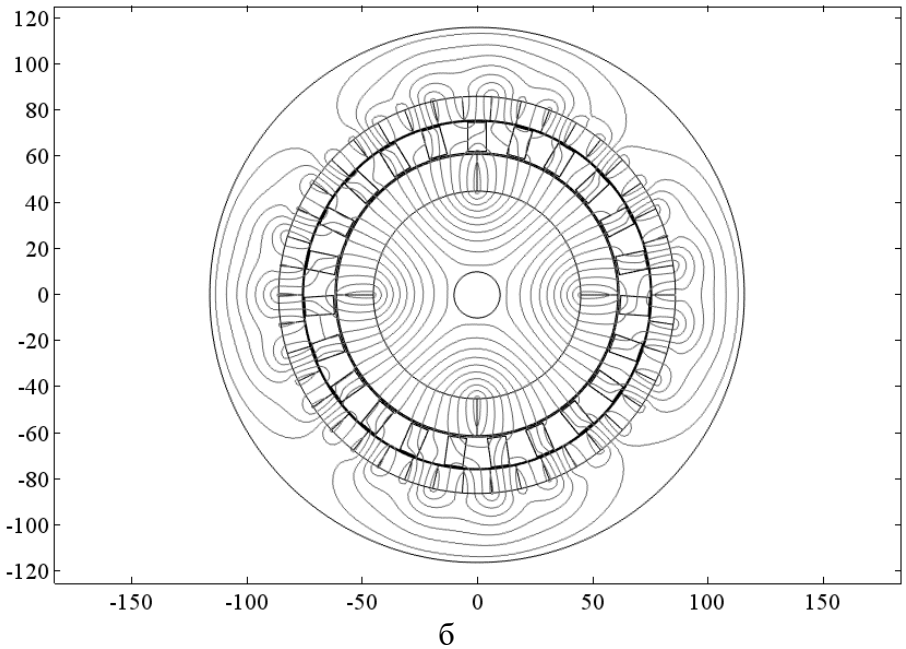


Рисунок 15 – Расчётная сетка для модели магнитной передачи



а



б

Рисунок 16 – Расчётное распределение магнитного поля в магнитной передаче:
а – магнитная индукция (Т); б – силовые линии магнитного поля

2.4 Моделирование электромагнитных процессов в магнитной передаче в статическом режиме

2.4.1 Основные уравнения и допущения

Моделирование статических характеристик магнитной передачи в основном проводилось в двумерном приближении (пп. 2.4.2, 2.4.3). Статическая трёхмерная постановка задачи используется только для учёта краевых эффектов (п. 2.4.4.).

Расчёт статического магнитного поля в двумерном приближении производился с учётом следующих **допущений**:

1. не учитывались краевые эффекты;
2. характеристики магнитомягких материалов задавались при помощи основной кривой намагничивания без учёта магнитного гистерезиса;
3. свойства постоянных магнитов определялись остаточной магнитной индукцией и углом наклона линеаризованной кривой размагничивания;
4. расчёт нагрузочной характеристики проводился пошаговым методом без учёта магнитных потерь;
5. расчётная область ограничена немагнитной окружностью, в любой точке которой вектор магнитной индукции принят касательным (18).

Расчётные уравнения и граничные условия формировались относительно векторного магнитного потенциала и известных источников магнитного поля

$$\nabla^2 \mathbf{A} = \mu_0 \nabla \times \mathbf{M}, \tag{15}$$

$$\mathbf{n} \times \left(\mathbf{A}_1 - \mathbf{A}_2 \right) = \mathbf{0}, \tag{16}$$

$$\mathbf{n} \times \left(\left[\mu_0^{-1} \nabla \times \mathbf{A}_1 - \mathbf{M}_1 \right] - \left[\mu_0^{-1} \nabla \times \mathbf{A}_2 - \mathbf{M}_2 \right] \right) = \mathbf{0}, \tag{17}$$

$$\mathbf{n} \times \mathbf{A}_{\text{вн}} = \mathbf{0}, \tag{18}$$

где $\mathbf{M}$ — вектор намагниченности, А/м;

$\mathbf{A}$ — векторный магнитный потенциал, Вб/м;

$\mathbf{A}_1$, $\mathbf{A}_2$ — векторные магнитные потенциалы на границе смежных областей 1 и 2, Вб/м;

$\mathbf{A}_{\text{вн}}$ — векторный магнитный потенциал на внешней границе расчётной области, Вб/м;

n — вектор нормали.

При расчёте трёхмерного статического магнитного поля принимался тот же набор **допущений**, что и при постановке задачи в двумерном приближении за исключением первого и с модификацией последнего, согласно которому расчётная область ограничена не окружностью, а цилиндрической немагнитной поверхностью, в каждой точке которой вектор магнитной индукции обнуляется (22), (23). При постановке статической трёхмерной задачи расчётные уравнения и граничные условия формировались относительно скалярного магнитного потенциала и известных источников магнитного поля

$$\nabla^2 V_{\text{m}} = \nabla \cdot \mathbf{M}, \tag{19}$$

$$\mathbf{n} \cdot \left(\nabla V_{\text{m}\,1} - \nabla V_{\text{m}\,2} \right) = 0, \tag{20}$$

$$\mathbf{n} \times \left(\left[\mathbf{M}_1 - \nabla V_{\text{m}\,1} \right] - \left[\mathbf{M}_2 - \nabla V_{\text{m}\,2} \right] \right) = \mathbf{0}, \tag{21}$$

$$\mathbf{n} \cdot \nabla V_{\text{m вн}} = 0, \tag{22}$$

$$\mathbf{n} \times \nabla V_{\text{m вн}} = \mathbf{0}, \tag{23}$$

где V_{m} — скалярный магнитный потенциал, А;

$V_{\text{m}\,1}$, $V_{\text{m}\,2}$ — скалярные магнитные потенциалы на границе смежных областей 1 и 2, А;

$V_{\text{m вн}}$ — скалярный магнитный потенциал на внешней границе расчётной области, А.

Расчёт электромагнитного момента производился через тензор натяжений Максвелла [113]. Вектор плотности силы определяется по формуле

$$\mathbf{f} = \mu_0 \left(\left(\mathbf{nH} \right) \mathbf{H} - 0{,}5 \mathbf{n} H^2 \right), \tag{24}$$

где **H** — вектор напряжённости магнитного поля, А/м.

В зависимости от применяемой потенциальной формулировки

$$\mathbf{H} = -\nabla V_{\text{m}}, \tag{25}$$

или

$$\mathbf{H} = \mu_0^{-1} \nabla \times \mathbf{A} - \mathbf{M}. \quad (26)$$

Электромагнитный момент, действующий на роторы магнитной передачи

$$\mathbf{T} = \int_{S_\Gamma} (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) \times \mathbf{f} \, dS, \quad (27)$$

где $S_г$ — произвольная замкнутая поверхность, ограничивающая элемент, на который производится расчёт электромагнитного момента.

2.4.2 Моделирование и анализ угловой характеристики электромагнитного момента

Основной функцией магнитной передачи является бесконтактное преобразование частоты вращения и момента за счёт взаимодействия магнитных полей. При этом по своему принципу действия магнитная передача является синхронным механизмом. Электромагнитный момент образуется в результате взаимодействия двух взаимно неподвижных магнитных полей. Угол между векторами магнитной индукции этих полей по аналогии с синхронными электрическими машинами в дальнейшем называется углом нагрузки (Θ) [114].

При питании обмотки синхронной электрической машины постоянным током магнитное поле в воздушном зазоре неподвижно. Если значение этого тока по фазам соответствует мгновенному распределению токов в трёхфазной системе в определённый момент времени, то становится возможным получить угловую характеристику электромагнитного момента при помощи вращения ротора и расчёта действующего на него момента. Угол нагрузки при данной постановке задачи соответствует геометрическому углу поворота ротора, умноженному на число пар полюсов электрической машины.

В магнитной передаче вращающееся магнитное поле создаётся не обмоткой с переменным током, а механическим вращением одного из роторов. Для того чтобы получить угловую характеристику электромагнитного момента, необходимо заблокировать один из роторов магнитной системы, поворачивая другой. Отличительной особенностью магнитной передачи является наличие двух роторов,

каждый из которых может быть заблокирован. Период изменения момента в угловой характеристике в обоих случаях соответствует повороту одного из роторов на два его полюсных деления при заблокированном втором роторе. Для рассматриваемого варианта магнитной передачи (таблица 1) геометрический угол поворота высокоскоростного ротора, соответствующий одному периоду угловой характеристики, составляет 180°, а для низкоскоростного ротора — 15,65° (угол между сегментами). Таким образом, чтобы не использовать малые приращения углов поворота при пошаговом моделировании, целесообразно рассчитывать угловую характеристику электромагнитного момента при заблокированном низкоскоростном роторе.

Для получения угловой характеристики магнитной передачи проведено моделирование, при котором высокоскоростной ротор поворачивается в условно положительном направлении (против часовой стрелки), а низкоскоростной ротор заблокирован. Полученные в результате пошагового расчёта зависимости электромагнитного момента, действующего на высоко- и низкоскоростной роторы, от угла нагрузки приведены на рисунках 17, 18 соответственно. Моменты меняются синусоидально, а их отношение постоянно и равно передаточному отношению. Максимальный электромагнитный момент на низкоскоростном роторе составил 226,3 Н·м, на высокоскоростном 19,7 Н·м.

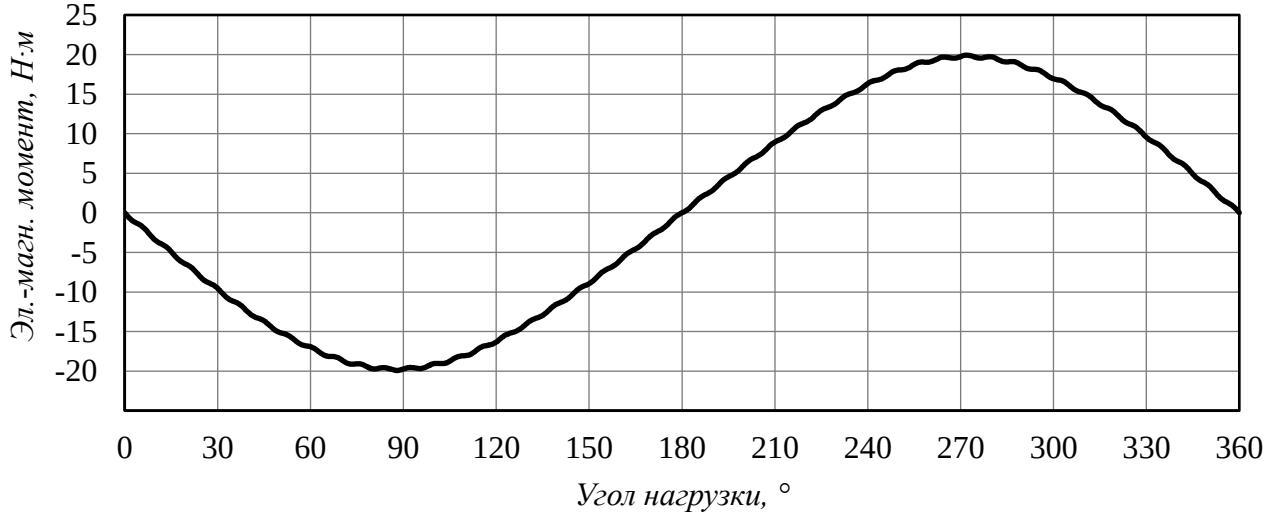


Рисунок 17 – Угловая характеристика электромагнитного момента для высокоскоростного ротора

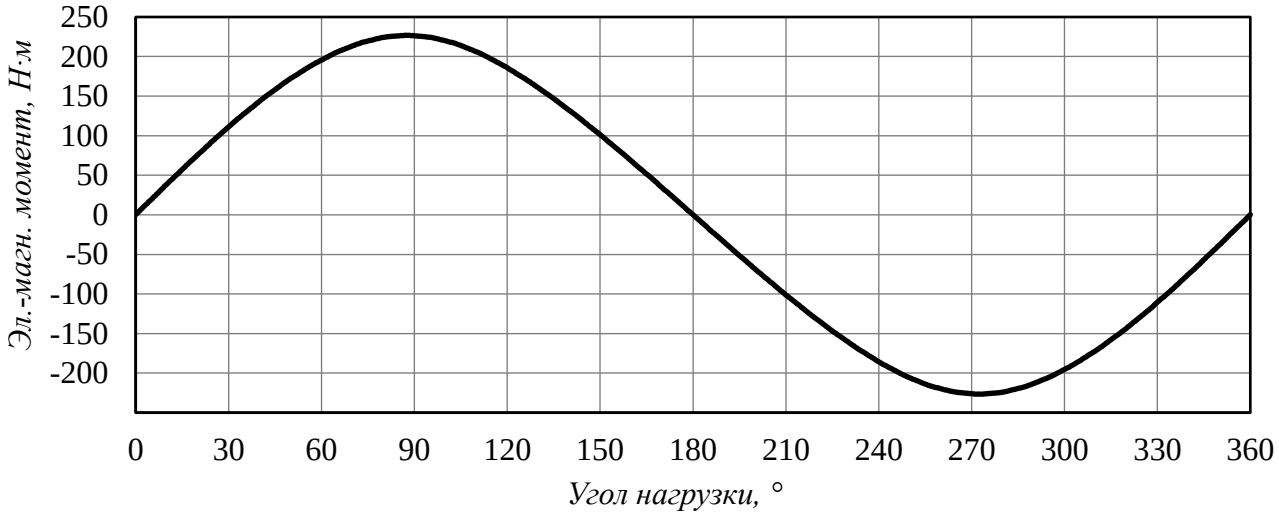
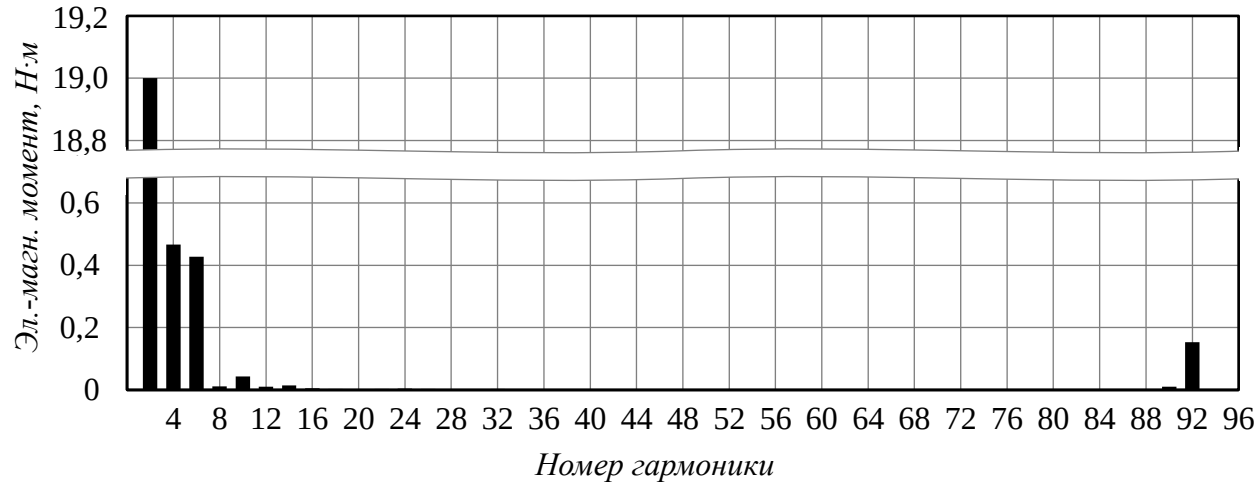


Рисунок 18 – Угловая характеристика электромагнитного момента для низкоскоростного ротора

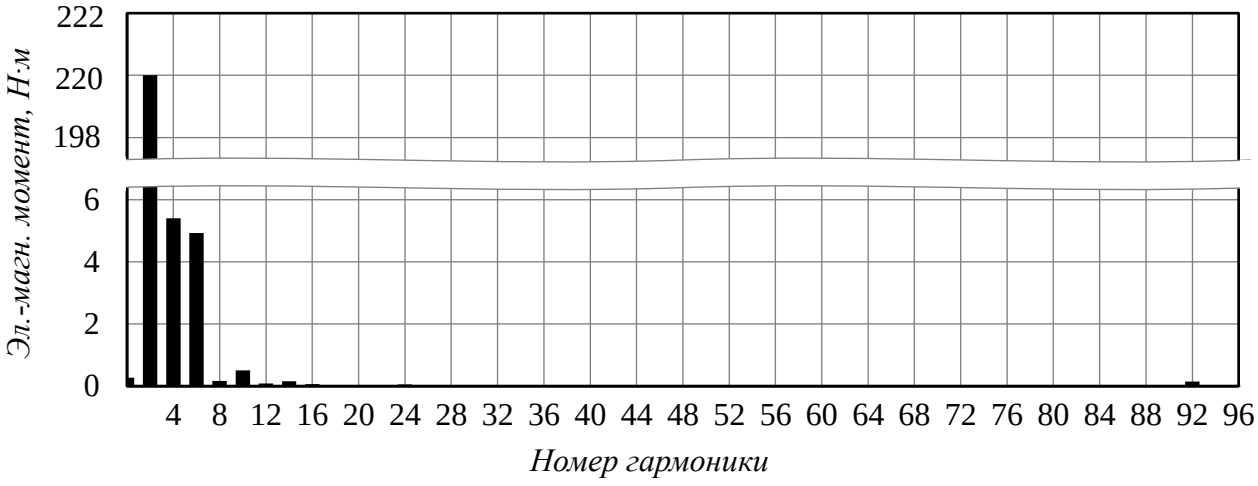
Электромагнитный момент имеет реактивные составляющие. Для определения частот этих составляющих проведено разложение полученных кривых в ряд Фурье. Результаты этого разложения представлены на рисунке 19, на котором номер гармоники — это число периодов, которое она имеет при полном обороте высокоскоростного ротора. В спектре помимо рабочей гармоники, также присутствуют четвертая и шестая гармоники, возникающие из-за насыщения некоторых частей магнитной системы и её несимметрии, а также 92 гармоника, наличие которой обусловлено зубцовым моментом, вызванным взаимодействием высокоскоростного ротора с сегментами низкоскоростного ротора. Номер этой гармоники реактивного момента определяется как наименьшее общее кратное от числа полюсов взаимодействующих элементов [115]. В данном случае наименьшее общее кратное от числа сегментов низкоскоростного ротора и числа полюсов на высокоскоростном роторе

$$\text{НОК}(2p_{\text{в}}, N_{\text{с}}) = \text{НОК}(2 \cdot 2, 23) = 92. \quad (28)$$

Используя аналогичные рассуждения, в спектре должна присутствовать гармоника с номером 84, которая определяется взаимодействием постоянных магнитов статора и высокоскоростного ротора. Слабая выраженность этой гармоники обусловлена тем, что магнитный поток от постоянных магнитов статора шунтируется сегментами низкоскоростного ротора и фактически не проникает в область высокоскоростного ротора.



а



б

Рисунок 19 – Гармонический состав угловой характеристики электромагнитного момента: а – высокоскоростного ротора; б – низкоскоростного ротора

Угловая характеристика электромагнитного момента требуется при расчёте динамических режимов магнитной передачи (глава 3). На первом этапе проектирования для оценки удельных параметров магнитной передачи достаточно использовать только отдельные характерные точки этой кривой, соответствующие определённым положениям роторов, что уменьшает время расчёта. Если зафиксировать относительное положение магнитных систем статора и низкоскоростного ротора, при котором продольная ось одного из полюсов статора совпадает с осью симметрии сегмента низкоскоростного ротора, как это показано на рисунке 20 (а – в) (верхний постоянный магнит и верхний сегмент), то, вращая высокоскоростной ротор, можно выделить три характерных положения.

Устойчивому состоянию в отсутствие нагрузки соответствует такое положение высокоскоростного ротора, при котором продольная ось одного из его полюсов совпадает с продольной осью разноимённого полюса статора и осью симметрии сегмента низкоскоростного ротора (рисунок 20 (а)). Неустойчивому состоянию без нагрузки соответствует аналогичное положение, но полюса статора и высокоскоростного ротора с совпадающими продольными осями должны быть одноимёнными (рисунок 20 (б)), т. е. высокоскоростной ротор должен быть повёрнут от устойчивого положения равновесия на 180 электрических градусов. При любом отклонении от точки устойчивого равновесия высокоскоростной ротор стремится вернуться в эту точку. В связи с этим при его повороте против часовой стрелки (условное положительное направление) на него действует отрицательный момент (по часовой стрелке), стремящийся вернуть ротор в положение устойчивого равновесия. Максимум момента достигается при повороте ротора относительно устойчивой точки равновесия на угол, соответствующий половине его полюсного деления (рисунок 20 (в)).

Каждой из точек нулевого момента соответствуют свои предельные состояния магнитной системы. Устойчивая точка нулевого момента (рисунок 20 (а)) характеризуется тем, что большинство постоянных магнитов работают согласно, создавая при этом максимально возможную МДС и магнитный поток в ярмах магнитной системы. Любое смещение от этой точки будет приводить к частично встречной работе постоянных магнитов, уменьшая суммарную МДС и магнитный поток (рисунок 21). Следовательно, необходимо проводить расчёт магнитной системы в данной точке для определения необходимых поперечных сечений магнитопроводов.

Важно отметить, что данный способ не может быть использован при определении сечения сегментов низкоскоростного ротора, так как увеличение их поперечного сечения, с одной стороны, ведёт к уменьшению насыщения и соответствующему увеличению магнитной индукции и момента, а с другой стороны, увеличивает потоки рассеяния во внешнем немагнитном зазоре, что уменьшает максимальный момент.

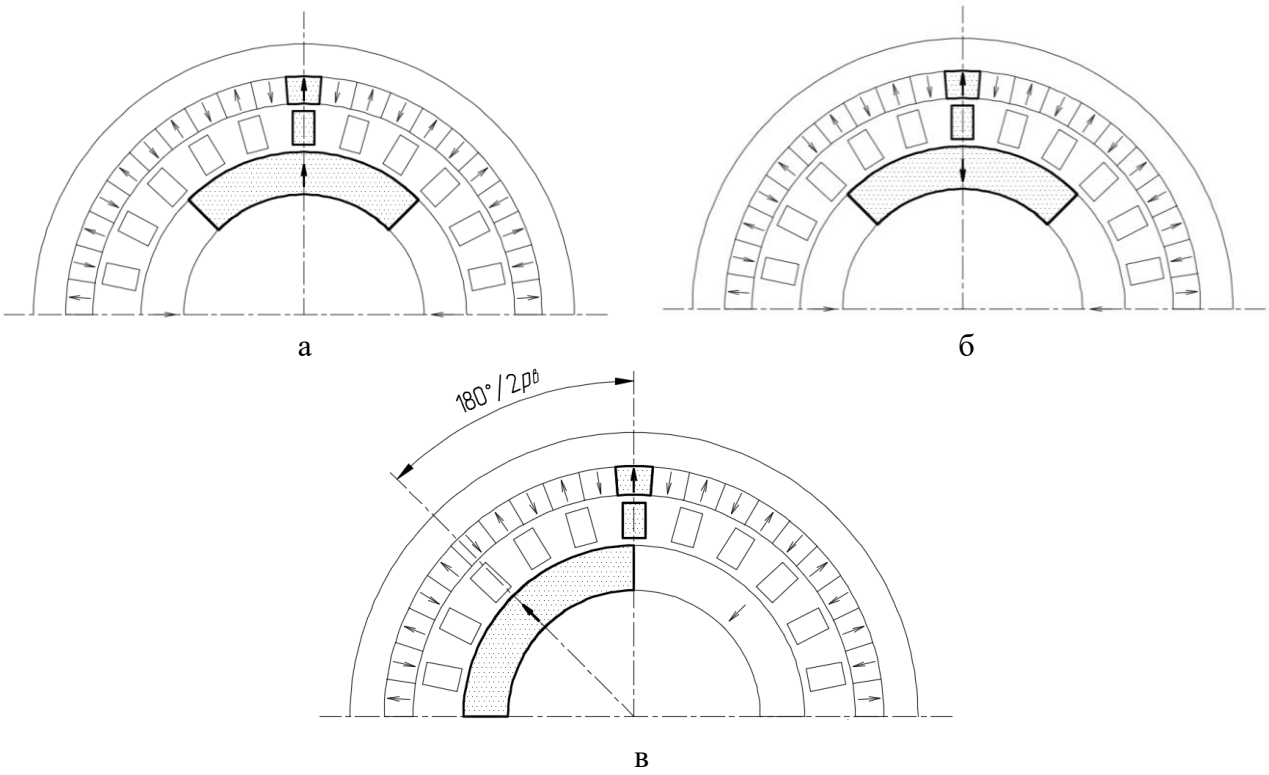


Рисунок 20 – Характерные относительные положения элементов магнитной передачи:
а – устойчивая точка нулевого момента; б – неустойчивая точка нулевого момента; в – точка максимального момента

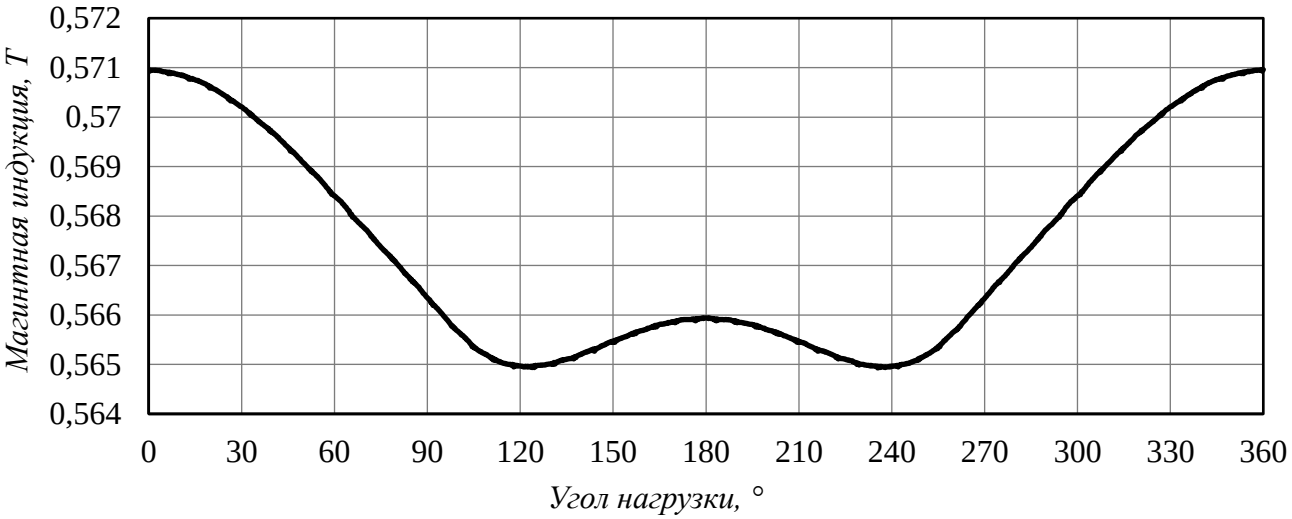


Рисунок 21 – Расчётная зависимость среднего значения модуля вектора магнитной индукции в ярме статора от угла нагрузки

Неустойчивая точка нулевого момента (рисунок 20 (б)) характеризуется тем, что постоянные магниты статора и высокоскоростного ротора работают встречно, создавая максимально возможные в данной системе поля размагничивания друг друга (рисунок 22). Магнитная передача может проходить через данную точку только лишь при «срыве», когда превышен максимальный момент. Таким образом,

производить расчёт в данной точке необходимо для проверки условия стабильной работы постоянных магнитов в аварийных режимах. Напряжённость магнитного поля в области постоянных магнитов должна быть меньше значений, при которых начинается их необратимое размагничивание [116].

Таким образом, из трёх характерных точек выделяются две критические точки, которые соответствуют наиболее тяжёлым в магнитном отношении состояниям системы. Анализ магнитного поля в них позволяет обоснованно определить сечения магнитопроводов и проверить условия стойкости постоянных магнитов к размагничиванию в аварийных режимах.

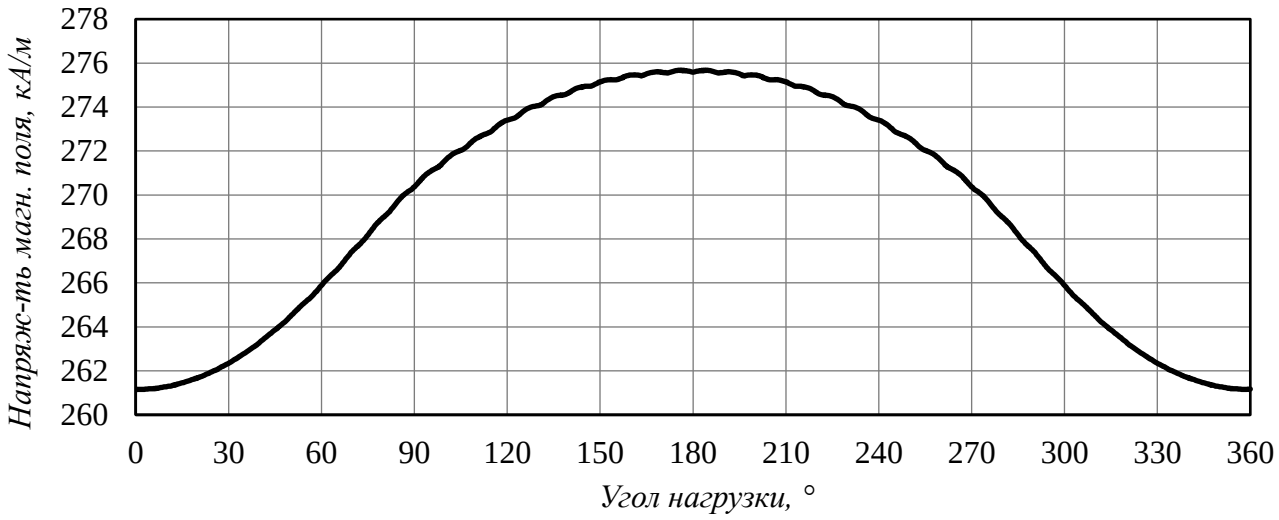


Рисунок 22 – Зависимость радиальной составляющей вектора напряжённости магнитного поля в ПМ от угла нагрузки.

Положение рабочих точек в элементах магнитной системы исследуемого варианта магнитной передачи в соответствующих характерных точках приведено на рисунках 23 – 27. Большинство рабочих точек в магнитомягких материалах находится вплоть до колена основной кривой намагничивания. Положение рабочих точек в постоянных магнитах гарантирует их надёжную работу даже в аварийных режимах, что не могло быть обеспечено в образцах магнитных передач 1970-х годов и являлось одним из главных ограничивающих факторов использования постоянных магнитов в ранних прототипах магнитных передач [11].

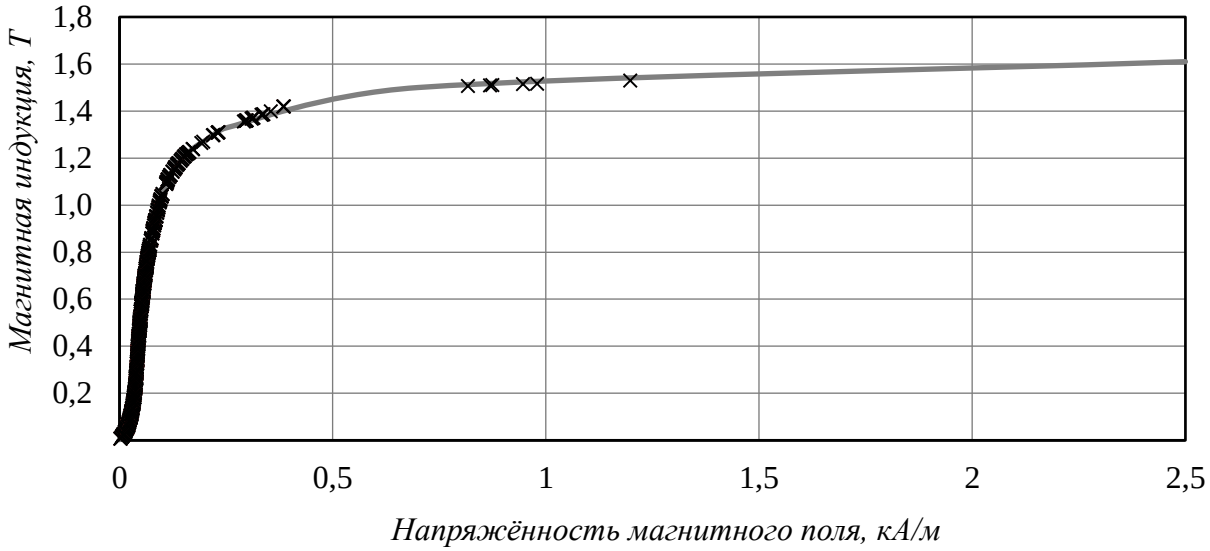


Рисунок 23 – Положение рабочих точек в ярме статора

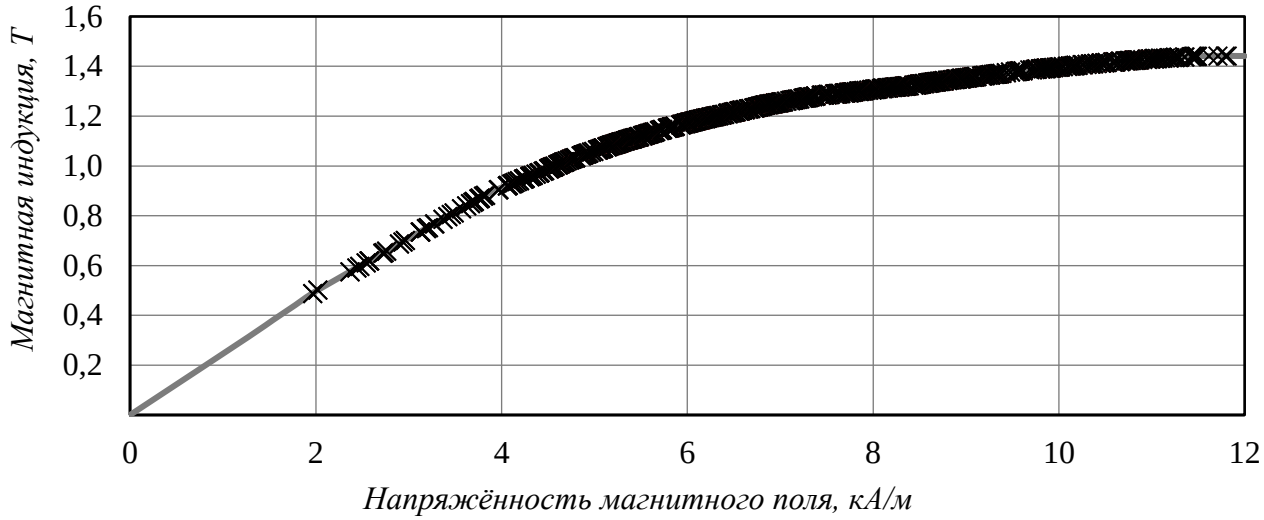


Рисунок 24 – Положение рабочих точек в ярме низкоскоростного ротора

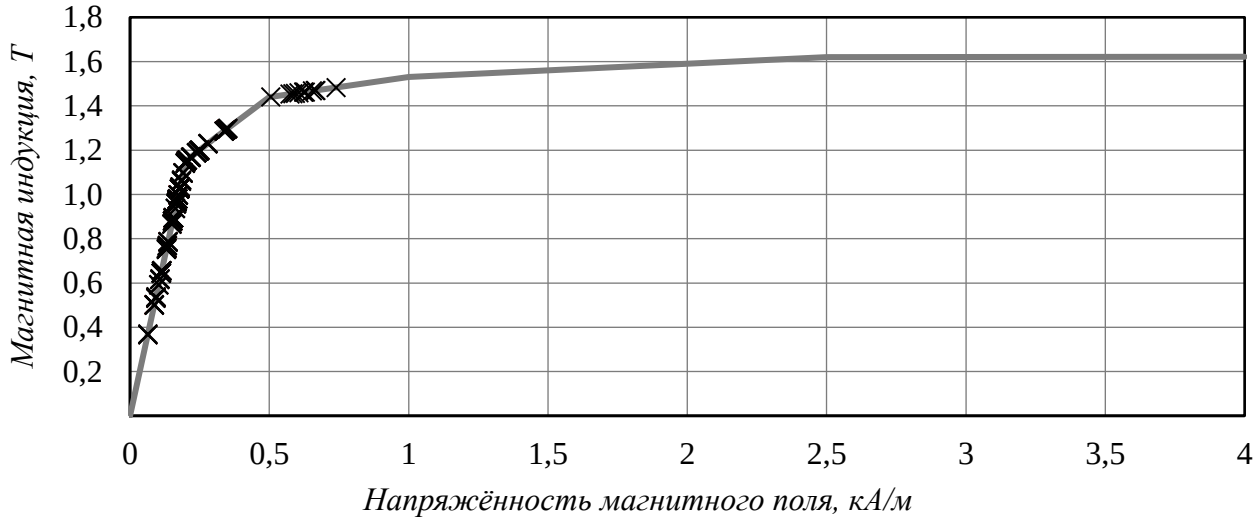


Рисунок 25 – Положение рабочих точек в ярме высокоскоростного ротора

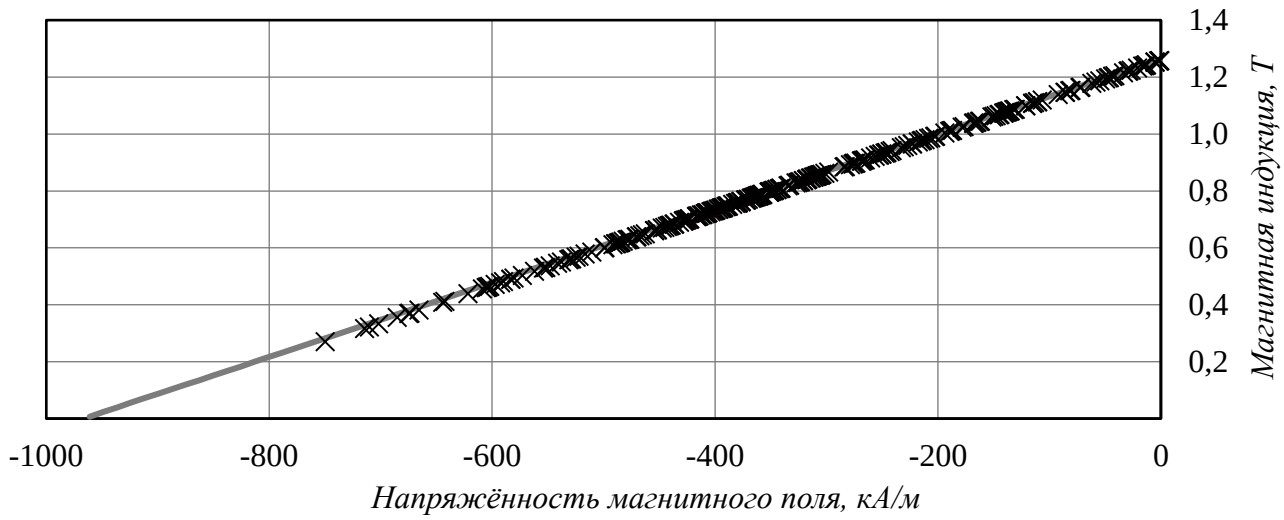


Рисунок 26 – Положение рабочих точек в ПМ статора

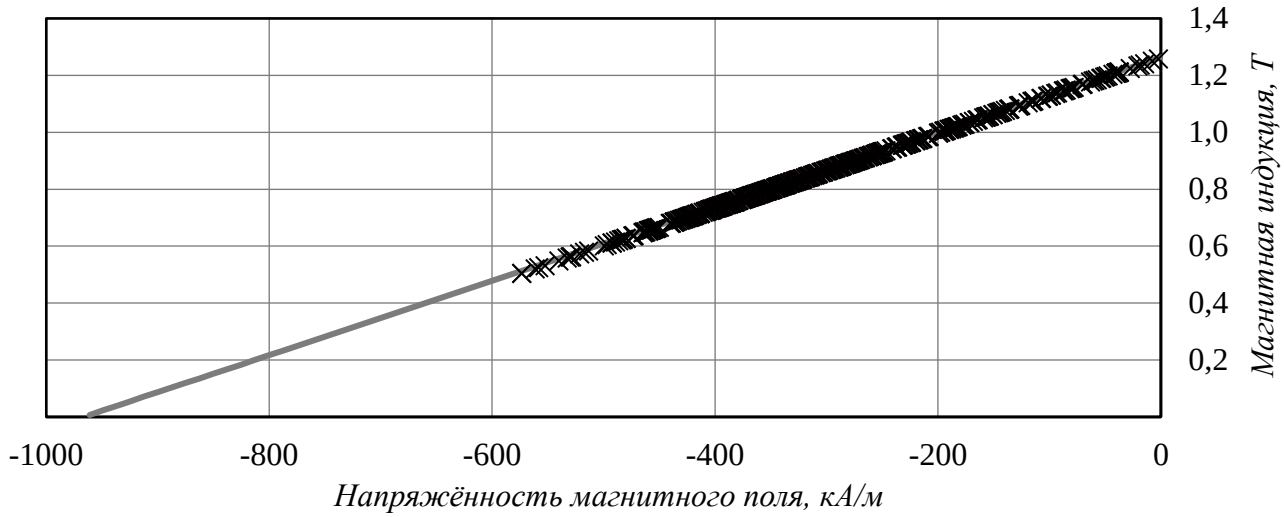


Рисунок 27 – Положение рабочих точек в ПМ высокоскоростного ротора

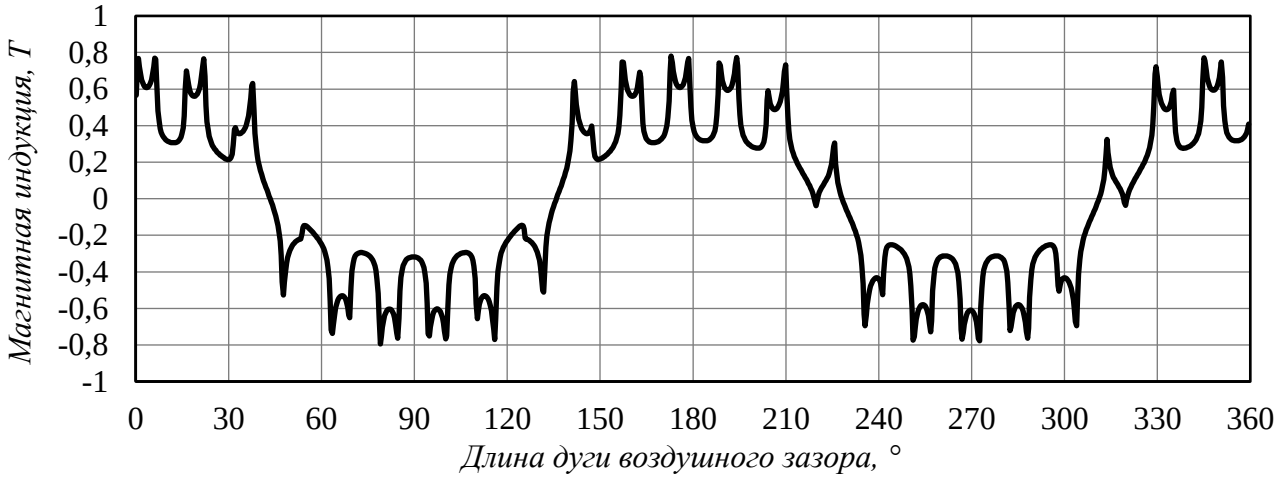
2.4.3 Моделирование и анализ распределения магнитного поля в немагнитных зазорах

Низкоскоростной ротор магнитной передачи, в общем случае называемый модулятором, выполняет функцию выделения из магнитного поля рабочей гармоники, участвующей в создании активного момента. Это преобразование не идеально, в связи с чем образуются пространственные гармоники магнитного поля, движущиеся асинхронно относительно элементов магнитной системы, вызывая в них магнитные потери. Знание частот перемагничивания элементов магнитной системы позволяет обосновать конструктивные решения, которые необходимо принять для борьбы с магнитными потерями. Результаты расчётов радиальной

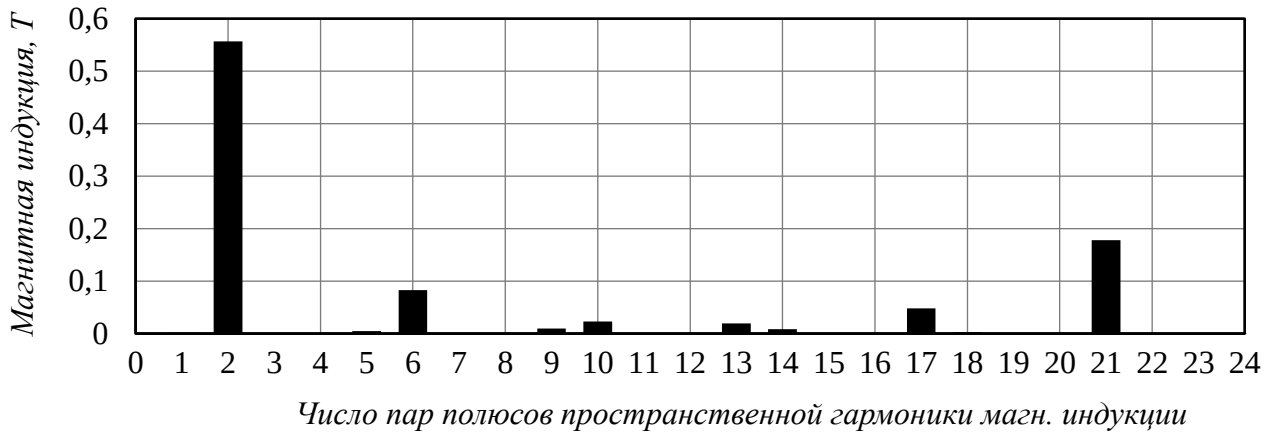
составляющей вектора магнитной индукции в каждом из немагнитных зазоров приведены на рисунках 28, 29.

Если выделить из магнитной передачи статор, то его магнитная система находится в магнитном поле, являющемся результатом взаимодействия высокоскоростного и низкоскоростного роторов. Гармонический состав этого поля представлен на рисунке 28 (б), из которого видно, что основная пространственная гармоника магнитного поля имеет две пары полюсов, что равно числу пар полюсов высокоскоростного ротора. Эта гармоника замыкается через магнитопровод неподвижного статора. Частота перемагничивания этой гармоникой элементов магнитной системы статора

$$f_{\text{с}} = \frac{p_{\text{в}} \cdot n_{\text{в}}}{60} = \frac{N_{\text{с}} \cdot n_{\text{н}}}{60}. \qquad (29)$$



а



б

Рисунок 28 – Радиальная составляющая вектора магнитной индукции во внешнем немагнитном зазоре при отсутствии в магнитной системе ПМ статора:
а – пространственное распределение; б – гармонический состав

Гармоника с 21 парой полюсов сцепляется с неподвижной системой постоянных магнитов статора и является неподвижной относительно него. Эта рабочая гармоника, создающая активный электромагнитный момент [117 – 119].

Если выделить из магнитной передачи высокоскоростной ротор, то его магнитная система вращается в магнитном поле, являющемся результатом взаимодействия магнитных систем статора и низкоскоростного ротора. Гармонический состав этого поля изображён на рисунке 29 (б), из которого видно, что основная гармоника имеет две пары полюсов, что соответствует числу пар полюсов высокоскоростного ротора. Эта гармоника является рабочей и неподвижной относительно высокоскоростного ротора и поэтому не создаёт магнитные потери в нём. Основной асинхронной относительно высокоскоростного ротора является гармоника с 21 парой полюсов, возникающая в результате проникновения во внутренний немагнитный зазор немодулированного поля магнитной системы статора. Эта гармоника неподвижна в пространстве и перемагничивает высокоскоростной ротор с частотой

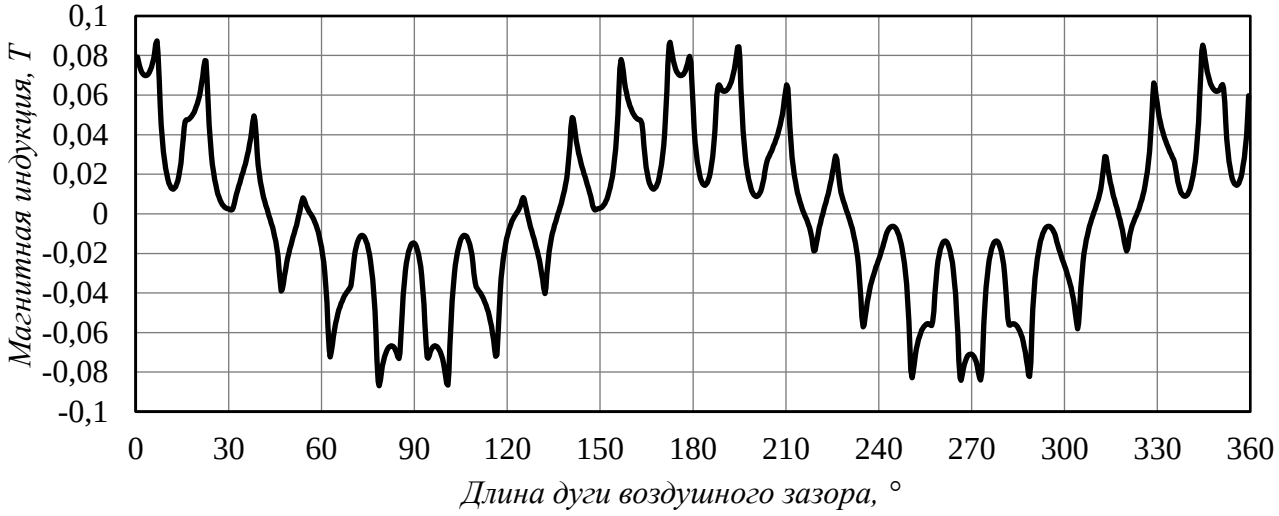
$$f_{\text{в}} = \frac{p_{\text{с}} \cdot n_{\text{в}}}{60}. \tag{30}$$

Магнитная система низкоскоростного ротора обращена к обоим немагнитным зазорам. Со стороны внешнего зазора низкоскоростной ротор вращается в поле статора с 21 парой полюсов (рисунок 30 (б)). Частота перемагничивания может быть определена как

$$f_{\text{н}} = \frac{p_{\text{с}} \cdot n_{\text{н}}}{60}. \tag{31}$$

Со стороны внутреннего зазора низкоскоростной ротор вращается в магнитном поле, имеющем широкий частотный спектр (рисунок 31 (б)), основная гармоника которого имеет две пары полюсов и вращается относительно низкоскоростного ротора со частотой ($n_{\text{в}} - n_{\text{н}}$). Частота перемагничивания низкоскоростного ротора этой гармоникой

$$f_{\text{н}} = \frac{p_{\text{в}} \cdot \left(n_{\text{в}} - n_{\text{н}}\right)}{60} = \frac{p_{\text{в}} \cdot \left(n_{\text{н}} \cdot i - n_{\text{н}}\right)}{60} = \frac{p_{\text{в}} \cdot n_{\text{н}} \cdot \left(i - 1\right)}{60} = \frac{p_{\text{в}} \cdot n_{\text{н}} \cdot \left(\frac{p_{\text{с}}}{p_{\text{в}}}\right)}{60} = \frac{p_{\text{с}} \cdot n_{\text{н}}}{60}. \tag{32}$$



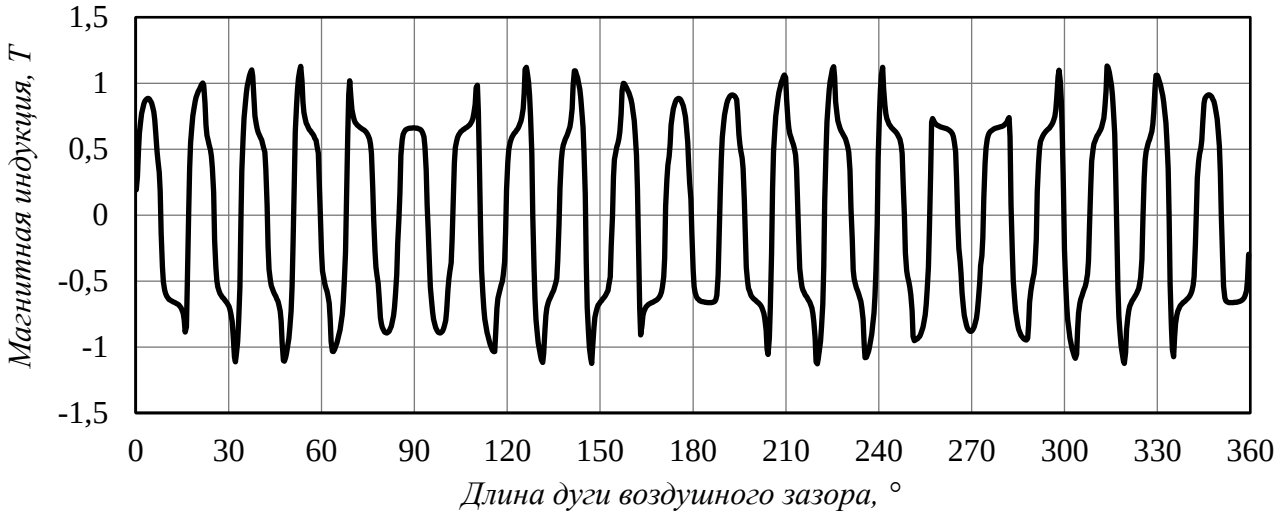
а

б

Рисунок 29 – Радиальная составляющая вектора магнитной индукции во внутреннем немагнитном зазоре при отсутствии в магнитной системе ПМ высокоскоростного ротора: а – пространственное распределение; б – гармонический состав

Для рассматриваемого варианта магнитной передачи при частоте вращения высокоскоростного ротора 500 об/мин частоты перемагничивания равны (30) – (32): для статора — 16 Гц, для высокоскоростного ротора — 175 Гц и для низкоскоростного ротора — 15,75 Гц. Наибольшая частота перемагничивания наблюдается в магнитной системе высокоскоростного ротора. Однако амплитуда этой гармоники магнитного поля мала (0,28 Т рисунок 29) по сравнению с амплитудой гармоники с частотой 16 Гц в статоре (0,56 Т рисунок 28). Известно, что потери на индуцированные токи пропорциональны магнитной индукции и второй степени частоты перемагничивания. Для статора это произведение равно 143 Т/с^2, в то время как для основной перемагничивающей гармоники высокоскоростного ротора оно составляет 857 Т/с^2. Откуда следует вывод о

необходимости принимать меры по защите высокоскоростного ротора от индуцированных токов, в особенности его постоянных магнитов, для чего их необходимо сегментировать.



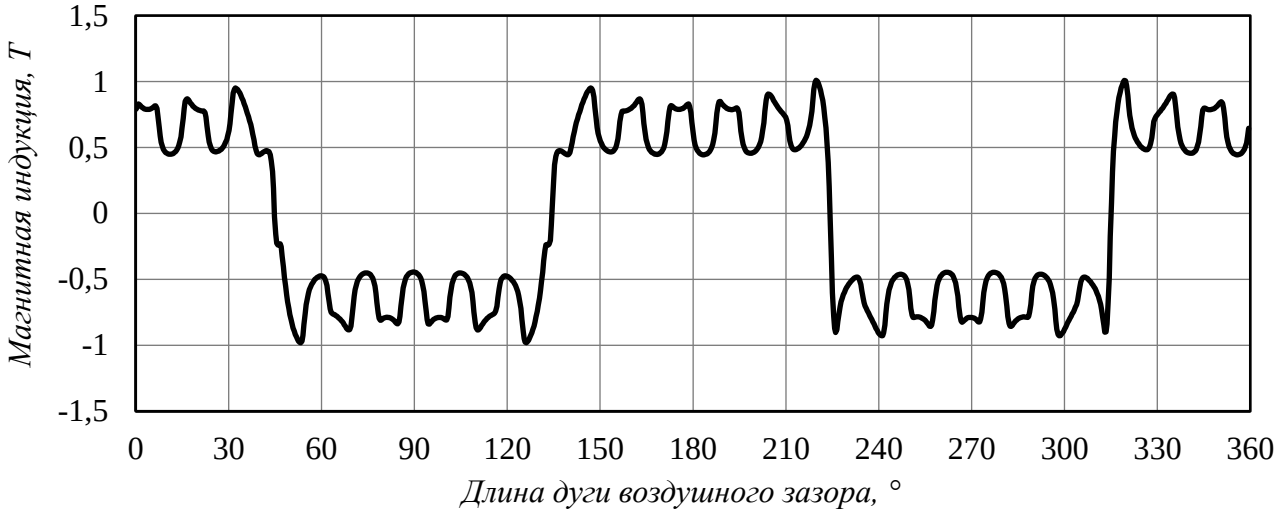
а

б

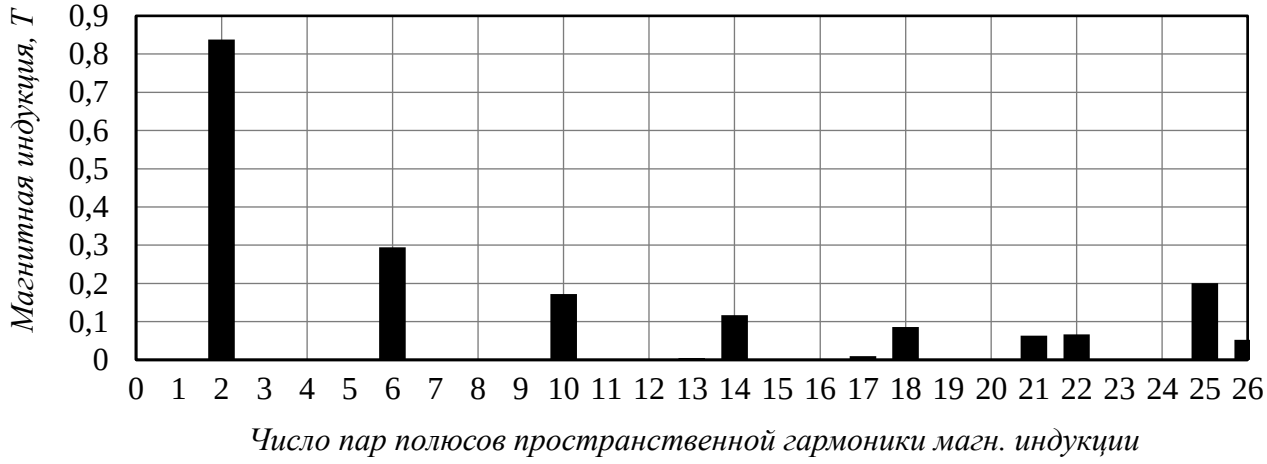
Рисунок 30 – Радиальная составляющая вектора магнитной индукции во внешнем немагнитном зазоре при отсутствии в магнитной системе ПМ высокоскоростного ротора:
а – пространственное распределение; б – гармонический состав

На рисунке 29 видно, что благодаря наличию низкоскоростного ротора (модулятора) происходит изменение гармонического состава поля постоянных магнитов статора таким образом, что в нём, помимо гармонической составляющей, определённой числом пар полюсов статора, появляется ещё и гармоническая составляющая с числом пар полюсов высокоскоростного ротора. При внесении в такую систему постоянных магнитов высокоскоростного ротора, (рисунок 31) происходит силовое взаимодействие по взаимно неподвижным гармоникам

модулированного магнитного поля, создаваемого статором, и магнитного поля, создаваемого высокоскоростным ротором. С другой стороны, высокоскоростной ротор, благодаря наличию модулятора, создаёт во внешнем воздушном зазоре распределение магнитного поля, которое содержит гармонику, соответствующую основной гармонике магнитного поля статора (рисунок 28). При внесении в такое поле магнитной системы статора (рисунок 30) происходит силовое взаимодействие по взаимно неподвижным гармоникам магнитного поля статора и модулированного поля высокоскоростного ротора. Описанные эффекты лежать в основе принципа действия магнитной передачи.



а



б

Рисунок 31 – Радиальная составляющая вектора магнитной индукции во внутреннем немагнитном зазоре при отсутствии в магнитной системе ПМ статора:
а – пространственное распределение; б – гармонический состав

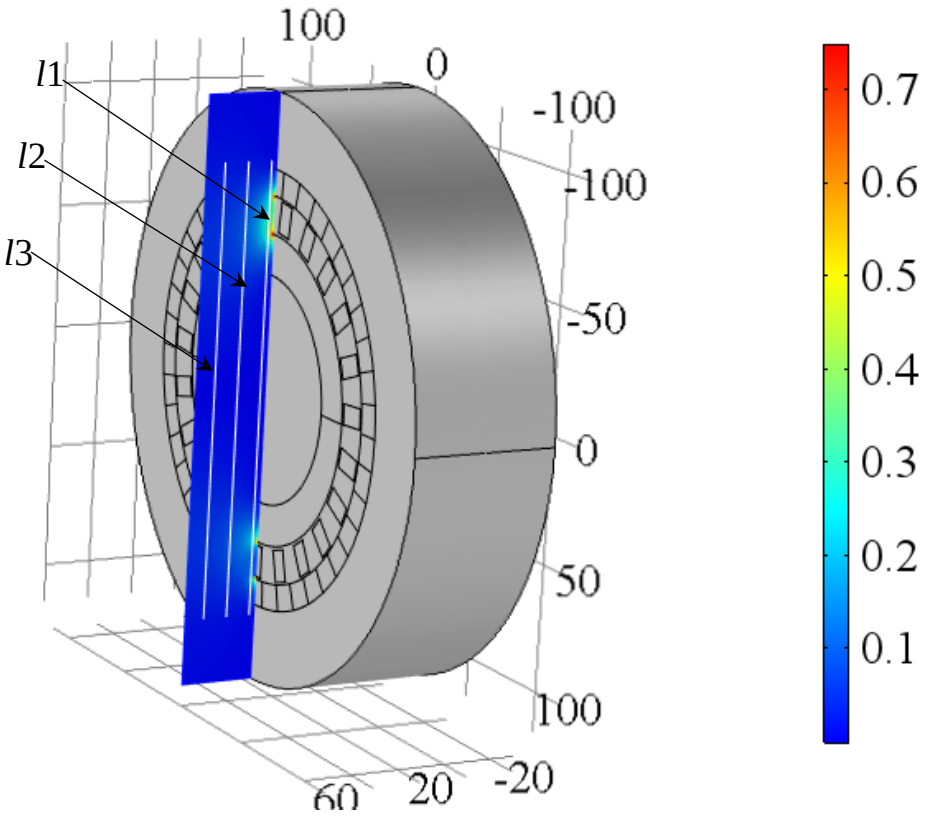
2.4.4 Моделирование и анализ влияния краевых эффектов

За счёт наличия двух немагнитных зазоров в магнитной передаче имеются выраженные краевые эффекты, из-за которых может наблюдаться уменьшение максимального электромагнитного момента до 40 % [21, 120].

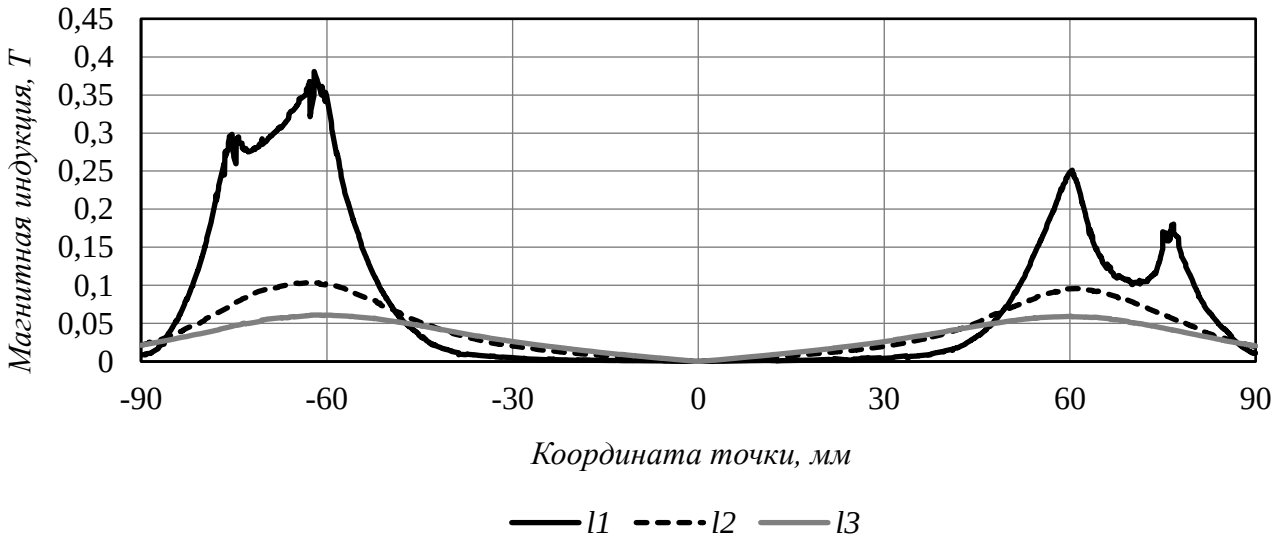
Для учёта влияния краевых эффектов на максимальный электромагнитный момент рассматриваемого варианта магнитной передачи проведено численное математическое моделирование её магнитной системы в 3D. Результаты расчёта приведены на рисунке 32 (а), на котором для визуализации потока выпучивания, проведена плоскость, перпендикулярная торцу магнитной системы. При этом плоскость проходит через ось симметрии одного из сегментов низкоскоростного ротора в нижней части и ровно посередине между сегментами в верхней части рисунка. На плоскости построена цветовая карта модуля вектора магнитной индукции, из которой видно, что максимальный магнитный поток рассеяния имеет место между сегментами модулятора, а магнитный поток рассеяния во внешнем немагнитном зазоре меньше, чем во внутреннем из-за разницы в их длине (1 мм и 1,3 мм соответственно). Также, на рисунке 32 (а) обозначены линии расчёта магнитного поля $l1$, $l2$, $l3$, отстающие от торца на 2 мм, 12 мм и 22 мм соответственно.

По результатам расчётов максимальный электромагнитный момент составил 159 Н·м, что соответствует уменьшению на 30 % по сравнению с результатом, полученным при 2D моделировании (пп. 2.4.2) без учёта краевых эффектов.

Из-за наличия краевых эффектов необходимо избегать расположения конструктивных элементов с высокой электропроводностью в непосредственной близости от торца магнитной системы, а также по возможности выбирать максимальное отношение длины магнитной передачи к её диаметру, за счёт чего влияние краевых эффектов становится менее выраженным по отношению к общему максимальному электромагнитному моменту.



а



б

Рисунок 32 – Магнитная индукция поля выпучивания в торцевой области:
а – магнитная индукция (Т) и линии расчёта *l*1, *l*2, *l*3; б – модуль вектора магнитной индукции на линиях расчёта

2.5 Моделирование электромагнитных процессов в магнитной передаче в рабочем режиме

2.5.1 Основные уравнения и допущения

При расчёте рабочих характеристик магнитной передачи моделирование проводилось как в 2D, так и в 3D. Расчёты в пп. 2.5.2, 2.5.3 производились в двумерном приближении с учётом ряда **допущений**:

1. не учитывались краевые эффекты;
2. не учитывались магнитные потери;
3. характеристики магнитомягких материалов задавались при помощи основной кривой намагничивания без учёта гистерезисных явлений;
4. свойства постоянных магнитов определялись остаточной магнитной индукцией и углом наклона линеаризованной кривой размагничивания;
5. расчётная область ограничена немагнитной окружностью, в любой точке которой вектор магнитной индукции принят касательным (18).

Расчётные уравнения и граничные условия формировались относительно векторного магнитного потенциала и известных источников магнитного поля в соответствии с уравнениями (15) – (18). При моделировании скорость одного из роторов задавалась постоянной, а скорость другого ротора определялась в соответствии с дополнительным уравнением движения

$$J\frac{d\omega}{dt}=\sum T, \tag{33}$$

где J — момент инерции ротора, кг·м^2;

ω — угловая скорость ротора, рад/с;

T — момент, согласно с (24) – (27), Н·м.

Расчёты в пп. 2.5.4, 2.5.5 производились в трёхмерной постановке с учётом следующих **допущений**:

1. гистерезисные характеристики магнитомягких материалов учитывались с применением модели Джилса-Атертона [121];

2. свойства постоянных магнитов определялись остаточной магнитной индукцией и углом наклона линеаризованной кривой размагничивания;

3. расчётная область ограничена немагнитной цилиндрической поверхностью, в любой точке которой вектор магнитной индукции принят касательным;

4. магнитное поле квазистационарное.

С целью уменьшения времени расчёта применялась смешанная потенциальная формулировка. Для электропроводящих областей, в которых возможно протекание индуцированных токов, и областей, охваченных индуцированными токами, уравнения и граничные условия формировались относительно векторного магнитного потенциала

$$\sigma\frac{d\mathbf{A}}{dt}+\frac{\nabla^2\mathbf{A}}{\mu_0}-\nabla\times\mathbf{M}=\mathbf{0}, \tag{34}$$

$$\mathbf{n}\times\left(\mathbf{A}_1-\mathbf{A}_2\right)=\mathbf{0}, \tag{35}$$

$$\mathbf{n}\times\left(\left[\mu_0^{-1}\nabla\times\mathbf{A}_1-\mathbf{M}_1\right]-\left[\mu_0^{-1}\nabla\times\mathbf{A}_2-\mathbf{M}_2\right]\right)=\mathbf{0}, \tag{36}$$

где σ — удельная электропроводность, См/м.

Для остальных областей формирование уравнений происходило относительно скалярного магнитного потенциала

$$\nabla^2 V_{\mathrm{m}}=\nabla\cdot\mathbf{M}, \tag{37}$$

$$\mathbf{n}\cdot\left(\nabla V_{\mathrm{m}\,1}-\nabla V_{\mathrm{m}\,2}\right)=0, \tag{38}$$

$$\mathbf{n}\times\left(\left[\mathbf{M}_1-\nabla V_{\mathrm{m}1}\right]-\left[\mathbf{M}_2-\nabla V_{\mathrm{m}\,2}\right]\right)=\mathbf{0}, \tag{39}$$

$$\mathbf{n}\cdot\nabla V_{\mathrm{m\,вн}}=0, \tag{40}$$

$$\mathbf{n}\times\nabla V_{\mathrm{m\,вн}}=\mathbf{0}. \tag{41}$$

На границах между смежными областями с двумя различными потенциальными формулировками граничные условия имеют вид

$$\mathbf{n}\cdot\left(\nabla\times\mathbf{A}-\mu_0\left[\mathbf{M}-\nabla V_{\mathrm{m}}\right]\right)=0, \tag{42}$$

$$\mathbf{n}\times\left(\left[\mu_0^{-1}\nabla\times\mathbf{A}-\mathbf{M}\right]+\nabla V_{\mathrm{m}}\right)=\mathbf{0}. \tag{43}$$

2.5.2 Моделирование и анализ реактивного момента

На роторы магнитной передачи действуют электромагнитные моменты двух типов — рабочий (активный) момент и реактивный момент. Рабочий электромагнитный момент создаётся посредством угла рассогласования между магнитными полями элементов магнитной системы (угла нагрузки).

Реактивный момент связан с тем, что высокоскоростной ротор вращается в неподвижном поле статора и внутри зубчатой структуры низкоскоростного ротора. Аналогичные рассуждения справедливы и для природы реактивного момента, действующего на низкоскоростной ротор, обладающий зубчатой структурой, вращающейся как относительно неподвижного статора, так и высокоскоростного ротора.

В отсутствие в системе внешних усилий роторы занимают некоторое устойчивое положение равновесия, характеризующееся отсутствием результирующих моментов для обоих роторов. В известной научно-технической литературе не уделено достаточного внимания способу определения положения равновесия роторов магнитной передачи, а также периодичности изменения реактивной составляющей момента. Эти параметры могут быть выведены при помощи рассмотрения элементов магнитной системы попарно, применяя известные соотношения для определения частоты зубцового момента [115].

Если исключить из магнитной передачи низкоскоростной ротор (рисунок 33 (а)) и рассмотреть реактивный момент, возникающий между статором и высокоскоростным ротором, то за полный оборот последнего основная гармоника реактивного момента будет иметь число периодов, определяемое по формуле

$$N_{\text{в-с}} = \text{НОК}(2p_{\text{в}}, 2p_{\text{с}}). \quad (44)$$

Положение равновесия будет наблюдаться при совпадении продольных осей разноимённых полюсов высокоскоростного ротора и статора рисунок 33 (а).

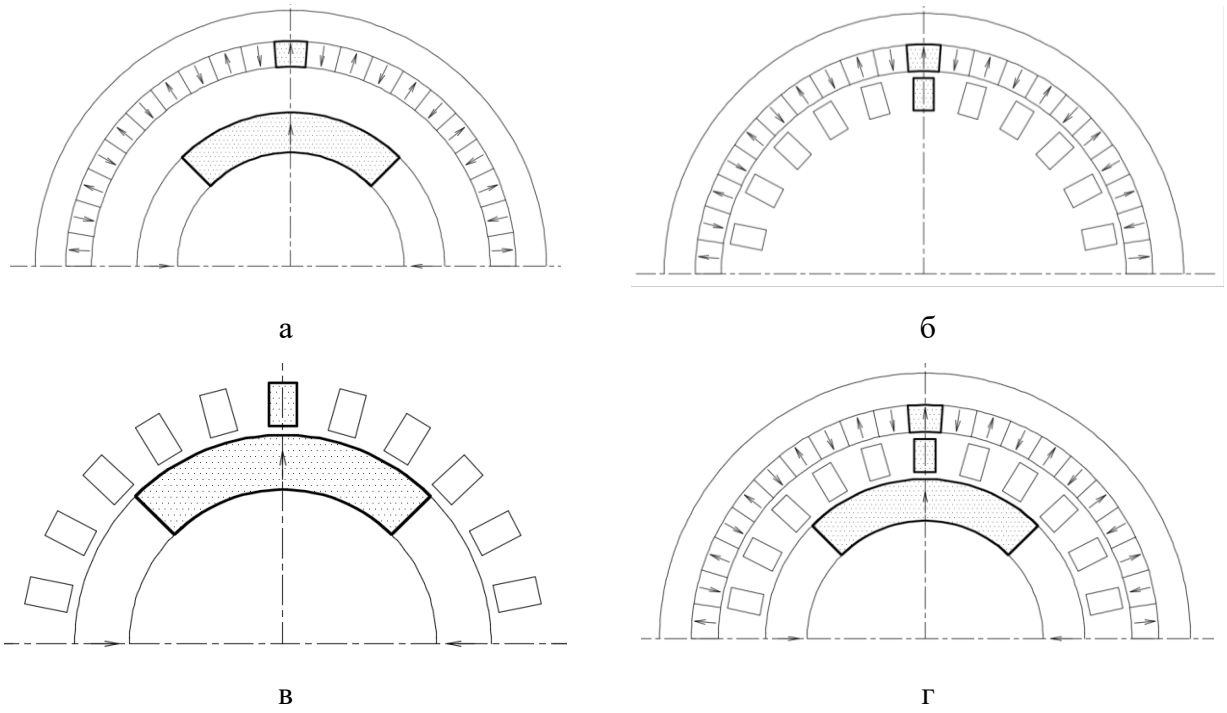


Рисунок 33 – К определению периода реактивной силы:
а – между высокоскоростным ротором и статором; б – между низкоскоростным ротором и статором; в – между роторами; г – в полной магнитной системе

По аналогии при исключении из магнитной системы высокоскоростного ротора (рисунок 33 (б)) реактивный момент, возникающий в результате взаимодействия статора и низкоскоростного ротора, будет иметь число периодов за полный оборот последнего

$$\text{НОК}(N_{\text{с}}, 2p_{\text{с}}), \tag{45}$$

или за один поворот высокоскоростного ротора

$$N_{\text{н-с}} = \text{НОК}(N_{\text{с}}, 2p_{\text{с}}) / i = \text{НОК}(N_{\text{с}}, 2p_{\text{с}}) \cdot N_{\text{с}} / p_{\text{в}}. \tag{46}$$

Положение равновесия при этом будет наблюдаться при совпадении продольной оси хотя бы одного полюса статора с осью симметрии сегмента низкоскоростного ротора, как это показано на рисунке 33 (б).

По аналогии для определения периода реактивной составляющей момента, вызванного взаимодействием роторов, необходимо исключить из магнитной системы статор (рисунок 33 (в)). Необходимо учесть, что высокоскоростной и низкоскоростной роторы движутся друг относительно друга. Полный оборот высокоскоростного ротора соответствует повороту низкоскоростного ротора на $(N_{\text{с}} - p_{\text{в}})$ сегментов. Реактивный момент, возникающий в результате

взаимодействия статора и низкоскоростного ротора, будет иметь число периодов за полный оборот последнего

$$N_{\text{н-в}} = \text{НОК}\left(\left[N_{\text{с}} - p_{\text{в}}\right], 2p_{\text{в}}\right). \quad (47)$$

Равновесие достигается при таком положении, при котором ось хотя бы одного сегмента низкоскоростного ротора совпадает с продольной осью полюса статора, как это показано на рисунке 33 (в).

Для равновесия полной системы магнитной передачи необходимо, чтобы одновременно выполнялись сразу три описанные выше условия. Положение равновесия в отсутствие внешнего момента возникает при совпадении продольных осей разноимённых полюсов статора и высокоскоростного ротора и оси симметрии сегмента низкоскоростного ротора (рисунок 33 (г)). Следующее положение равновесия наблюдается при повороте высокоскоростного ротора на угол

$$\varphi_{\text{р в}} = \frac{360°}{\text{НОД}\left(\text{НОК}(2p_{\text{в}}, 2p_{\text{с}}), \text{НОК}(N_{\text{с}}, 2p_{\text{с}}), \text{НОК}\left(\left[N_{\text{с}} - p_{\text{в}}\right], 2p_{\text{в}}\right)\right)}, \quad (48)$$

что для рассматриваемого варианта магнитной системы составляет 4,29° [122].

Таким образом, основная гармоника вибраций, вызываемых реактивным моментом, имеет частоту

$$f_{\text{р}} = \frac{n_{\text{в}}}{60} \cdot \text{НОД}\left(\text{НОК}(2p_{\text{в}}, 2p_{\text{с}}), \text{НОК}(N_{\text{с}}, 2p_{\text{с}}), \text{НОК}\left(\left[N_{\text{с}} - p_{\text{в}}\right], 2p_{\text{в}}\right)\right). \quad (49)$$

Выполнен расчёт для двух конструкций магнитной системы в режиме редуктора на холостом ходу при частоте вращения 500 об/мин: для рассматриваемого варианта магнитной передачи и аналогичного варианта магнитной передачи, но с числом пар полюсов статора равным 22. Результаты моделирования приведены на рисунках 34, 35 соответственно. Угловой период реактивного момента для этих случаев составляет 4,29° и 16,36°, что соответствует значениям, которые могут быть получены по формуле (48).

Зависимость частоты вращения низкоскоростного ротора от времени в режиме холостого хода при заданной частоте вращения высокоскоростного ротора (500 об/мин) для рассматриваемого варианта магнитной передачи ($p_{\text{с}} = 21$, $p_{\text{в}} = 2$)

представлена на рисунке 36, из которого следует, что среднее значение скорости соответствует передаточному отношению 11,5.

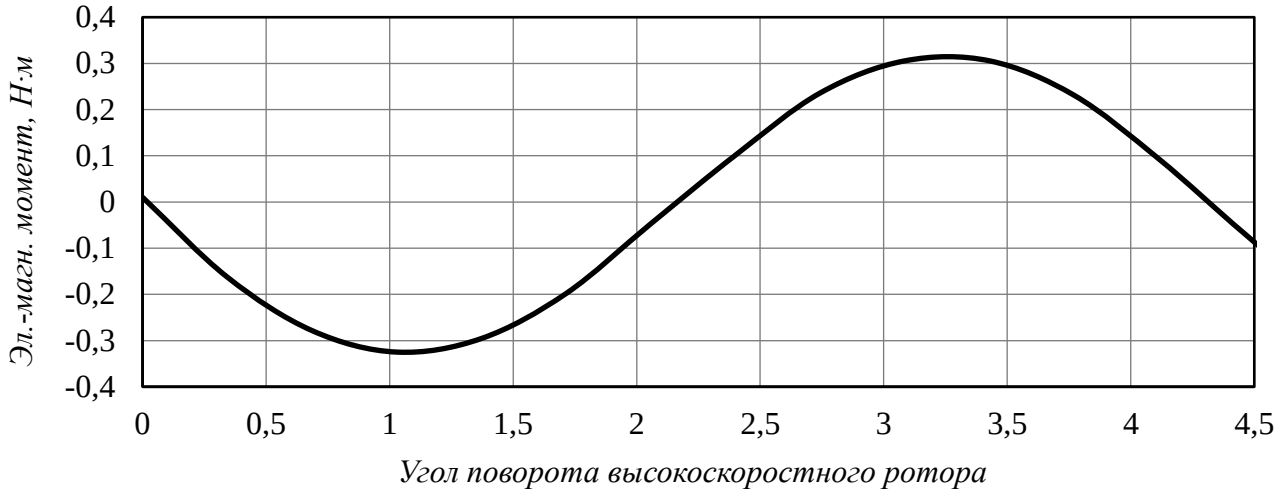


Рисунок 34 – Зависимость реактивного момента, действующего на высокоскоростной ротор, от угла его поворота ($p_с$ = 21, $p_в$ = 2) в режиме редуктора

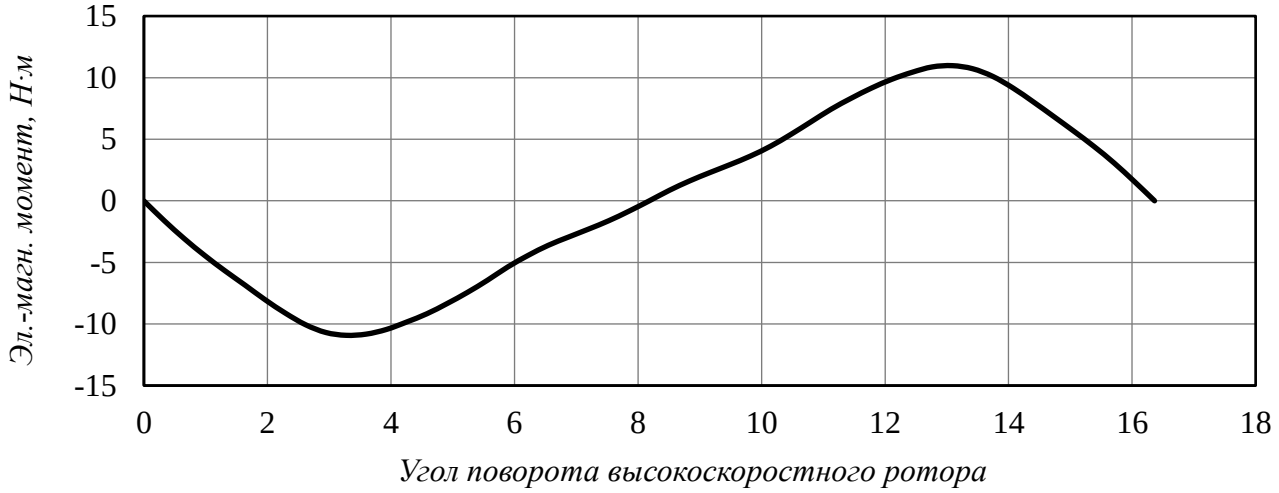


Рисунок 35 – Зависимость реактивного момента, действующего на высокоскоростной ротор, от угла его поворота ($p_с$ = 22, $p_в$ = 2)

Результаты моделирования в случае работы магнитной передачи в качестве мультипликатора на холостом ходу (привод магнитной передачи осуществляется через низкоскоростной ротор, а высокоскоростной ротор свободен и движется в соответствии с уравнением движения) представлены на рисунке 37. Период реактивного момента соответствует повороту низкоскоростного ротора на 0,37°, а амплитуда реактивного момента (момент трогания) в передаточное число раз больше, чем значение аналогичной величины для высокоскоростного ротора.

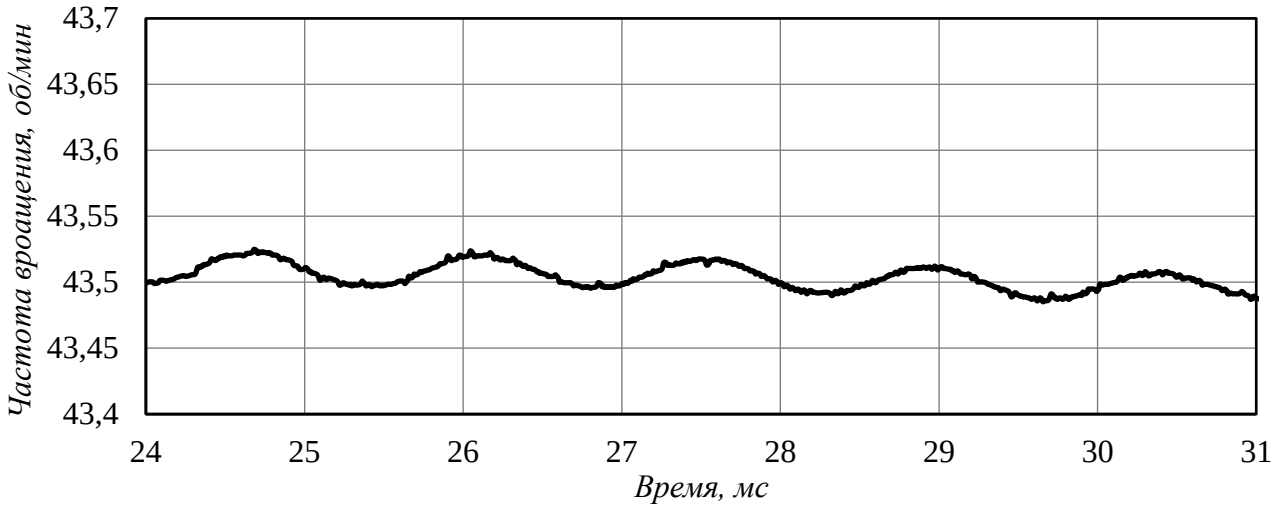


Рисунок 36 — Рассчитанная частота вращения низкоскоростного ротора при вращении высокоскоростного ротора с частотой 500 об/мин

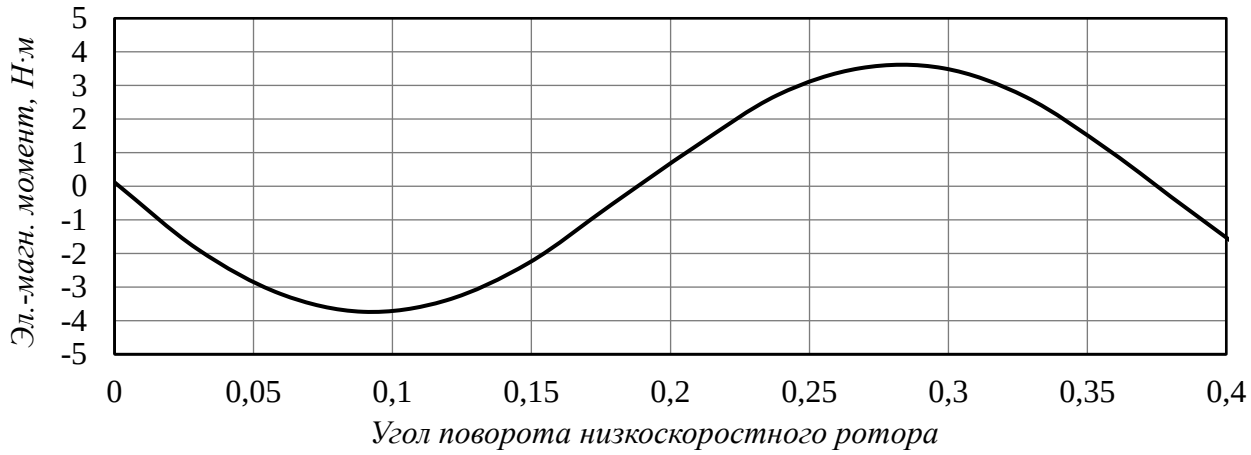


Рисунок 37 – Зависимость реактивного момента, действующего на низкоскоростной ротор, от угла его поворота ($p_с$ = 21, $p_в$ = 2) в режиме мультипликатора

Разница в амплитудах моментов трогания мультипликатора и редуктора вызвана следующим явлением. Если момент привода приложен к высокоскоростному ротору (режим редуктора), то для непрерывного вращения роторов магнитной системы в режиме холостого хода приводной момент должен превышать момент трогания (амплитудное значение реактивного момента высокоскоростного ротора $T_{р\,в\,max}$). При этом на первом полупериоде реактивного момента привод совершает работу, которая определяется как (рисунок 38)

$$A_р = \int_0^{\varphi_{р\,в}/2} T_{р\,в\,max} \sin\left(\frac{2\pi\cdot\varphi}{\varphi_{р\,в}}\right) d\varphi = \frac{\varphi_{р\,в}\cdot T_{р\,в\,max}}{\pi}. \qquad (50)$$

Если момент привода приложен к низкоскоростному ротору (режим мультипликатора), то для непрерывного вращения роторов магнитной системы в режиме холостого хода приводной момент должен превышать момент трогания (амплитудное значение реактивного момента низкоскоростного ротора, $T_{\text{р н max}}$). При этом на первом полупериоде реактивного момента привод совершает такую же по значению работу, как и в предыдущем случае (рисунок 38)

$$A_{\text{р}} = \int_0^{\varphi_{\text{р н}}/2} T_{\text{р н max}} \sin\left(\frac{2\pi \cdot \varphi}{\varphi_{\text{р н}}}\right) d\varphi = \frac{\varphi_{\text{р н}} \cdot T_{\text{р н max}}}{\pi}. \qquad (51)$$

Принимая во внимание, что отношение периодов реактивных моментов равно передаточному отношению, согласно (50) – (51) имеем

$$\frac{\varphi_{\text{р в}}}{\varphi_{\text{р н}}} = \frac{T_{\text{р н max}}}{T_{\text{р в max}}} = i. \qquad (52)$$

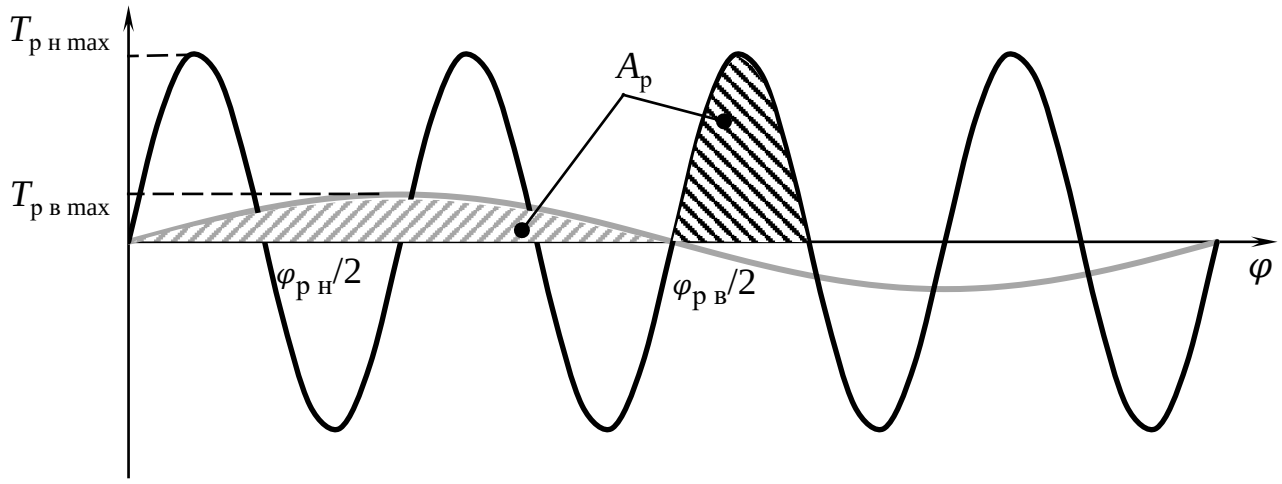


Рисунок 38 – К определению соотношения между моментами трогания

2.5.3 Моделирование работы магнитной передачи под нагрузкой

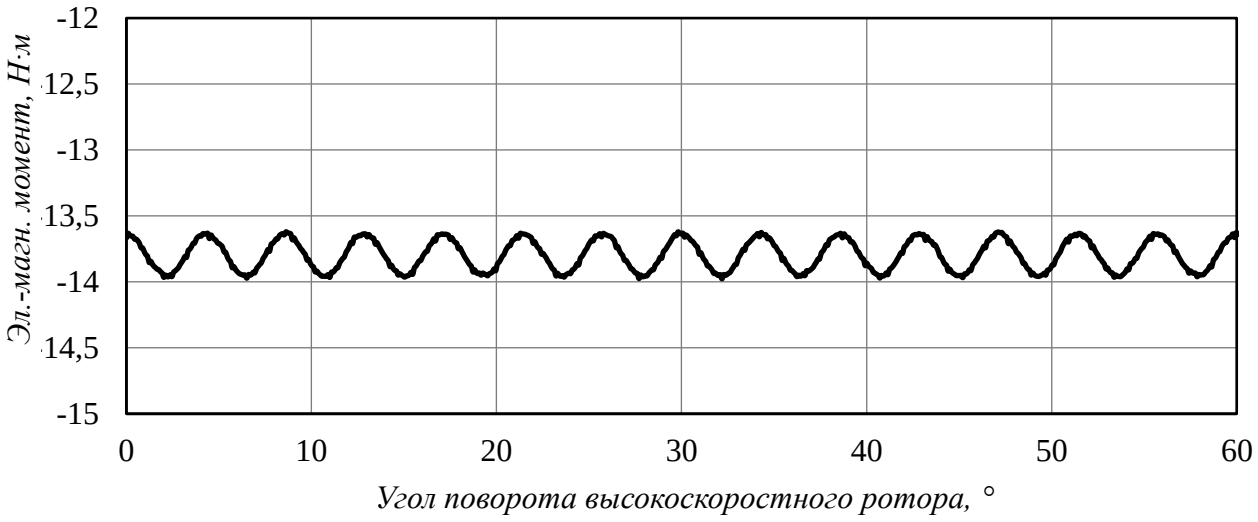
В рабочем режиме отношение скоростей роторов равно передаточному отношению магнитной передачи. В таком режиме развиваемый момент может изменяться от нулевого до максимального значения в зависимости от передаваемой мощности. При превышении на одном из валов магнитной передачи

максимального момента она выпадает из синхронизма, т. е. происходит её «срыв». Номинальное значение момента должно быть выбрано с некоторым запасом относительно максимального момента. В общем случае запас определяется из условий статической и динамической устойчивости системы с магнитной передачей. Рекомендуемый коэффициент запаса по литературным данным равен 0,7 [21], т. е. номинальный момент рекомендуется выбирать на 30% меньше максимального значения.

Коаксиальная планетарная магнитная передача обратима и может работать как в режиме редуктора, так и в режиме мультипликатора. Для определённости в дальнейших рассуждениях принято, что магнитная передача работает в режиме редуктора. В этом случае низкоскоростной ротор является выходным и к нему подключается нагрузка, а высокоскоростной ротор — входным. Ко входному ротору подключён вал привода, развивающий движущий, а значит, положительный момент. В установившемся режиме работы момент нагрузки должен быть скомпенсирован возникающим моментом магнитной передачи. На угловой характеристике (рисунок 17, 18) областью устойчивой работы будет участок от 0 до 90 электрических градусов, а неустойчивой работы — участок от 90 до 180 электрических градусов.

Для анализа процессов в магнитной передаче при работе под нагрузкой выбрана рабочая точка на угловой характеристике электромагнитного момента, соответствующая номинальному моменту, который на 30% меньше максимального момента $226{,}3 \cdot 0{,}7 = 158{,}2$ Н·м. Такой момент соответствует повороту высокоскоростного ротора относительно низкоскоростного ротора и статора из положения, показанного на рисунке 20 (а), на 22,5 геометрических градуса. При пошаговом моделировании задавалось вращение роторов с постоянной частотой и заданным передаточным отношением. Полученная зависимость момента от угла поворота высокоскоростного ротора приведена на рисунке 39.

а



б

Рисунок 39 – Динамическая моментная характеристика:
а – низкоскоростного ротора; б – высокоскоростного ротора

В номинальном режиме работы магнитной передачи возникают пульсации момента, причина которых аналогична той, что вызывает пульсации на холостом ходу. При моделировании был выполнен поворот высокоскоростного ротора на 180° геометрических градусов (на два полюсных деления высокоскоростного ротора) и низкоскоростного ротора на 15,65 геометрических градуса (на два полюсных деления модулятора). Среднее значение электромагнитного момента на низкоскоростном роторе составило 158,3 Н·м, а на высокоскоростном роторе 13,8 Н·м. Отношение этих значений равно передаточному отношению 11,5, что свидетельствует о реактивном характере пульсационных составляющих в

динамической моментной характеристике. Период основной гармоники пульсаций составил 4,29° относительно поворота высокоскоростного ротора, что соответствует результату, полученному при моделировании режима холостого хода (п. 2.5.2).

Необходимо также отметить, что у угловой характеристики электромагнитного момента имеется гармоника с номером 92 (период 3,9°) (рисунок 19), однако при движении обоих роторов номер гармоники изменился на 84 и её период стал равен 4,29°. Это явление связано с тем, что в отличие от статического режима низкоскоростной ротор поворачивается на два своих полюсных деления при каждом повороте высокоскоростного ротора на два его полюсных деления. За счёт этого относительное смещение низко- и высокоскоростного роторов за полный оборот последнего меньше на два полюсных деления модулятора по сравнению со статическим режимом. Угловой период этой гармоники реактивного момента в общем случае определяется формулой (48).

2.5.4 Исследование влияния геометрических форм элементов на эффективность магнитной передачи

Ярма магнитной передачи пронизываются переменным магнитным потоком с большим содержанием гармонических составляющих (п. 2.4.3). Частота основной гармоники магнитной индукции для каждого из элементов магнитной системы может быть определена, исходя из формул (29) – (31). Кроме основной гармоники в форме кривой магнитной индукции в воздушных зазорах присутствуют также другие гармоники, вызванные наличием зубчатой структуры модулятора. При проектировании электрических машин применяют различные меры, такие как закрытые или полузакрытые пазы или выполнение якоря беспазовым. Целью этих мер является уменьшение амплитуды высших гармонических составляющих в воздушном зазоре электрической машины, что в свою очередь положительно сказывается на её КПД. В рассматриваемой коаксиальной планетарной магнитной передаче применение таких мер невозможно, так как закрытие «паза» уменьшает

эффективность модуляции магнитного поля, что приводит к уменьшению максимального момента. Этот факт автоматически определяет область применения магнитных передач низкоскоростными устройствами. Обычно в электрической машине потери в стали составляют около 25% общих потерь [123], а основную долю потерь дают потери в обмотке. В магнитной передаче нет потерь в обмотке ввиду её отсутствия, поэтому, несмотря на наличие повышенных потерь в стали, она может обладать высоким КПД. Все эти особенности магнитной передачи должны найти своё отражение в её конструкции. Магнитопроводы должны быть выполнены шихтованными из тонколистовой электротехнической стали с возможно меньшой электропроводностью и коэрцитивной силой. Для получения высокого КПД необходимо также особое внимание уделять конструкции постоянных магнитов, так как они имеют относительно большую удельную электропроводность и находятся в магнитном поле с большим содержанием асинхронных относительно себя гармоник.

Нестандартным для электрических машин элементом является низкоскоростной ротор (модулятор), который должен одновременно сочетать в себе высокую механическую прочность (так как на него действует большой электромагнитный момент), высокую относительную магнитную проницаемость (для эффективной модуляции), высокое удельное электрическое сопротивление и низкое значение коэрцитивной силы (так как интенсивно перемагничивается в процессе работы).

Для оценки влияния геометрических форм каждого из элементов было проведено численное 3D моделирование в динамике, при этом электропроводность постоянных магнитов была принята равной 0,56 МСм/м, электропроводность сегментов низкоскоростного ротора составила 0,14 МСм/м, частота вращения высокоскоростного ротора составила 500 об/мин.

На первом этапе моделирования исследовано влияние конструктивных параметров постоянных магнитов статора на возникающие в них потери из-за индуцированных токов. Для этого электропроводность всех остальных элементов магнитной системы принята равной нулю. Выполнен анализ трёх вариантов

конструкции. Вариант 1 — постоянные магниты статора не изолированы друг от друга, т. е. постоянные магниты соседних полюсов имеют электрический контакт. Вариант 2 — каждый полюс статора изолирован от соседнего полюса. Вариант 3 — дополнительно к условиям варианта 2 добавлено сегментирование постоянных магнитов статора в осевом направлении по 10 мм. Сегменты низкоскоростного ротора электрически изолированы друг от друга. Распределение индуцированных токов для каждого из этих вариантов приведено на рисунке 40.

В отсутствие изоляции между постоянными магнитами гармоника с двумя парами полюсов (рисунок 28), присутствующая во внешнем воздушном зазоре, наводит в них индуцированные токи, вызывая большие потери, которые по результатам расчёта составили 47,6 Вт (рисунок 40 (а)). Вследствие этого при проектировании нужно особое внимание уделять наличию изоляции между соседними полюсами постоянных магнитов статора, для того чтобы предотвратить подобное замыкание токов. Наличие такой изоляции значительно снижает потери до 1,8 Вт (рисунок 40 (б)). Для ещё большого уменьшения потерь в постоянных магнитах статора следует производить их дополнительное сегментирование в осевом направлении. В рассматриваемом случае при размере осевого сегмента 10 мм потери снижаются до 0,24 Вт (рисунок 40 (в)).

На втором этапе моделирования исследовано влияние конструктивных параметров постоянных магнитов высокоскоростного ротора на возникающие в них потери на индуцированные токи. На рисунке 41 (а) видно, что из-за высокой частоты перемагничивания глубина проникновения основной гармоники магнитного поля статора в постоянные магниты высокоскоростного ротора невелика, и индуцированные токи циркулируют вблизи их поверхности, вызывая потери около 2,8 Вт. Для того, чтобы уменьшить потери можно применить разделение постоянных магнитов на электроизолированные секторы. Размер этого сектора в касательном направлении должен быть меньше двух полюсных делений статора, что обеспечит эффективное прерывание пути индуцированных токов.

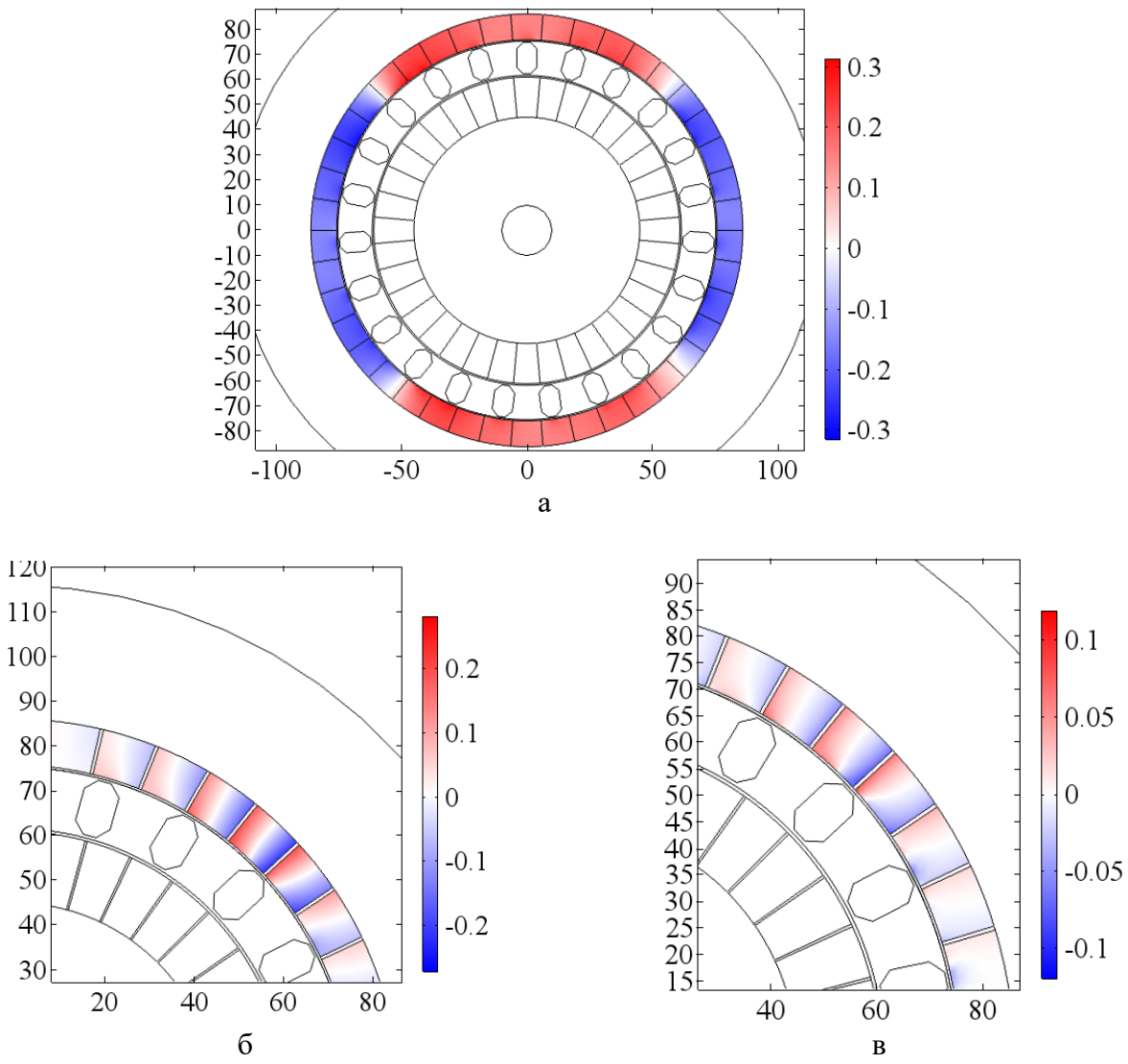


Рисунок 40 – Распределение индуцированных токов (А/мм^2) в ПМ статора:
а – ПМ неизолированы; б – ПМ изолированы в касательном направлении;
в – ПМ изолированы в касательном направлении и сегментированы в осевом

В рассматриваемом случае разделение на секторы в 10° позволяет уменьшить потери до 1,8 Вт (рисунок 41 (б)). Для более значительного ограничения потерь на индуцированные токи необходимо производить аксиальное сегментирование каждого из секторов. Сегментирование постоянных магнитов в аксиальном направлении по 10 мм приводит к уменьшению потерь в постоянных магнитах высокоскоростного ротора до 0,6 Вт (рисунок 41 (в)).

На третьем этапе моделирования исследовано влияние конструктивных параметров низкоскоростного ротора на возникающие в нём потери на индуцированные токи. Конструкция низкоскоростного ротора наиболее технически сложная и является объектом патентования [124, 125]. Для обеспечения

её прочности предлагается по торцам скреплять сегменты модулятора при помощи колец. Если кольца изготовлены из электропроводящего материала и между кольцами и сегментами модулятора нет электрической изоляции, то создаются условия для замыкания индуцированных токов. В рассматриваемом случае потери от этих токов оценены в 50 Вт (рисунок 42 (а)). Если при таких же условиях сегменты низкоскоростного ротора электрически изолированы друг от друга, то потери в них снижаются до 3,2 Вт (рисунок 42 (б)).

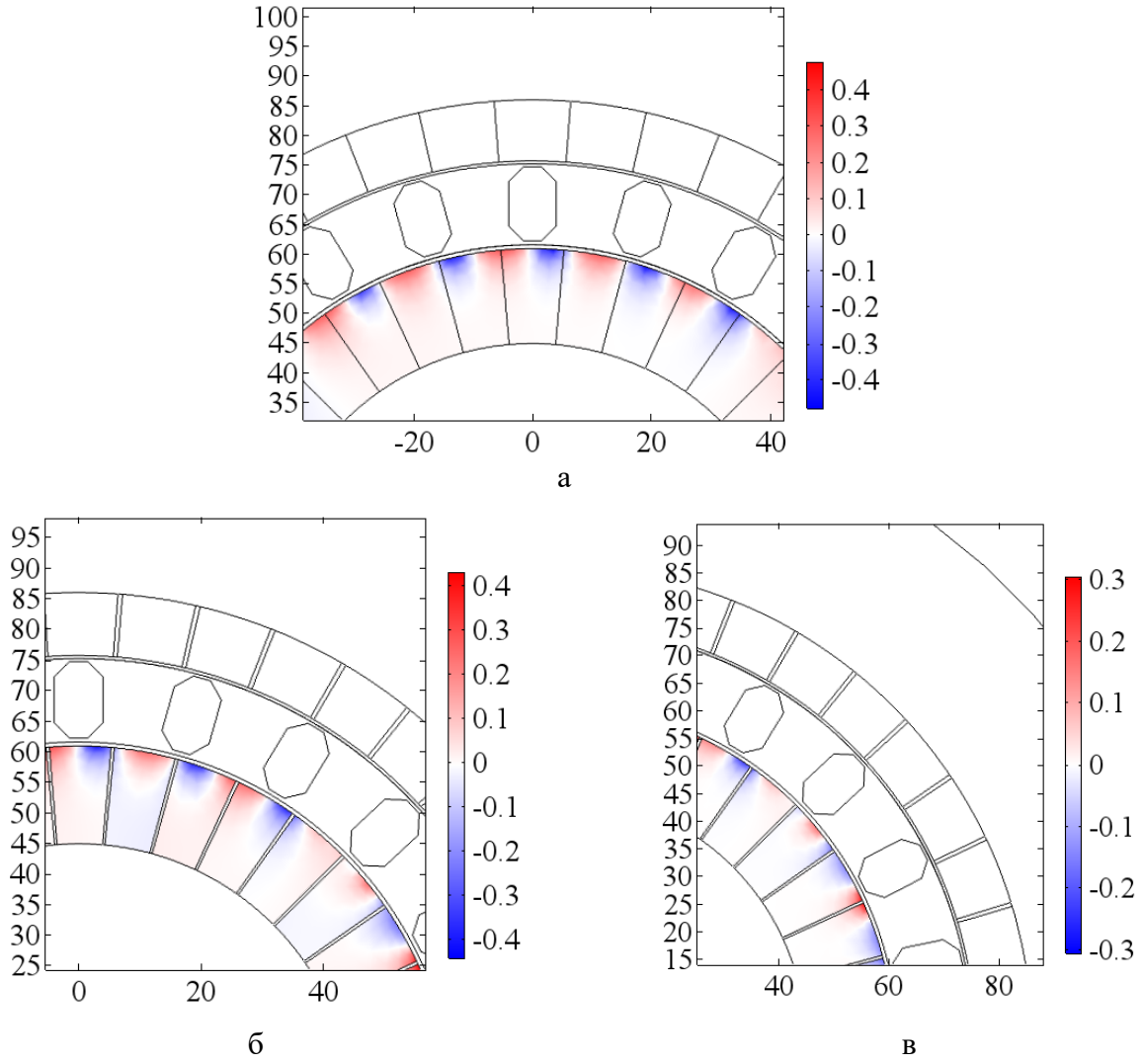


Рисунок 41 – Распределение индуцированных токов (А/мм^2) в ПМ высокоскоростного ротора:
а – ПМ неизолированы; б – ПМ изолированы в касательном направлении;
в – ПМ изолированы в касательном направлении и сегментированы в осевом

Важно отметить, что углы сегментов низкоскоростного ротора сильно насыщены. В связи с этим добавление фасок (в модели 2,5 мм с каждой стороны) значительно снижает потери до 1,7 Вт на 46 % (рисунок 42 (в)) [126]. Оценка влияния фасок на максимальный момент проведена при помощи 3D

моделирования, аналогично п. 2.4.4 (рисунок 43). Максимальный момент составил 137,7 Н·м, что на 13% меньше, чем в магнитной системе без фасок.

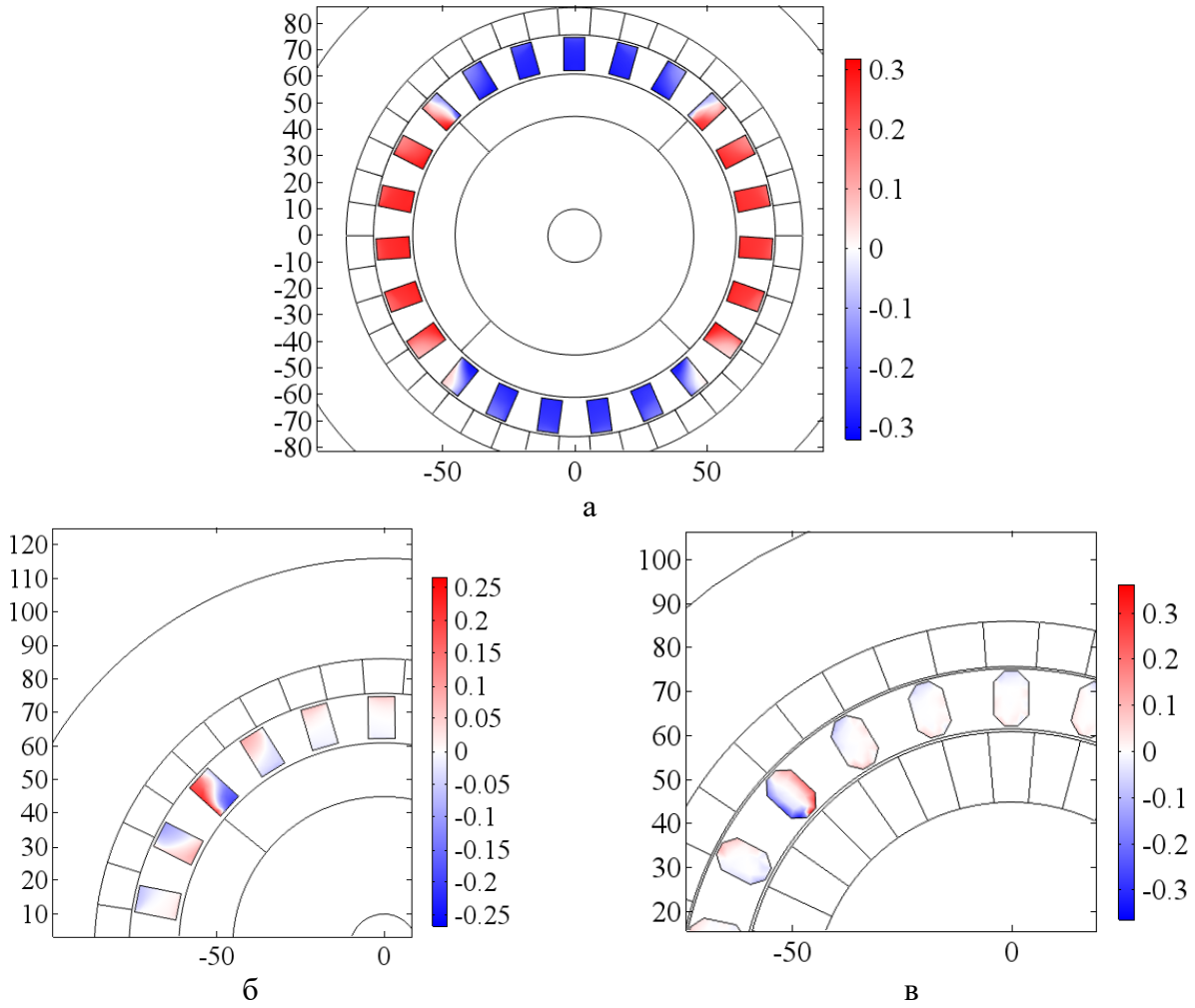


Рисунок 42 – Распределение индуцированных токов (А/мм^2) в низкоскоростном роторе:
а – сегменты замкнуты; б – сегменты изолированы; в – сегменты с фасками и изолированы

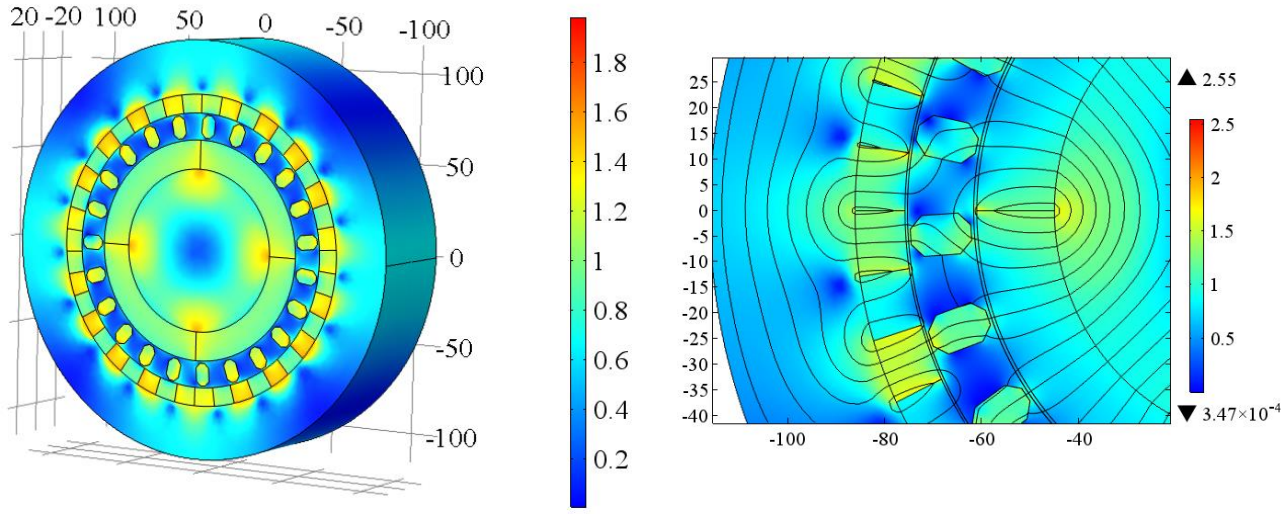


Рисунок 43 – Магнитное поле в элементах магнитной системы с фасками на сегментах:
а – магнитная индукция (Т); б – силовые линии магнитного поля

В процессе работы магнитной передачи сегменты низкоскоростного ротора подвергаются интенсивному перемагничиванию и поэтому должны быть выполнены из материала с малой электропроводностью (шихтованная электротехническая сталь или композитные материалы). Одновременно низкоскоростной ротор должен обладать высокой механической прочностью, так как он сильно нагружен электромагнитным моментом. Для обеспечения механической прочности низкоскоростного ротора в [124, 125] предлагается выполнять стягивание его конструкции при помощи шпилек располагая их или между сегментами низкоскоростного ротора или внутри сегментов. Обычно шпильки изготавливают из конструкционной стали, и поэтому они обладают достаточно высокой электропроводностью. Для учёта влияния шпилек на возникающие потери проведено моделирование, результаты которого, представлены на рисунке 44 (а, б). Удельная электропроводность шпилек принята равной 1,5 МСм/м. Суммарные потери в шпильках при их расположении между сегментами низкоскоростного ротора составили 1,2 Вт, а максимальный момент практически не изменился. При расположении шпилек внутри сегментов низкоскоростного ротора суммарные потери в них составили 0,05 Вт, однако максимальный электромагнитный момент уменьшился на 25%. Это связано с увеличением магнитного сопротивления сегментов низкоскоростного ротора.

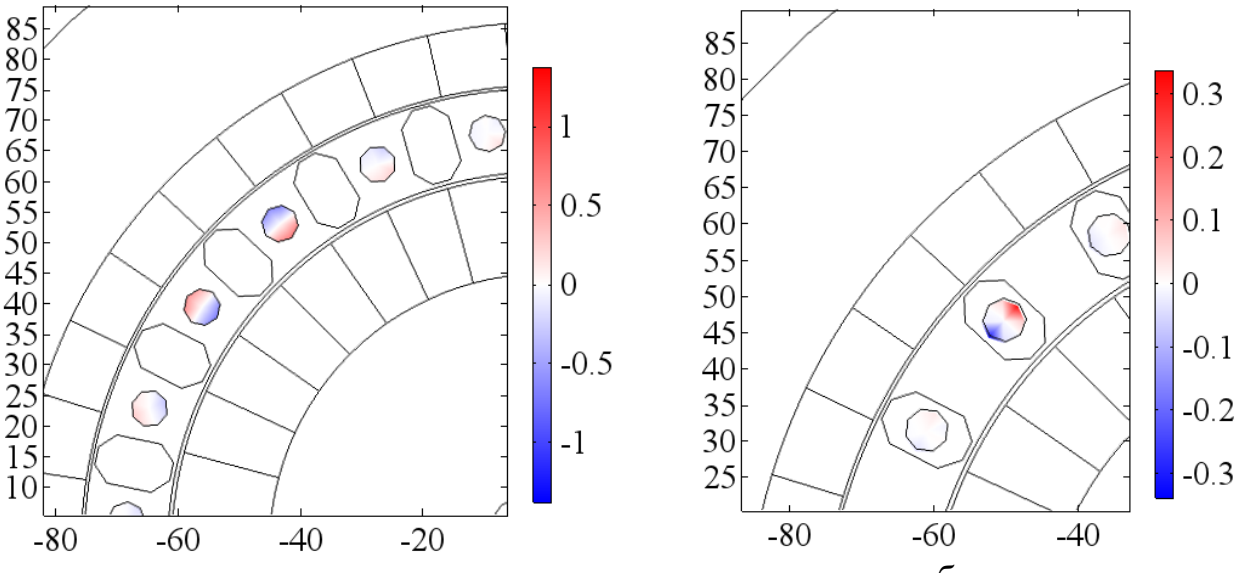


Рисунок 44 – Распределение индуцированных токов (А/мм^2) для различных вариантов исполнения усиливающих элементов:
а – между сегментами; б – внутри сегментов

2.5.5 Расчёт магнитных потерь в экспериментальном образце магнитной передачи

По результатам полученных расчётных данных сформулированы требования по конструктивному исполнению магнитных передач, которые затем нашли отражение в конструкции экспериментального образца (глава 4):

– геометрические параметры магнитной системы и свойства материалов соответствуют принятым в п. 2.1 (таблица 1, рисунок 7);

– постоянные магниты статора выполнены электрически изолированными друг от друга в радиальном направлении таким образом, что каждый полюс статора отделён от соседнего полюса электроизоляционной вставкой, роль которой в экспериментальном образце выполняют клеевые зазоры;

– постоянные магниты статора выполнены изолированными в осевом направлении, аксиальная длина каждого такого сегмента составила 10 мм;

– постоянные магниты высокоскоростного ротора выполнены секторальными, каждый полюс состоит из 10 секторов, разделённый между собой электроизоляционными промежутками;

– сегменты низкоскоростного ротора выполнены электрически изолированными друг от друга с фасками 2,5 мм на каждой стороне.

Для этого варианта исполнения конструктивных элементов далее проведён расчёт зависимостей магнитных потерь от частоты вращения.

В магнитной передаче источниками потерь являются индуцированные токи и гистерезисные явления в элементах магнитной системы. Потери на индуцированные токи в постоянных магнитах и в сегментах низкоскоростного ротора из композитного магнитомягкого материала могут быть рассчитаны при помощи численного моделирования электромагнитного поля. Определение потерь на индуцированные токи в шихтованной электротехнической стали при помощи прямого численного расчёта представляется сложной и ресурсоёмкой задачей, в

связи с чем применяются аппроксимирующие зависимости удельных потерь от средней магнитной индукции и частоты перемагничивания [123].

В процессе работы магнитопровод статора подвергается значительному воздействию пермагничивающего магнитного поля, содержащего высокочастотные гармоники (рисунок 28). Поэтому он изготавливается из шихтованной электротехнической стали с малой удельной электрической проводимостью. В рассматриваемом варианте магнитной передачи магнитопровод статора выполнен из высоколегированной холоднокатаной изотропной электротехнической стали марки 2411 [109, 110]. Для таких материалов применяются эмпирические зависимости потерь от частоты перемагничивания и магнитной индукции [123]

$$P_{\Sigma} = K p_{1,0/50} \left(f / 50 \right)^{\beta} B^2 m_{\text{мп}}, \qquad (53)$$

где K — поправочный коэффициент, равный 1,7 для машин переменного тока;

$p_{1,0/50}$ — удельные магнитные потери при магнитной индукции 1 Т и частоте 50 Гц, Вт/кг;

f — частота перемагничивания, Гц;

β — коэффициент, учитывающий зависимость потерь от частоты;

B — модуль магнитной индукции, Тл;

m — масса магнитопровода, кг.

Если использовать рекомендованное в [123] значение коэффициентов для толщины листа 0,35 мм и расчётное значение магнитной индукции 0,7 Т

$$\beta = 1{,}3,$$

$$p_{1,0/50} = 1{,}6 \text{ Вт/кг},$$

то зависимость суммарных потерь от индуцированных токов и магнитного гистерезиса в магнитопроводе статора от частоты вращения на основной гармонике магнитного поля будет иметь вид, показанный на рисунке 45 (а).

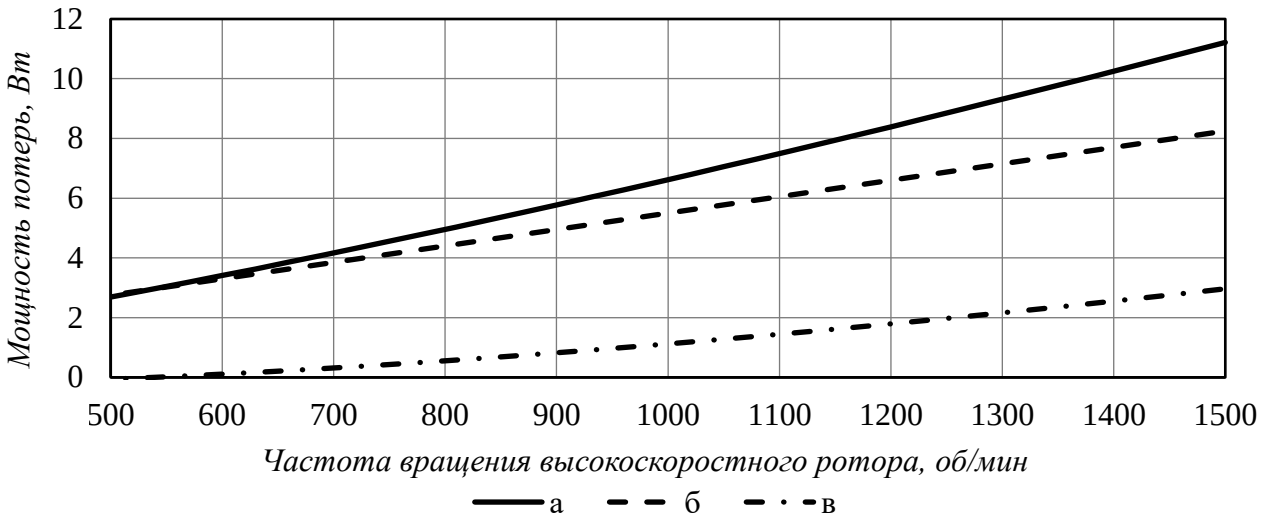


Рисунок 45 – Расчётная зависимость мощности потерь в магнитопроводе статора от частоты вращения высокоскоростного ротора:
а – суммарные магнитные потери; б – потери на гистерезис; в – потери на индуцированные токи

Для отдельной оценки потерь на магнитный гистерезис использованы данные магнитных свойств для сталей, приведённые в [110] (рисунок 10). Расчёт потерь осуществлён с применением модели магнитного гистерезиса Джилса-Атертона [121], параметры которой определены по алгоритму многофакторной оптимизации Левенберга-Марквардта в программной среде *Mathcad Prime* 3.0 [127]. Рассчитанная зависимость потерь на гистерезис от частоты вращения высокоскоростного ротора приведена на рисунке 45 (б). Разность суммарных магнитных потерь и потерь на гистерезис представляет собой потери на индуцированные токи и представлена на рисунке 45 (в).

Магнитопровод низкоскоростного ротора представляет из себя сегменты из магнитомягкого материала, разделённые между собой немагнитными промежутками. В качестве материала для магнитопровода низкоскоростного ротора принят композитный магнитомягкий материал *Somaloy 5P*, удельная электропроводность которого составляет 0,14 МСм/м [112]. Рассчитанная зависимость потерь на индуцированные токи в низкоскоростном роторе от частоты вращения высокоскоростного ротора приведена на рисунке 45 (в). Расчёт потерь на гистерезис произведён на основе модели Джилса-Атертона. Свойства материала *Somaloy 5P* в виде предельной петли гистерезиса получены на установке для измерения характеристик магнитомягких материалов *REMAGRAPH C*

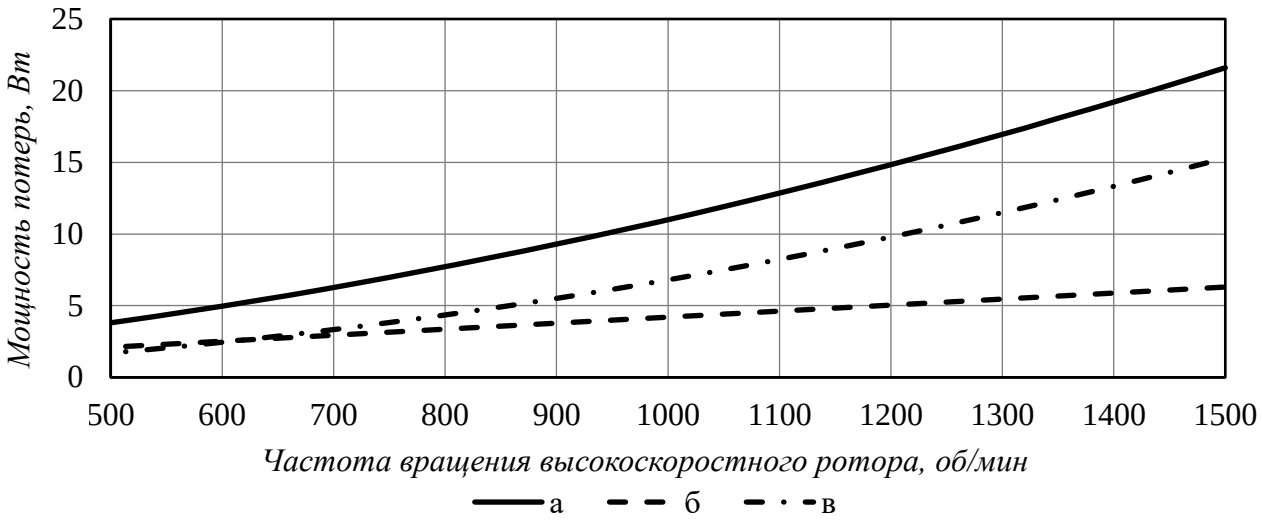


Рисунок 46 – Расчётная зависимость мощности потерь в магнитопроводе низкоскоростного ротора от частоты вращения высокоскоростного ротора:
а — суммарные магнитные потери; б — потери на гистерезис; в — потери на индуцированные токи

фирмы *Magnet-Physik*. Протокол испытаний приведён в приложении А. Зависимость потерь на магнитный гистерезис в сегментах низкоскоростного ротора от частоты вращения представлена на рисунке 46 (б).

Зависимость потерь на индуцированные токи в постоянных магнитах от частоты вращения высокоскоростного ротора рассчитана при удельной электрической проводимости постоянных магнитов 0,56 МСм/м и представлена на рисунке 47.

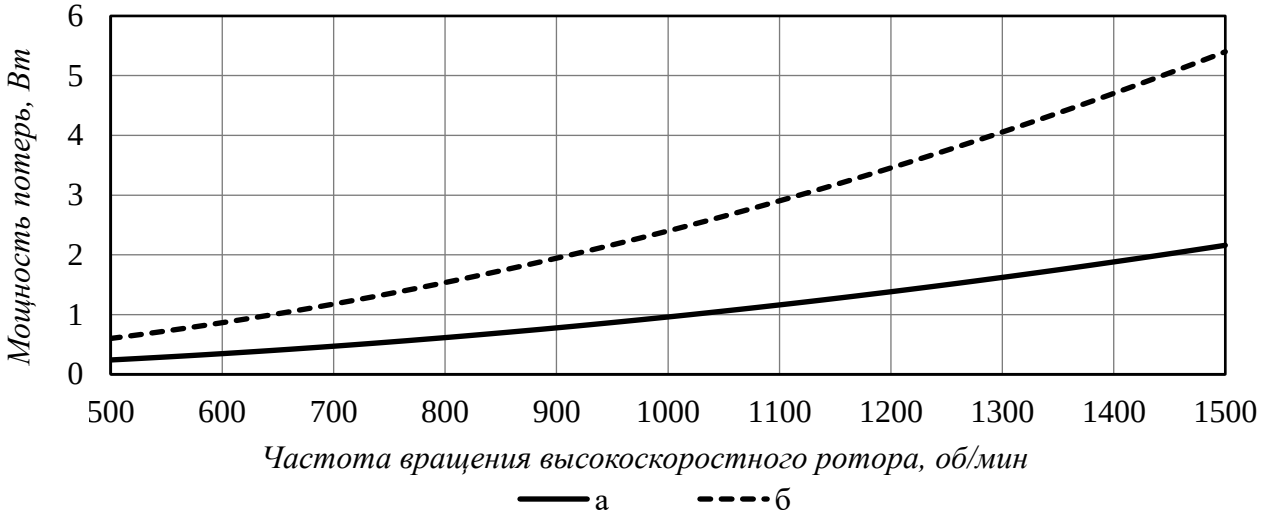


Рисунок 47 – Расчётная зависимость потерь на индуцированные токи в ПМ от частоты вращения:
а – ПМ статора; б – ПМ высокоскоростного ротора

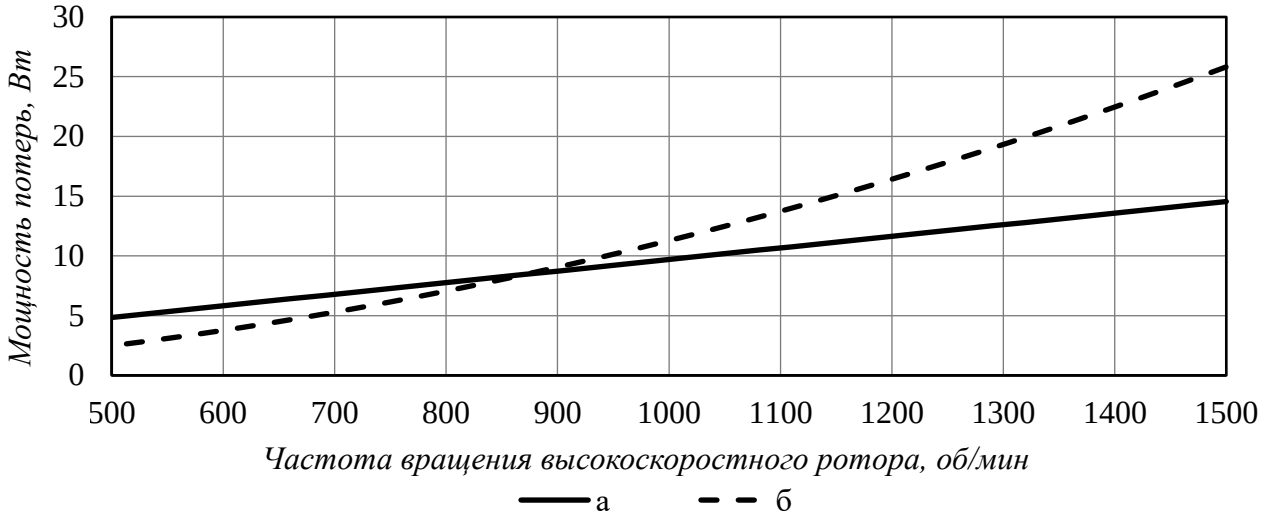


Рисунок 48 – Расчётная зависимость магнитных потерь от частоты вращения:
а – потери на гистерезис; б – потери на индуцированные токи

Суммарные потери на магнитный гистерезис могут быть аппроксимированы функцией

$$P_{\text{г}} = 9{,}7 \cdot 10^{-3} n_{\text{в}} = 9{,}3 \cdot 10^{-2} \omega_{\text{в}}, \tag{54}$$

а суммарные потери на индуцированные токи функцией

$$P_{\text{и}} = 1{,}2 \cdot 10^{-5} n_{\text{в}}^2 = 1{,}1 \cdot 10^{-3} \omega_{\text{в}}^2., \tag{55}$$

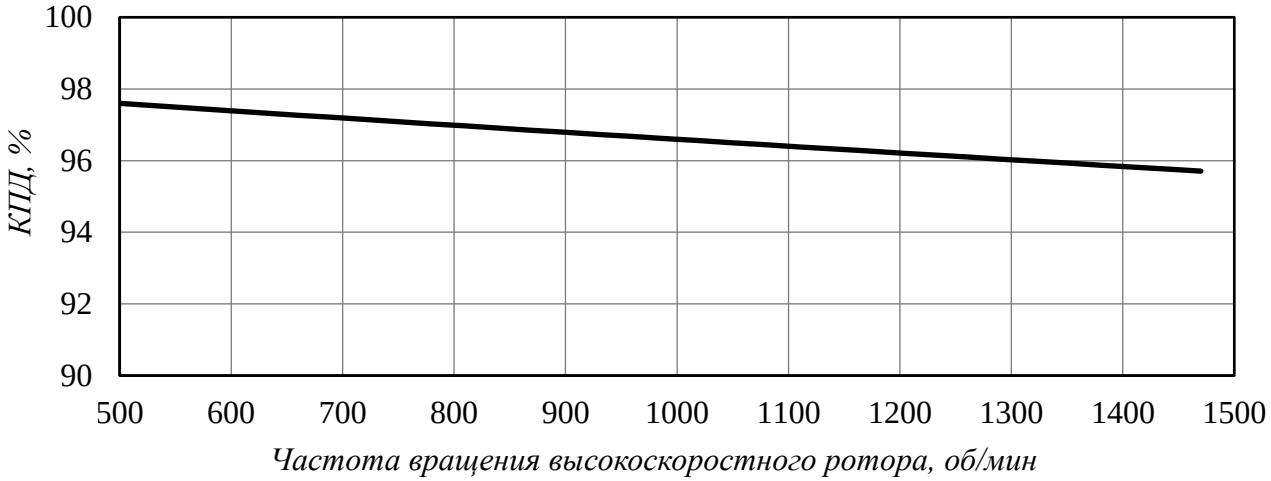


Рисунок 49 – Расчётная зависимость КПД магнитной передачи от частоты вращения

Численные значения параметров для динамической модели магнитной передачи (глава 3) следующие: обобщённый коэффициент диссипации мощности за счёт магнитного гистерезиса для высокоскоростного ротора $k_1 = 9{,}3 \cdot 10^{-2}$ Н·м; обобщённый коэффициент потерь мощности за счёт вязкого трения и потерь на индуцированные токи $k_2 = 1{,}1 \cdot 10^{-3}$ Н·м·с/рад; максимальный момент 137,7 Н·м.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

1. Разработаны математические модели и методика расчёта максимального момента магнитной передачи и предельных состояний магнитной системы в статическом режиме, которые позволяют обоснованно выбрать основные размеры магнитопроводов и постоянных магнитов.

2. Разработаны математические модели и методика анализа гармонического состава магнитного поля в немагнитных зазорах магнитной передачи, на основании которых обоснованы требования по конструктивному исполнению элементов магнитной системы.

3. Разработаны математические модели, позволяющие проводить расчёт магнитной системы с учётом краевых эффектов, на основании которого обоснованы требования по расположению конструктивных элементов магнитных передач относительно их магнитных систем.

4. Разработана аналитическая методика и численные математические модели для определения основной частоты зубового момента магнитной передачи.

5. Разработаны математические модели для расчёта магнитных потерь в магнитной передаче и получены количественные оценки влияния различных конструктивных решений на её эффективность.

6. Разработан ряд рекомендаций по конструктивному исполнению магнитных передач для достижения высоких значений КПД:

– каждый полюс статора должен быть отделён от соседнего полюса электроизоляционной вставкой;

– постоянные магниты статора должны быть разделены на электрически изолированные сегменты в осевом направлении;

– постоянные магниты высокоскоростного ротора должны быть разделены на сегменты как в осевом, так и в радиальном направлении;

– сегменты низкоскоростного ротора должны быть электрически изолированными друг от друга и иметь фаски.

ГЛАВА 3. ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МАГНИТНОЙ ПЕРЕДАЧИ

Моделирование динамики работы магнитной передачи сопряжено с решением системы нелинейных дифференциальных уравнений движения. Аналитическое решение этой системы уравнений подразумевает её линеаризацию путём линейной аппроксимации нагрузочной характеристики [12] и обладает высокой трудоёмкостью и низкой точностью. Поэтому для анализа динамических режимов работы часто применяют численное математическое моделирование, позволяющее решать системы нелинейных дифференциальных уравнений и за счёт этого получать более точные результаты. При этом связанное численное моделирование механических и электромагнитных процессов осложнено вследствие их разномасштабности. В связи с этим такой подход обладает повышенной ресурсоёмкостью [128, 129]. Для преодоления этого недостатка некоторые авторы предлагают заменять численное моделирование расчётом при помощи резистивных моделей [130], что значительно снижает точность.

Для оптимизации вычислений в диссертации предлагается разделить расчёт магнитной и механической подсистем. Суть этого метода заключается в использовании численного математического моделирования для определения коэффициентов системы дифференциальных уравнений движения и дальнейшем её решении при помощи программного обеспечения *Matlab/Simulink* [131 – 133].

3.1 Анализ динамических уравнений магнитной передачи

Магнитная передача является системой с двумя магнитно-связанными и вращающимися с разными скоростями элементами — высокоскоростным и низкоскоростным роторами. Торсионная жёсткость магнитных передач примерно на три порядка ниже, чем у их зубчатых аналогов [22, 134], что отражается на их динамических характеристиках. Динамика работы магнитной передачи рассмотрена всего в нескольких работах [130, 135, 136]. Однако ни в одной из

известных работ не представлены математические макромодели магнитной передачи и оценки влияния параметров каждого из роторов в отдельности на частоту свободных колебаний.

Для определённости в дальнейшем работа магнитной передачи рассматривается в режиме мультипликатора, то есть к низкоскоростному ротору приложен момент от привода, а к высокоскоростному ротору — момент нагрузки. Однако все приведённые ниже рассуждения справедливы и для режима редуктора. Таким образом, в общем виде уравнения, описывающие движения низко- и высокоскоростного роторов, записываются согласно второму закону Ньютона как

$$\begin{cases} J_{\text{н}} \dfrac{d\omega_{\text{н}}}{dt} = T_{\text{пр}} - T_{\text{н}} - T_{\text{п н}}, \\ J_{\text{в}} \dfrac{d\omega_{\text{в}}}{dt} = T_{\text{в}} - T_{\text{п в}} - T_{\text{нагр}}, \end{cases} \tag{56}$$

где $J_{\text{н}}$, $J_{\text{в}}$ — момент инерции низко- и высокоскоростного роторов, кг·м^2;

$\omega_{\text{н}}$, $\omega_{\text{в}}$ — угловые скорости низко- и высокоскоростного роторов, рад/с;

$T_{\text{пр}}$ — момент привода, Н·м;

$T_{\text{в}}$ — электромагнитный момент на высокоскоростном роторе, Н·м;

$T_{\text{н}}$ — электромагнитный момент на низкоскоростном роторе, Н·м;

$T_{\text{п н}}$ — момент потерь, действующий на низкоскоростной ротор, Н·м;

$T_{\text{п в}}$ — момент потерь, действующий на высокоскоростной ротор, Н·м;

$T_{\text{нагр}}$ — момент нагрузки, Н·м.

Если предположить, что устройство приводится в движение от идеального источника момента и момент нагрузки определён, то в системе уравнений (56) неизвестными переменными являются $\omega_{\text{н}}$, $\omega_{\text{в}}$, $T_{\text{н}}$, $T_{\text{в}}$, $T_{\text{п н}}$, $T_{\text{п в}}$. Таким образом, для её решения необходимо добавить четыре дополнительных уравнения. Первые два дополнительных уравнения к системе (56) отражают зависимость моментов потерь от скорости вращения роторов

$$\begin{cases} T_{\text{п н}} = k_{2\,\text{н}} \cdot \omega_{\text{н}} + k_{1\,\text{н}}, \\ T_{\text{п в}} = k_{2\,\text{в}} \cdot \omega_{\text{в}} + k_{1\,\text{в}}, \end{cases} \tag{57}$$

где $k_{2\,н}$, $k_{2\,в}$ — коэффициенты диссипации мощности за счёт индуцированных токов для низко- и высокоскоростного роторов, Н·м·с/рад;

$k_{1\,н}$, $k_{1\,в}$ — коэффициенты диссипации мощности за счёт гистерезиса для низко- и высокоскоростного роторов, Н·м.

Согласно принципу работы магнитной передачи и полученным в результате её моделирования статическим моментным характеристикам (рисунок 17, 18) отношение электромагнитных моментов, действующих на низко- и высокоскоростной роторы магнитной системы, сохраняется постоянным и равным передаточному отношению, откуда следует третье дополнительное уравнение к системе (56)

$$\frac{T_{н}}{T_{в}} = -i. \tag{58}$$

В воздушных зазорах коаксиальной планетарной магнитной передачи магнитное поле не ограничивается одной пространственной гармоникой, а имеет несколько гармонических составляющих, среди которых можно выделить и рабочую гармонику — гармонику, участвующую в передачи мощности. По результатам моделирования (рисунок 29, 28) рабочая гармоника во внешнем немагнитном зазоре имеет $p_{с}$ пар полюсов, а во внутреннем — $p_{в}$ пар полюсов. Другие гармоники спектра не участвуют в передаче мощности, создавая реактивный момент. Поэтому в целях упрощения модели гармоники, не участвующие в передаче мощности, не учитываются. Таким образом, принимая допущение о синусоидальности угловой характеристики электромагнитного момента можно выразить электромагнитный момент через угол нагрузки. Для определённости в дальнейшем будут рассматриваться магнитные поля во внутреннем немагнитном зазоре. Из принципа действия магнитной передачи известно, что при вращении её низкоскоростного ротора с угловой частотой $\omega_{н}$ возбуждаемое им поле во внутреннем немагнитном зазоре вращается с частотой $\omega_{н} \cdot i$ и имеет рабочую гармонику с $p_{в}$ парами полюсов. Таким образом, электрический угол поворота рабочей гармоники магнитного поля, возбуждаемого системой статор – модулятор во внутреннем немагнитном зазоре

$$\varphi_{\text{п н}} = p_{\text{в}} \cdot i \int \omega_{\text{н}}(t)dt. \tag{59}$$

Электрический угол поворота поля высокоскоростного ротора во внутреннем немагнитном зазоре

$$\varphi_{\text{п в}} = p_{\text{в}} \cdot \int \omega_{\text{в}}(t)dt. \tag{60}$$

Следовательно, электрический угол между полями (угол нагрузки) в каждый момент времени

$$\Theta = \varphi_{\text{п н}} - \varphi_{\text{п в}} = p_{\text{в}} \cdot \left(i \int \omega_{\text{н}}(t)dt - \int \omega_{\text{в}}(t)dt \right). \tag{61}$$

Так как магнитная передача работает в режиме мультипликатора, то момент, действующий на низкоскоростной ротор, должен иметь тормозящий характер. Зависимость момента от угла нагрузки представлена в виде:

$$T_{\text{н}} = -T_{\text{н max}} \sin\Theta, \tag{62}$$

где $T_{\text{н max}}$ — максимальный электромагнитный момент, развиваемый низкоскоростным ротором.

Совместно (61) и (62) образуют четвёртое дополнительное уравнение для системы (56). Таким образом, полная система уравнений, описывающая динамику работы магнитной передачи, имеет следующий вид

$$\begin{cases} J_{\text{н}} \dfrac{d\omega_{\text{н}}}{dt} = T_{\text{пр}} - T_{\text{н}} - k_{2\,\text{н}} \cdot \omega_{\text{н}} - k_{1\,\text{н}}, \\ J_{\text{в}} \dfrac{d\omega_{\text{в}}}{dt} = T_{\text{в}} - k_{2\,\text{в}} \cdot \omega_{\text{в}} - k_{1\,\text{в}} - T_{\text{нагр}}, \\ \dfrac{T_{\text{н}}}{T_{\text{в}}} = -i, \\ T_{\text{н}} = -T_{\text{н max}} \sin\Theta, \\ \Theta = p_{\text{в}} \cdot \left(i \int \omega_{\text{н}}(t)dt - \int \omega_{\text{в}}(t)dt \right). \end{cases} \tag{63}$$

Из (63) видно, что мгновенное значение отношения частот вращения низко- и высокоскоростного роторов может отличаться от передаточного отношения, что не характерно для зубчатых передач, где скорости валов связаны жёстко через передаточное отношение. В случае с магнитной передачей данное соотношение

выполняется только лишь в установившемся режиме, который характеризуется постоянством частот вращения роторов.

3.2 Методика составления математической макромодели в *Matlab/Simulink*

Решение нелинейной системы уравнений (63) произведено в программной среде *Matlab/Simulink* (рисунок 50). Эквивалентная схема магнитной передачи построена по принципу прямой модели, т. е. механические и электромагнитные моменты в системе являются фазовыми переменными типа потока, а частоты вращения — типа потенциала.

Структурно модель состоит из трёх основных частей, соответствующих низкоскоростному ротору, высокоскоростному ротору и магнитной связи между ними, составленной в соответствии с системой уравнений (63).

Привод представлен в модели идеальным источником момента $T_{пр}$ с использованием блока «*Ideal Torque Source*». Моменты инерции роторов $J_н$, $J_в$ представлены при помощи блоков *«Inertia»*. Диссипативные элементы представлены посредством блоков «*Rotational Friction*», которые позволяют определять коэффициенты $k_{2\,н}$, $k_{2\,в}$, $k_{1\,н}$, $k_{1\,в}$ системы уравнений (63). Нагрузка моделируется введением дополнительного коэффициента вязкого трения $k_{нагр}$. Связь механических подсистем низко- и высокоскоростного роторов магнитной передачи осуществлена при помощи задания соотношения между электромагнитными моментами $T_в$, $T_н$, действующими на каждый из роторов. Электромагнитные моменты представлены при помощи управляемых источников «*Ideal Torque Source».* Мгновенные значения электромагнитных моментов $T_в$, $T_н$ определяются тремя последними уравнением системы (63). Мгновенные значения углов поворота роторов системы рассчитываются интегрированием угловой скорости вращения, рассчитываемой при помощи блока «*Ideal Rotational Motion Sensor»*.

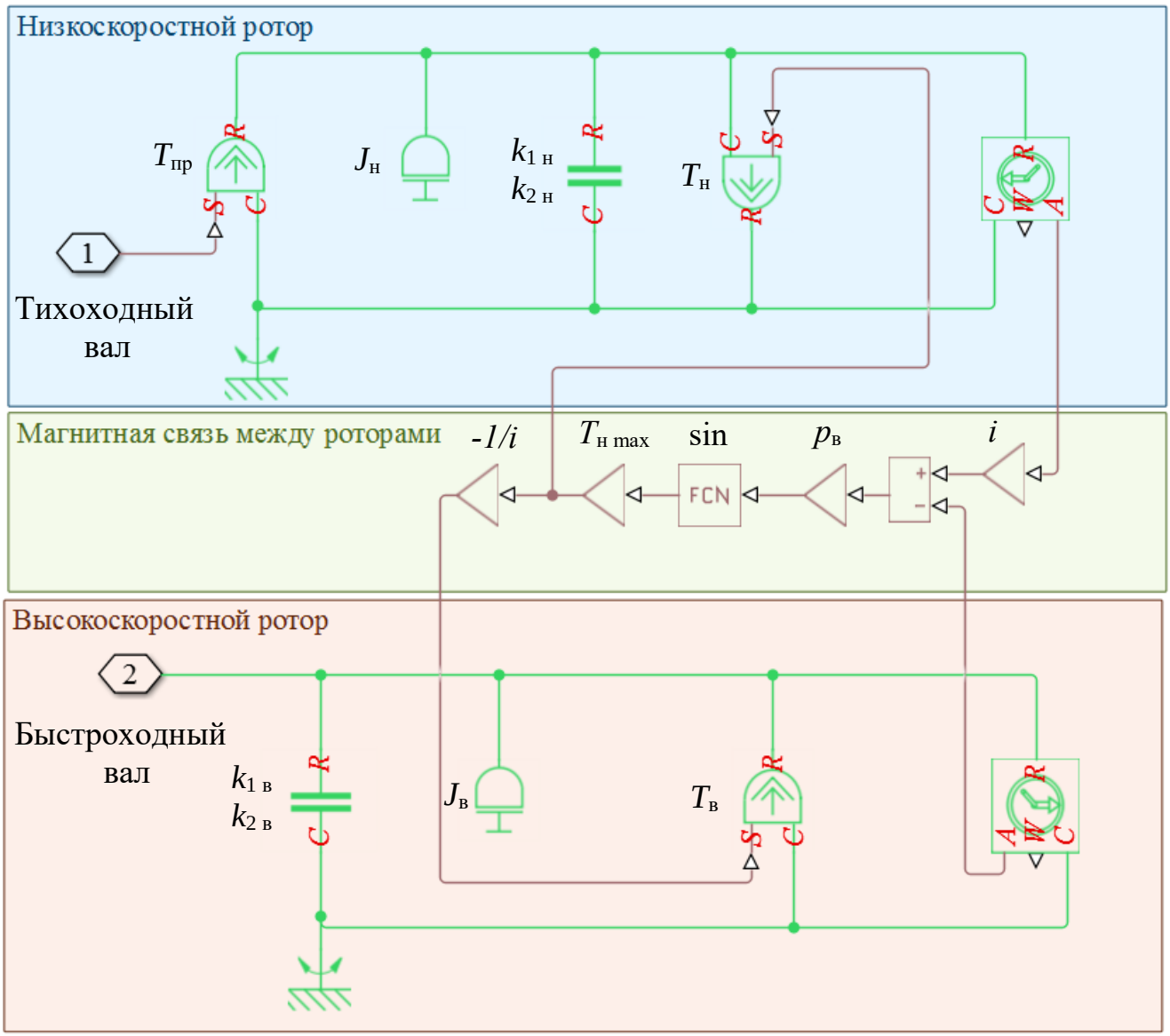


Рисунок 50 – Динамическая модель магнитной передачи в *Matlab/Simulink*

3.3 Методика определения параметров макромодели

Основными параметрами макромодели, которые необходимо определить для решения системы уравнения (63) являются максимальный электромагнитный момент ($T_{н\,max}$), передаточное отношение (i), число пар полюсов высокоскоростного ротора ($p_в$) и статора (p_c), а также моменты инерции роторов ($J_в$, $J_н$) и обобщённые коэффициенты диссипации мощности для низкоскоростного ($k_{1\,н}$, $k_{2\,н}$), и высокоскоростного ($k_{1\,в}$, $k_{2\,в}$) роторов.

В качестве числового примера далее рассматривается вариант магнитной передачи, рассчитанный в п. 2.5.5 (рисунок 43), максимальный момент которого

составил 137,7 Н·м. Число пар полюсов на магнитных колёсах задаётся при проектировании и для рассматриваемого варианта магнитной системы равно 21 и два соответственно. Передаточное отношение при заблокированном внешнем магнитном колесе равно 11,5 в соответствии с формулой (14). Моменты инерции роторов рассчитаны при помощи 3D модели и составили $13 \cdot 10^{-3}$ кг·м^2 и $11 \cdot 10^{-3}$ кг·м^2 для низко- и высокоскоростного роторов соответственно.

Обобщённые коэффициенты диссипации мощности определяются из рассчитанной в п. 2.5.5 зависимости потерь от частоты вращения (рисунок 48).

Обобщённый коэффициент потерь мощности k_2 за счёт индуцированных токов согласно (55) $1{,}1 \cdot 10^{-3}$ Н·м·с/рад. Обобщённый коэффициент потерь мощности k_1 за счёт потерь на гистерезис по (54) составляет $9{,}3 \cdot 10^{-2}$ Н·м. Потери мощности в системе, пропорциональные второй степени угловой частоты

$$P_2 = k_2 \omega_в^{\,2} = k_{2в} \omega_в^{\,2} + k_{2н} \omega_н^{\,2}. \tag{64}$$

В связи с тем, что нет возможности рассчитать коэффициенты отдельно для каждого из роторов, принято допущение, что $k_{2\,н} = k_{2\,в} = k_{2\,\Sigma}$

$$P_2 = k_2 \omega_в^{\,2} = k_{2в} \omega_в^{\,2} + k_{2н} \omega_н^{\,2} = k_{2\Sigma} \left(\omega_в^{\,2} + \omega_н^{\,2} \right) = k_{2\Sigma} \left(1 + \frac{1}{i^2} \right) \cdot \omega_в^{\,2}, \tag{65}$$

откуда

$$k_{2\,в} = k_{2\,н} = \frac{k_2 \cdot i^2}{1 + i^2} = \frac{1{,}1 \cdot 10^{-3} \cdot 11{,}5^2}{1 + 11{,}5^2} = 1{,}1 \cdot 10^{-3} \, \frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{рад}}. \tag{66}$$

По аналогии потери мощности в обоих роторах системы, пропорциональные первой степени угловой частоты также складываются

$$P_1 = k_1 \omega_в = k_{1в} \omega_в + k_{1н} \omega_н. \tag{67}$$

и при допущении, что $k_{1\,н} = k_{1\,в} = k_{1\,\Sigma}$ получаем

$$P_1 = k_1 \omega_в = k_{1в} \omega_в + k_{1н} \omega_н = k_{1\Sigma} \left(\omega_в + \omega_н \right) = k_{1\Sigma} \left(1 + \frac{1}{i} \right) \cdot \omega_в, \tag{68}$$

откуда

$$k_{1\,в} = k_{1\,н} = \frac{k_1 \cdot i}{1 + i} = \frac{9{,}3 \cdot 10^{-2} \cdot 11{,}5}{1 + 11{,}5} = 8{,}6 \cdot 10^{-2} \ \text{Н} \cdot \text{м}. \tag{69}$$

3.4 Результаты моделирования механических процессов

3.4.1 Моделирование режима сброса нагрузки

При работе магнитной передачи могут возникать различные изменения как приводного момента, так и нагрузки. Это приводит к изменению угла нагрузки и вызывает колебания роторов. Для моделирования процессов, происходящих при резком изменении момента привода, в модели магнитной передачи к тихоходному валу был приложен момент, изменяющийся во времени согласно показанной на рисунке 51 функции. В соответствии с рекомендациями, приведёнными в [21], номинальный момент был принят на 30% меньше максимального и составил 96 Н·м.

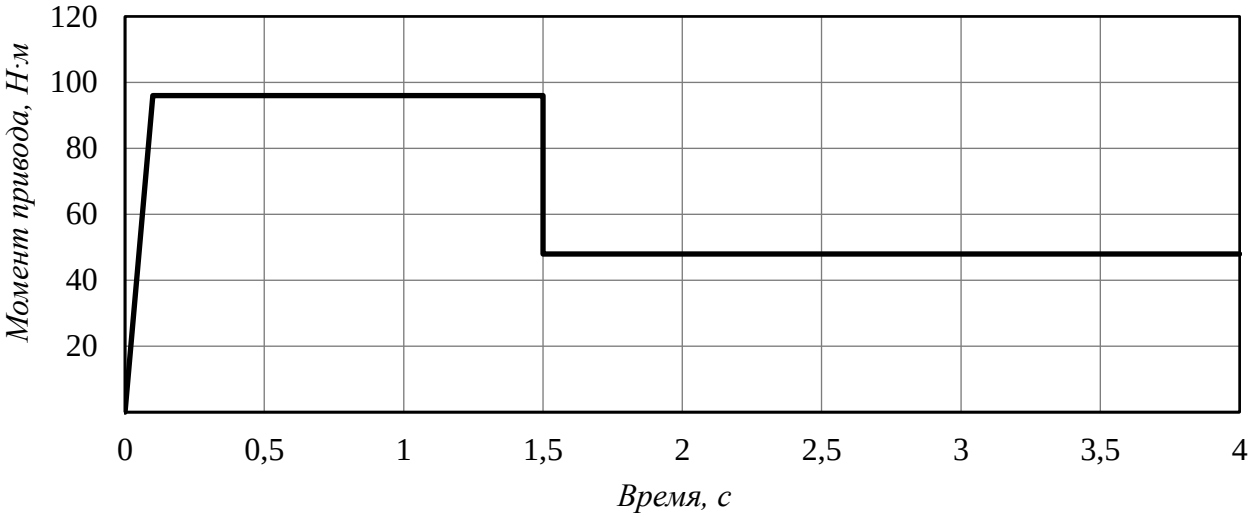
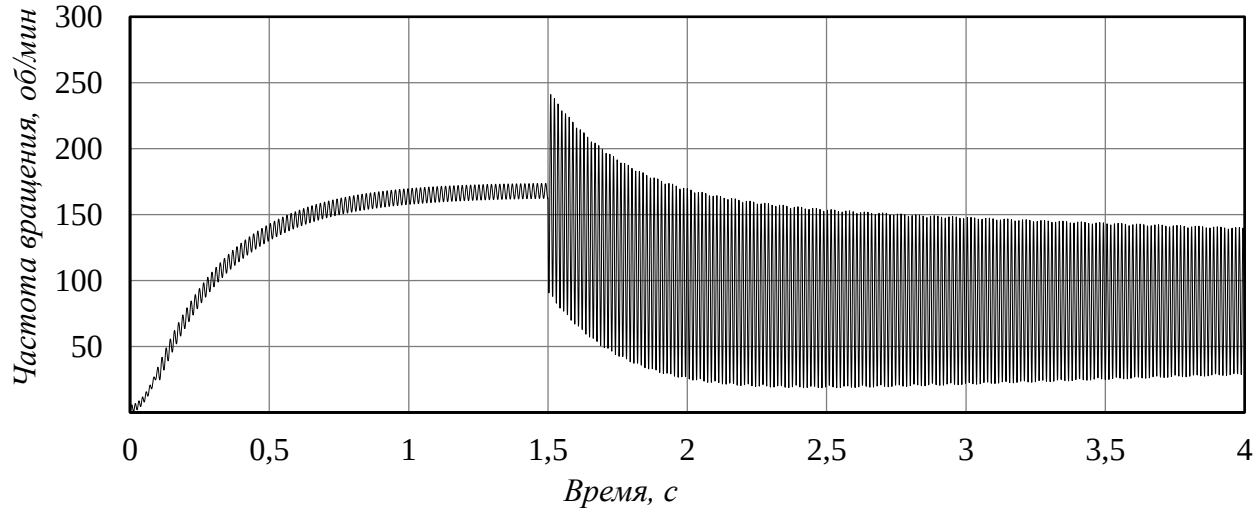


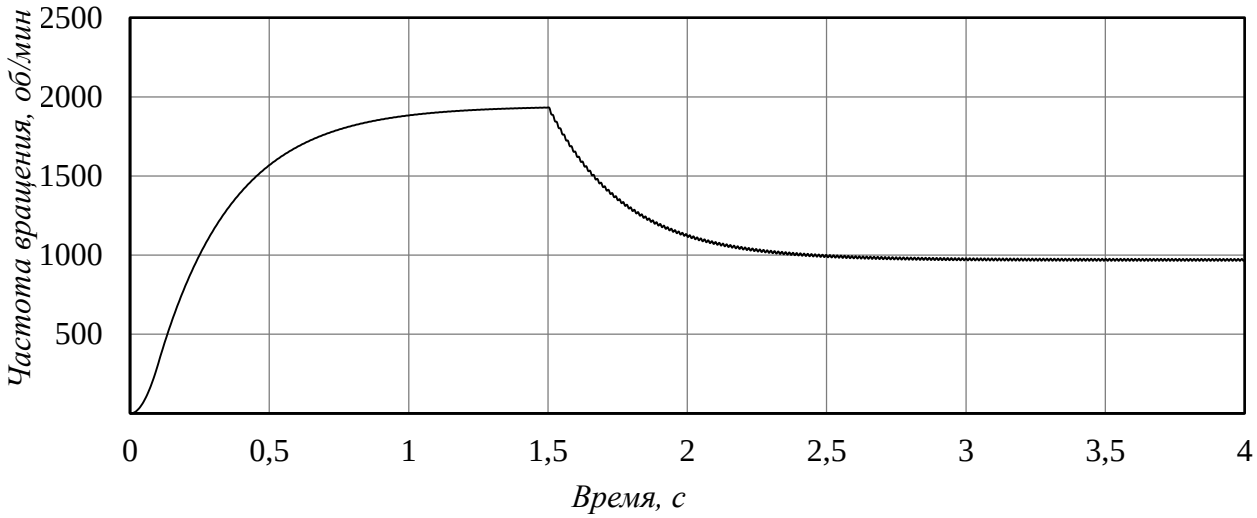
Рисунок 51 – Зависимость момента привода от времени

Момент увеличивается от нулевого значения до номинального линейно за 0,1 с. Затем момент принимает постоянное значение, которое сохраняется вплоть до момента времени 1,5 с. За это время частота вращения роторов достигает значения, близкого к установившемуся. Под воздействием приводного момента оба ротора начинают вращаться в положительном направлении в соответствии с принципом действия коаксиальной планетарной магнитной передачи (рисунок 52). В момент времени 1,5 с происходит сброс приводного момента на 50 %, что

вызывает выраженные пульсации частоты вращения и электромагнитного момента роторов (рисунок 52). Частоты возникающих колебаний на обоих роторах одинаковые, при этом их амплитуда на высокоскоростном роторе много меньше, чем на низкоскоростном (рисунок 53). В спектре частот колебаний также присутствуют субгармоники, связанные с нелинейностью угловой характеристики электромагнитного момента, но их амплитуда мала по сравнению с амплитудой основной гармоники. Из рассчитанных осциллограммах также видно, что коэффициент затухания возникающих колебаний находится на уровне 0,04 1/с.

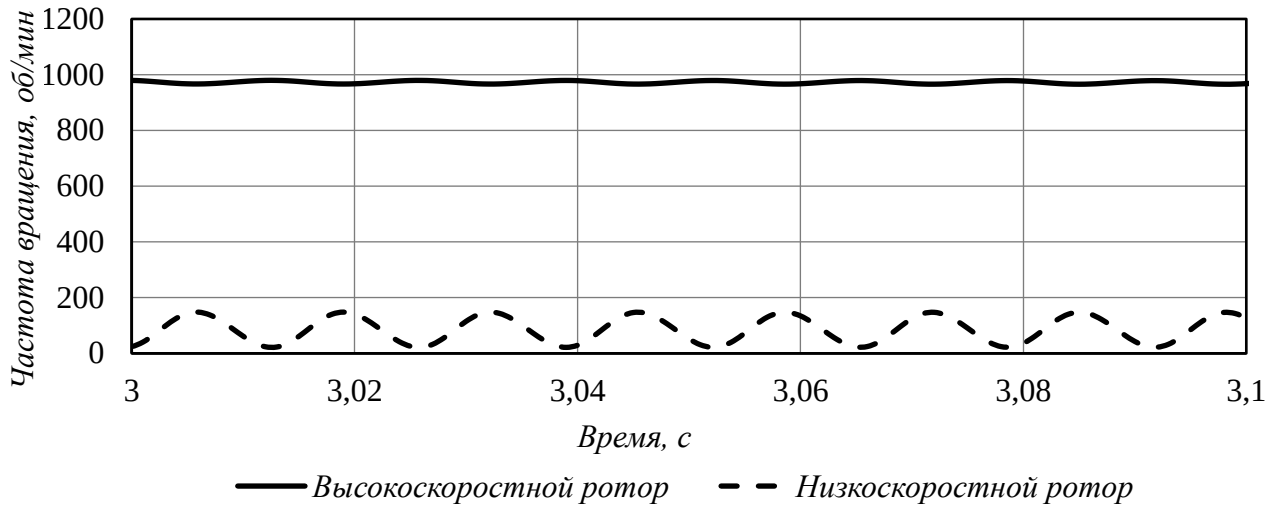


а

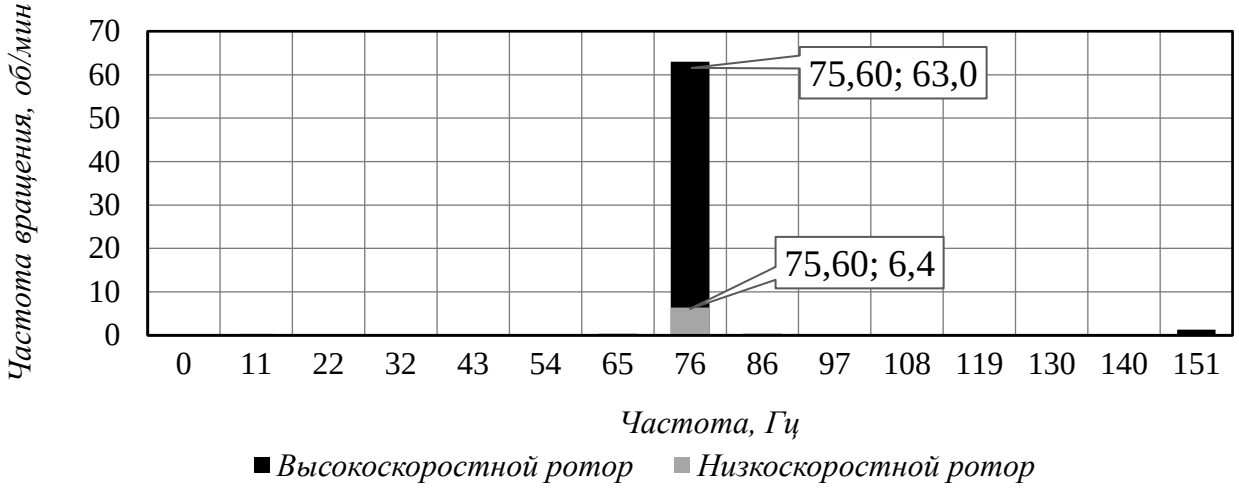


б

Рисунок 52 – Расчётные зависимости частоты вращения от времени:
а – низкоскоростной ротор; б – высокоскоростной ротор



а



б

Рисунок 53 – Расчётные зависимости частоты вращения от времени:
а – пульсации скорости на промежутке от 3 с до 3,1 с; б – гармонический состав

3.4.2 Моделирование режима перегрузки магнитной передачи

При работе магнитной передачи могут возникать такие режимы, при которых момент привода или нагрузки превышает максимальное значение электромагнитного момента. В таком режиме наблюдается проскальзывание магнитной передачи («срыв»), в результате чего прекращается передача мощности между её роторами.

Для расчёта такого режима на тихоходный вал модели магнитной передачи был подан момент, зависимость которого от времени аналогична использованной при моделировании сброса нагрузки. Единственным отличием является то, что в

момент времени 1,5 с происходит увеличение приводного момента до 154 Н·м, что выше максимального значения момента исследуемой передачи (рисунок 54).

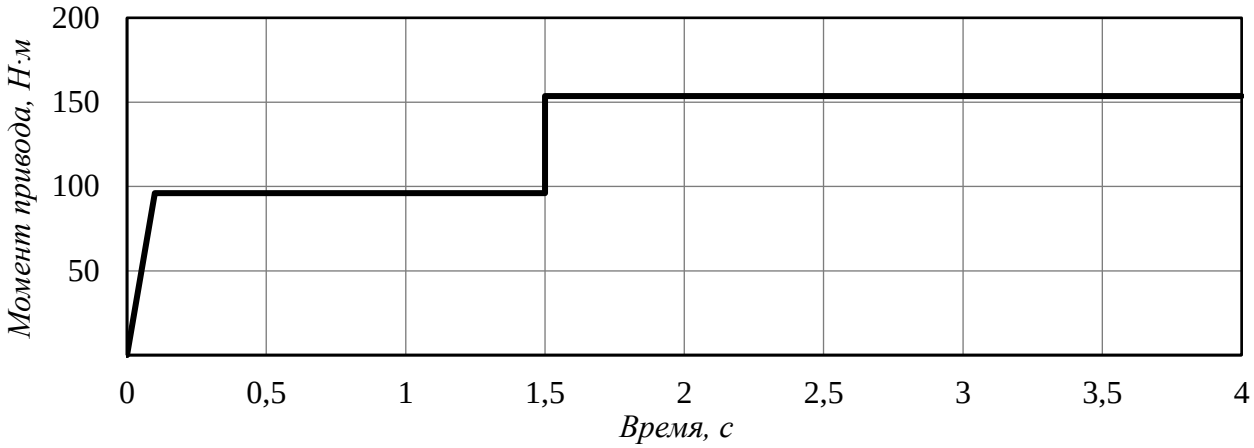
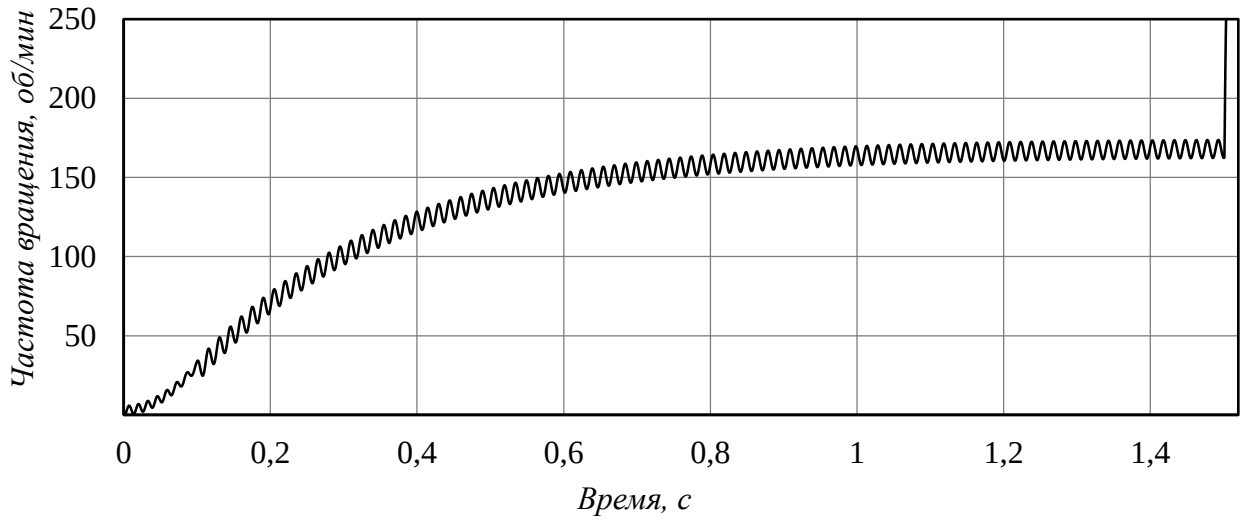
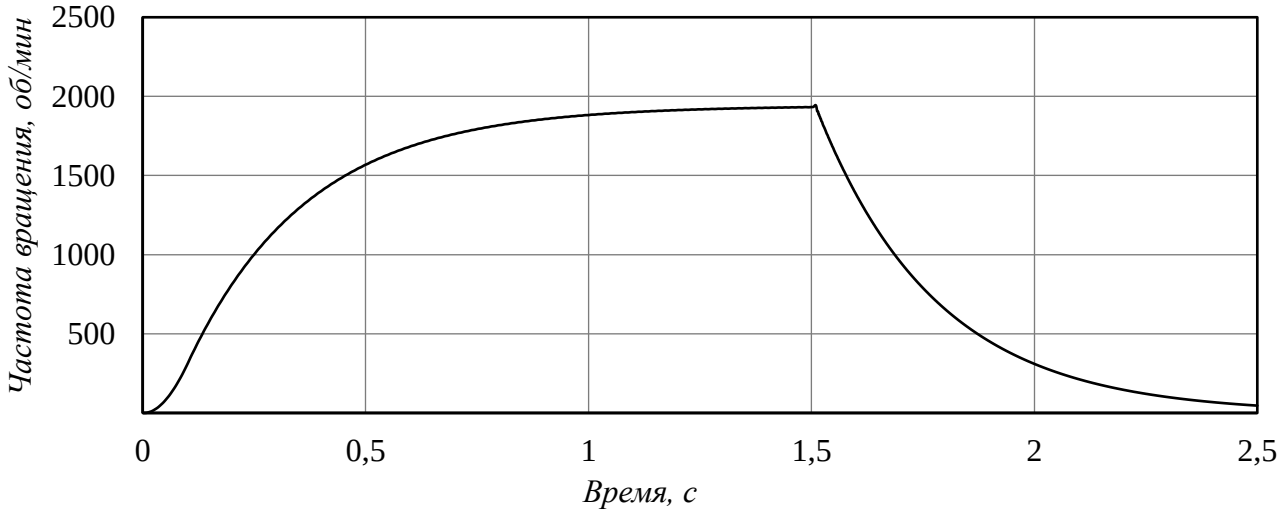


Рисунок 54 – Зависимость момента привода от времени



а



б

Рисунок 55 – Расчётная зависимость частоты вращения от времени:
а – для высокоскоростного ротора; б – для низкоскоростного ротора

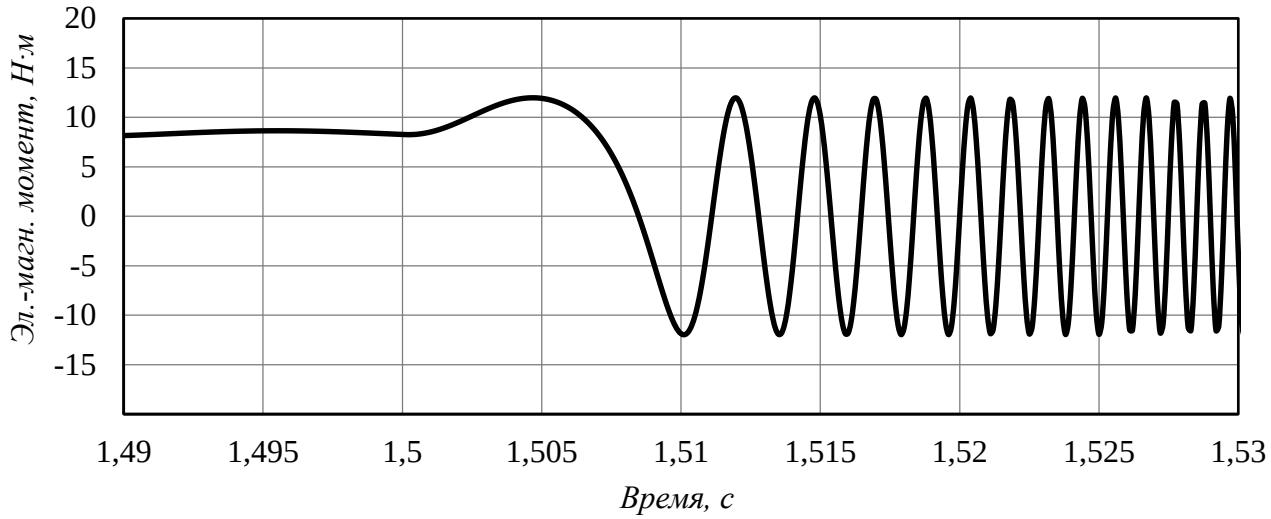


Рисунок 56 – Расчётная зависимость момента, действующего на высокоскоростной ротор в области «срыва»

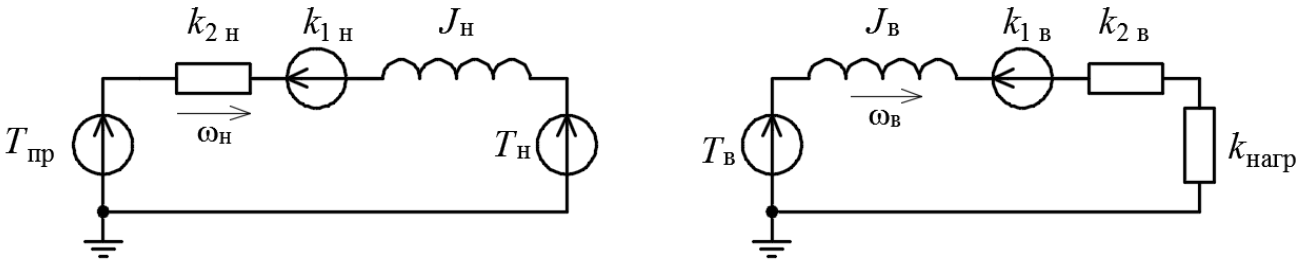
При превышении приводом значения максимального момента магнитная передача выходит из синхронизма, и её входной ротор (низкоскоростной) начинает резко ускоряться (рисунок 55 (а)), а выходной (высокоскоростной) ротор начинает замедляться (рисунок 55 (б)) и в конце теряет постоянную составляющую частоты вращения, совершая колебания относительно нулевого значения. Момент магнитной передачи также теряет постоянную составляющую и колеблется относительно нулевого значения с амплитудой, равной максимальному моменту на соответствующем роторе (рисунок 56), то есть фактически приобретает реактивный характер, так как не участвует в передаче мощности.

3.5 Методика составления линеаризованной динамической модели

Динамическая модель магнитной передачи, основанная на нелинейной системе дифференциальных уравнений (63), позволяет получить точный результат с минимальными упрощающими допущениями. Однако такая модель неудобна для использования на начальных этапах проектирования в целях первичной оценки параметров возникающих колебаний. Для этих целей удобнее воспользоваться линеаризованной динамической моделью, в которой соотношение между возникающим моментом и углом нагрузки представлено не синусоидальной

функцией, а её линейной аппроксимацией в области рабочего момента. При таком допущении становится возможным выполнить расчёт системы в частотной области.

Наиболее удобно составить обращённую механическую модель, в которой момент является фазовой переменной типа потенциала, а угловая скорость вращения — фазовой переменной типа потока [137]. На рисунке 57 представлены механические подсистемы отдельно для низко- и высокоскоростного роторов, составленные по обращённой модели. Согласно этой механической модели, момент привода представлен идеальным источником механической ЭДС, коэффициенты вязкого трения — механическими сопротивлениями, коэффициенты сухого трения — механическими ЭДС, моменты инерции — механическими индуктивностями. Моменты, действующие на низко- и высокоскоростной роторы системы, представлены источниками механических ЭДС. В режиме мультипликатора момент, действующий на низкоскоростной ротор, является тормозящим, а момент, действующий на высокоскоростной ротор, движущим, что отражено на рисунке 57.



а б

Рисунок 57 – Эквивалентные схемы механических подсистем роторов магнитной передачи: а – низкоскоростного; б – высокоскоростного

Учитывая, что моменты низко- и высокоскоростного роторов относятся как передаточное отношение (58), то для удобства анализа схемы сделано приведение высокоскоростного ротора магнитной передачи к её низкоскоростному ротору. Процесс приведения заключается в приравнивании моментов низко- и высокоскоростного роторов и последующей модификации остальных элементов эквивалентной схемы в соответствии с балансом мощностей. Для электромагнитных моментов можно записать следующее соотношение

$$T'_{\text{в}} = T_{\text{н}} = -i \cdot T_{\text{в}}, \tag{70}$$

где $T'_{\text{в}}$ — приведённый момент высокоскоростного ротора, Н·м.

Механическая мощность, передаваемая на высокоскоростной ротор до и после приведения, должна быть неизменна, откуда

$$T'_{\text{в}} \cdot \omega'_{\text{в}} = T_{\text{в}} \cdot \omega_{\text{в}}, \tag{71}$$

где $\omega'_{\text{в}}$ — приведённая угловая скорость высокоскоростного ротора, рад/с.

Из соотношений (70) и (71) следует

$$\omega'_{\text{в}} = \frac{\omega_{\text{в}}}{i}. \tag{72}$$

Значения моментов инерции роторов и коэффициентов диссипации мощности при приведении должны быть выбраны таким образом, чтобы удовлетворялись энергетические соотношения. Энергия, запасённая во вращающемся роторе до приведения, должна быть равна её значению после приведения, следовательно

$$\begin{gathered} \frac{J_{\text{в}} \cdot \omega_{\text{в}}^2}{2} = \frac{J'_{\text{в}} \cdot \omega'^2_{\text{в}}}{2}, \\ \Downarrow \\ J'_{\text{в}} = J_{\text{в}} \cdot \left(\frac{\omega_{\text{в}}}{\omega'_{\text{в}}} \right)^2 = J_{\text{в}} \cdot i^2, \end{gathered} \tag{73}$$

где $J'_{\text{в}}$ — приведённый момент инерции высокоскоростного ротора, кг·м^2.

Аналогично для мощностей, выделяемых в диссипативных элементах

$$\begin{gathered} k_{2\text{в}} \cdot \omega_{\text{в}}^2 = k'_{2\text{в}} \cdot \omega'^2_{\text{в}}, \\ \Downarrow \\ k'_{2\text{в}} = k_{2\text{в}} \cdot \left(\frac{\omega_{\text{в}}}{\omega'_{\text{в}}} \right)^2 = k_{2\text{в}} \cdot i^2, \end{gathered} \tag{74}$$

$$\begin{gathered} k_{1\text{в}} \cdot \omega_{\text{в}} = k'_{1\text{в}} \cdot \omega'_{\text{в}}, \\ \Downarrow \\ k'_{1\text{в}} = k_{1\text{в}} \cdot \frac{\omega_{\text{в}}}{\omega'_{\text{в}}} = k_{1\text{в}} \cdot i, \end{gathered} \tag{75}$$

где $k'_{1\,в}$ — приведённый коэффициент диссипации мощности за счёт гистерезиса для высокоскоростного ротора, Н·м;

$k'_{2\,в}$ — приведённый коэффициент диссипации мощности за счёт индуцированных токов для высокоскоростного ротора, Н·м·с/рад.

Операция приведения позволяет объединить механические подсистемы высоко- и низкоскоростного роторов в одну эквивалентную схему (рисунок 58). При этом в общей ветви переменная типа потока имеет значение разности угловых скоростей низкоскоростного ротора и приведённой угловой скорости высокоскоростного ротора.

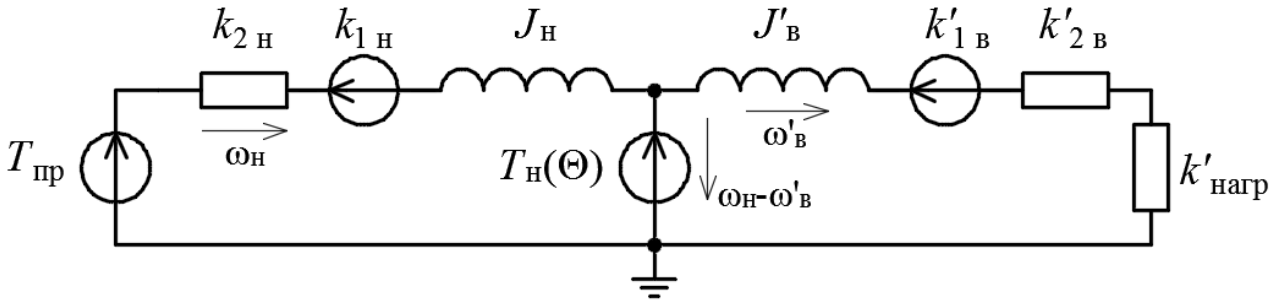


Рисунок 58 – Эквивалентная схема механической подсистемы после приведения высокоскоростного ротора к низкоскоростному ротору

При допущении, что амплитуда колебаний электромагнитного момента меньше максимального момента магнитной передачи, можно линеаризовать систему, введя в неё вместо источника электромагнитного момента упругий элемент (рисунок 59) — угловую пружину. Коэффициент упругости пружины относительно низкоскоростного ротора определяется как производная от нагрузочной характеристики в точке рабочего момента

$$k_у = \left| \left. \frac{dT_{н\max} \sin\Theta}{d\Theta} \right|_{\Theta=\Theta_р} \right| = T_{н\max} \cos\Theta_р = T_{н\max} \cos\left(\arcsin\left(\frac{T_р}{T_{н\max}} \right) \right) = \\ = T_{н\max} \sqrt{1 - \left(\frac{T_р}{T_{н\max}} \right)^2} = \sqrt{T_{н\max}^2 - T_р^2}. \qquad (76)$$

где $T_р$ — рабочий момент, Н·м;

$\Theta_р$ — рабочий угол нагрузки, рад.

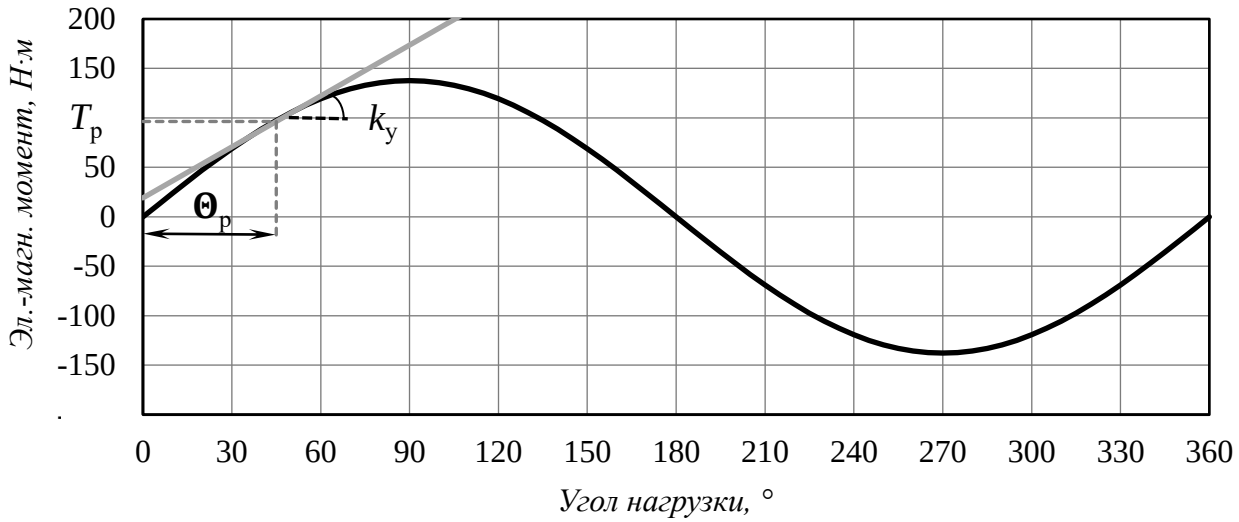


Рисунок 59 – Угловая характеристика электромагнитного момента и её линеаризация

Учитывая линеаризацию нагрузочной характеристики, момент магнитной передачи определяется выражением

$$T_н = k_у \cdot \Theta = k_у \cdot p_в \left(i \cdot \varphi_{п\,н} - \varphi_{п\,в} \right) = \\ = k_у \cdot p_в \left(i \int \omega_н(t) dt - \int \omega_в(t) dt \right) = k_у \cdot p_в \cdot i \int \left(\omega_н(t) - \omega'_в(t) \right) dt. \quad (77)$$

Таким образом, источник момента в общей ветви на рисунке 58 может быть представлен в виде эквивалентного механического конденсатора (рисунок 60) ёмкостью

$$C_м = \frac{1}{k_у \cdot p_в \cdot i}. \quad (78)$$

Переменная типа потенциала на механическом конденсаторе определяет электромагнитный момент, действующий на низкоскоростной и приведённый высокоскоростной роторы магнитной системы.

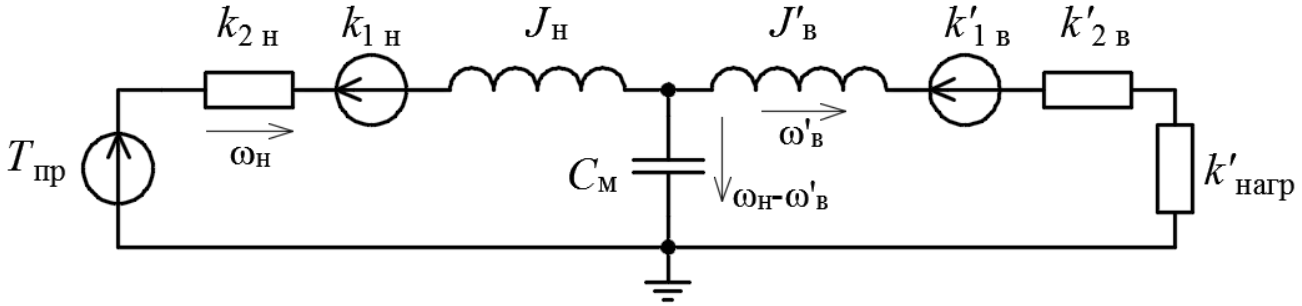


Рисунок 60 – Линеаризованная приведённая эквивалентная механическая схема магнитной передачи

В качестве тестового примера составлена схема линеаризованной механической подсистемы магнитной передачи в *Matlab/Simulink* (рисунок 61). Параметры системы соответствуют используемым значениям в п. 3.4.1. Так как в п. 3.4.1 рассматривались колебания при рабочем моменте 48 Н·м, то в целях сопоставления результатов механическая ёмкость эквивалентного конденсатора рассчитана по формуле (78) именно для этого момента

$$C_{\text{м}} = \frac{1}{p_{\text{в}} \cdot i \cdot \sqrt{T_{\text{н max}}^2 - T_{\text{р}}^2}} = \frac{1}{2 \cdot 11{,}5 \cdot \sqrt{137{,}7^2 - 48^2}} = 3{,}4 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{Н} \cdot \text{м}}. \qquad (79)$$

Результаты расчёта зависимости входного сопротивления системы от частоты приведены на рисунке 62.

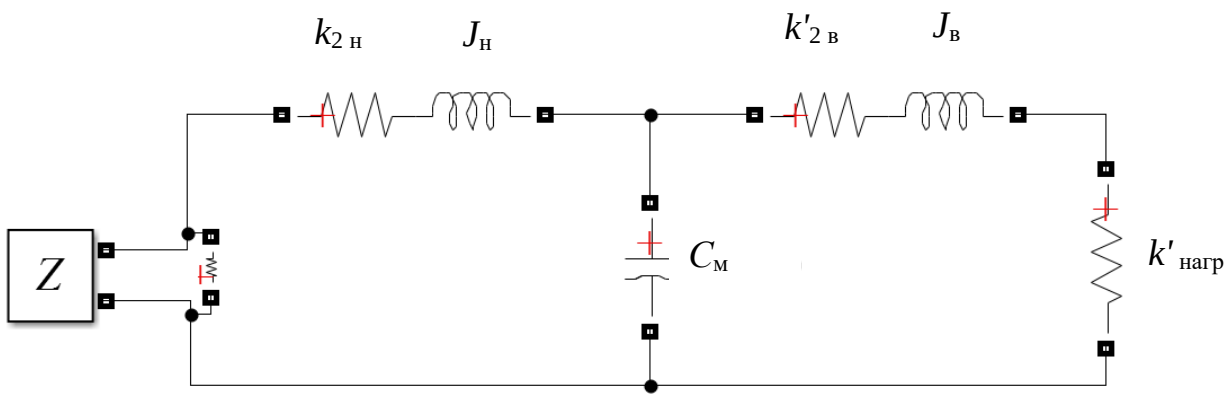


Рисунок 61 – Модель для определения собственных частот в среде *Matlab/ Simulink*

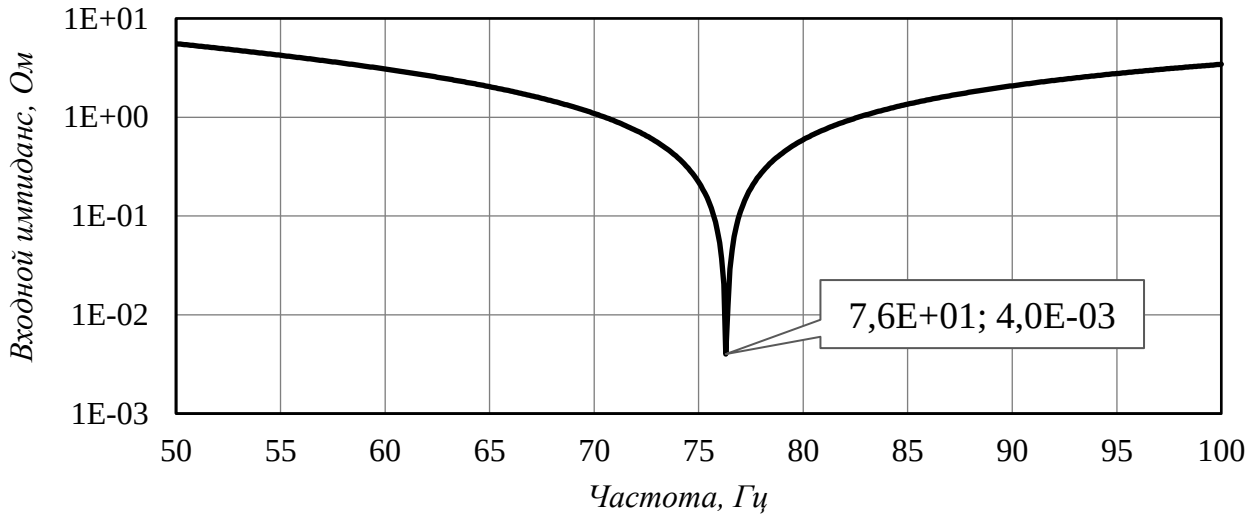


Рисунок 62 – ЛАЧХ приведённой механической подсистемы магнитной передачи

Согласно ЛАЧХ системы резонансная частота составила 76,3 Гц. Погрешность относительно нелинейной модели составляет 1%.

Значения коэффициентов диссипации энергии и моментов инерции для низкоскоростного и высокоскоростного роторов имеют значения одного порядка. Однако приведённые значения этих величин значительно отличаются друг от друга (73) – (75). При передаточном отношении 11,5 в приведённой механической подсистеме коэффициенты диссипации, а также моменты инерции для приведённого высокоскоростного ротора отличаются на два порядка от соответствующих значений для низкоскоростного ротора. Кроме того, в ветви высокоскоростного ротора присутствует нагрузка, что ещё более увеличивает разницу между полными механическими сопротивлениями ветвей, соответствующих низкоскоростному и высокоскоростному роторам. Следовательно, при оценки собственных частот колебаний на первых этапах проектирования можно пренебречь ветвью высокоскоростного ротора и воспользоваться упрощённой эквивалентной схемой (рисунок 63).

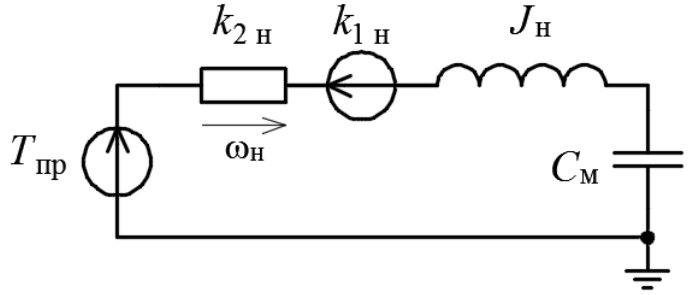


Рисунок 63 – Упрощённая эквивалентная схема магнитной передачи

Схема на рисунке 63 представляет собой *RLC* колебательный контур для которого известно [138], что частота свободных колебаний определяется как

$$f_{св} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC}}. \tag{80}$$

Таким образом, для рассматриваемой эквивалентной схемы

$$f_{св} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{C_м \cdot J_в}} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{3{,}4 \cdot 10^{-4} \cdot 13 \cdot 10^{-3}}} = 75{,}7 \text{ Гц}. \tag{81}$$

Погрешность определения частоты собственных колебаний при переходе от полной линейной модели к упрощённой составляет около 1%. Переход к упрощённой эквивалентной схеме позволяет рассчитать логарифмический коэффициент затухания колебаний

$$\alpha = \frac{k_{2\,\text{н}}}{2 \cdot J_{\text{н}}} = \frac{1{,}1 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 13 \cdot 10^{-3}} = 0{,}042 \frac{1}{c}. \tag{82}$$

В магнитной передаче существуют потери не только пропорциональные квадрату угловой скорости вращения, но и пропорциональные её первой степени. Вследствие этого амплитуда пульсаций затухает не только экспоненциально, но и линейно [139, 140]. За каждый период колебаний амплитуда углового перемещения уменьшается на

$$\gamma = 2k_{1\,\text{н}} C_{\text{м}} = 2 \cdot 8{,}6 \cdot 10^{-2} \cdot 3{,}4 \cdot 10^{-4} = 5{,}8 \cdot 10^{-5} \text{ рад}. \tag{83}$$

Так как моменты роторов передачи относятся как передаточное отношение, то возникающие колебания моментов имеют одинаковую фазу пульсаций. Эти моменты приводят к возникновению колебаний частоты вращения, начальные фазы которых в общем случае могут отличаться. Отношение амплитуды пульсаций угловых скоростей вращения на холостом ходу определяется в соответствии с выражением

$$\frac{\omega_{\text{н max}}}{\omega_{\text{в max}}} = \frac{T_{\text{н}} / \sqrt{k_{2\,\text{н}}^2 + \left(2\pi \cdot f_{\text{с}} \cdot J_{\text{н}}\right)^2}}{T_{\text{в}} / \sqrt{k_{2\,\text{в}}^2 + \left(2\pi \cdot f_{\text{с}} \cdot J_{\text{в}}\right)^2}} = \frac{i \cdot \sqrt{k_{2\,\text{в}}^2 + \left(2\pi \cdot f_{\text{с}} \cdot J_{\text{в}}\right)^2}}{\sqrt{k_{2\,\text{н}}^2 + \left(2\pi \cdot f_{\text{с}} \cdot J_{\text{н}}\right)^2}} \approx i. \tag{84}$$

Коэффициенты потерь мощности и моменты инерции для высоко- и низкоскоростного роторов обычно имеют близкие значения. Из выражения (84) видно, что на холостом ходу амплитуда пульсации угловой скорости на низкоскоростном роторе примерно в передаточное число раз больше, чем на высокоскоростном роторе. При добавлении нагрузки пульсации на внутреннем роторе ещё больше уменьшаются, то есть демпфируются нагрузкой.

Следует также отметить, что в связи с тем, что комплексные значения механических сопротивлений ветвей низко- и высокоскоростного роторов различны, то начальные фазы пульсаций их угловых скоростей также различны,

что вызывает ярко выраженное непостоянство передаточного отношения по скорости во время переходного режима, что необходимо учитывать при проектировании электромеханических систем с магнитными передачами.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

1. Предложен подход к составлению динамической макромодели магнитной передачи и методика определения её параметров на основе данных полевого расчёта. На основании предложенной методики проведено моделирование различных режимов магнитной передачи при работе на нагрузку в *Matlab/Simulink*.

2. Предложена упрощённая линеаризованная динамическая модель магнитной передачи, позволяющая проводить оценку собственных частот колебаний и параметров затухания на начальных этапах проектирования.

3. По результатам моделирования выявлен ряд особенностей магнитной передачи при работе в переходных режимах:

- пульсации скорости на высокоскоростном роторе более чем в передаточное отношение раз меньше, чем на низкоскоростном роторе;
- начальные фазы пульсаций скорости на низко- и высокоскоростном роторах отличаются, вследствие чего наблюдается непостоянство мгновенного значения передаточного отношения в переходных режимах;
- частоты колебаний и коэффициенты затухания в большей степени определяются параметрами низкоскоростного ротора магнитной передачи.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И МЕТОДИКИ ИСПЫТАНИЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА МАГНИТНОЙ ПЕРЕДАЧИ

4.1 Общее описание конструкции экспериментального образца

Экспериментальный образец магнитной передачи разработан в центре «К-Электро» «НИУ» МЭИ» и изготовлен на НПО «ЭРГА». Размеры магнитной системы и свойства материалов соответствуют принятым в п. 2.2 (таблица 1, рисунок 7). Основные расчётные данные для этого варианта магнитной системы, полученные в главе 2, сведены в таблицу 2.

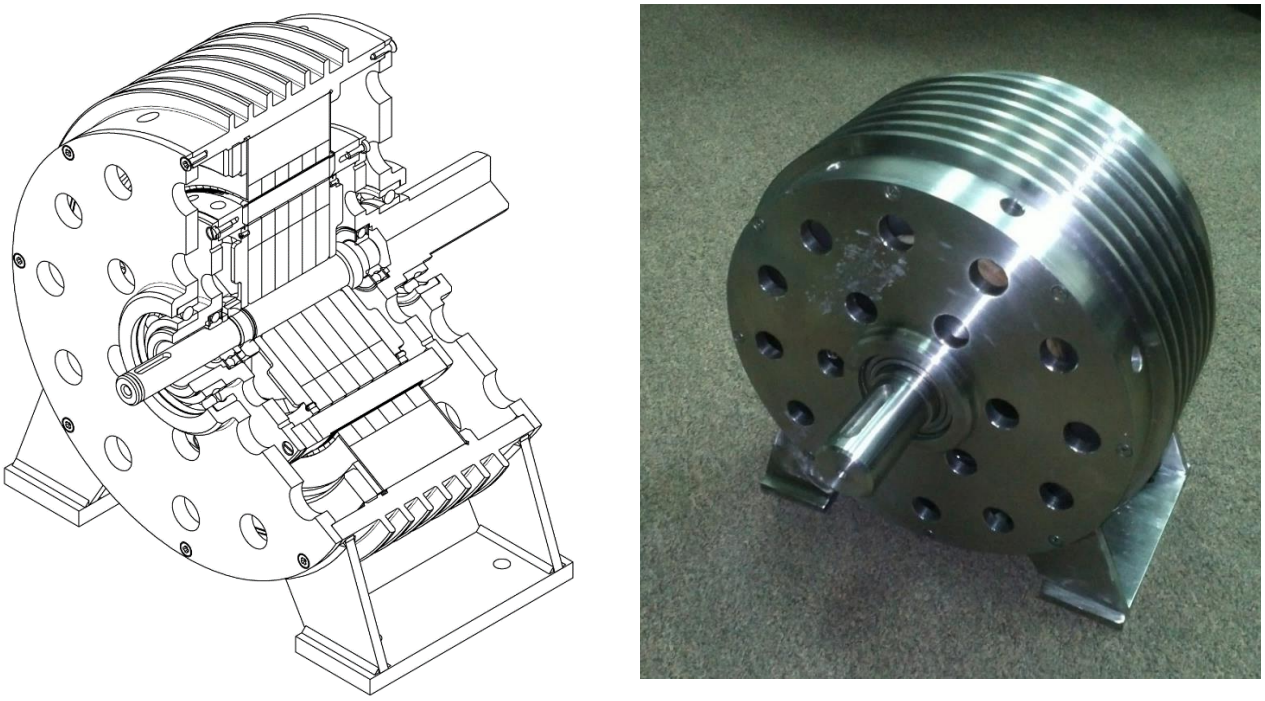
Таблица 2 – Основные расчётные параметры экспериментального образца магнитной передачи

Максимальный электромагнитный момент, Н·м	137,7
КПД при 500 об/мин, %	97,6
Период реактивного момента, градусы	4,29
Передаточное отношение	11,5

Сборочный чертёж экспериментального образца магнитной передачи представлен в приложении Б, а его общий вид — на рисунке 64. Корпус устройства изготовлен из нержавеющей немагнитной стали марки 12Х18Н10Т и состоит из станины и закреплённых по её торцам крышек, выполняющих роль подшипниковых щитов. Станина выполнена оребрённой для улучшения теплоотдачи. В крышках корпуса предусмотрены вентиляционные отверстия, а также установлены две шарикоподшипниковые опоры, обеспечивающие вращение низкоскоростного ротора. К станине приварены опоры для установки и крепления магнитной передачи на неподвижном основании.

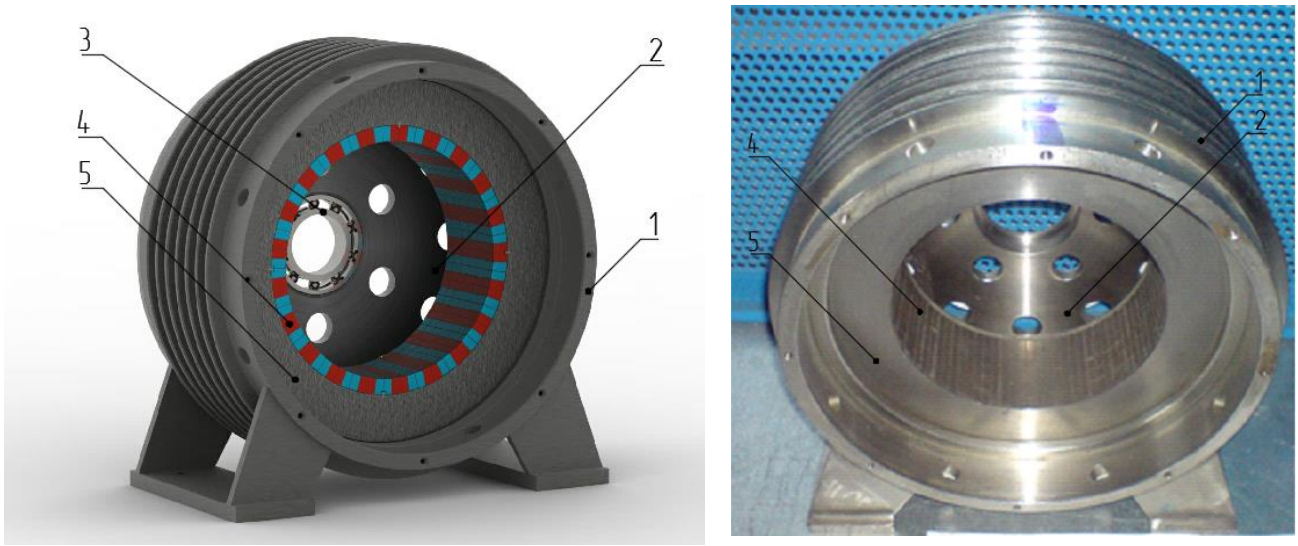
К внутренней поверхности станины прилегает статор (рисунок 65), который состоит из слоя редкоземельных радиально намагниченных постоянных магнитов марки $N38UH$ (рисунок 8), образующих магнитную систему с 21 парой полюсов. Постоянные магниты разделены в осевом направлении на сегменты размером 10 мм и установлены на внутренней поверхности полого цилиндра —

магнитопровода, выполненного из шихтованной электротехнической стали марки 2421 с толщиной листа 0,28 мм (рисунок 9). Листы магнитопровода дополнительно поджаты в осевом направлении специальной гайкой через утолщённую пластину из немагнитного материала.



а б

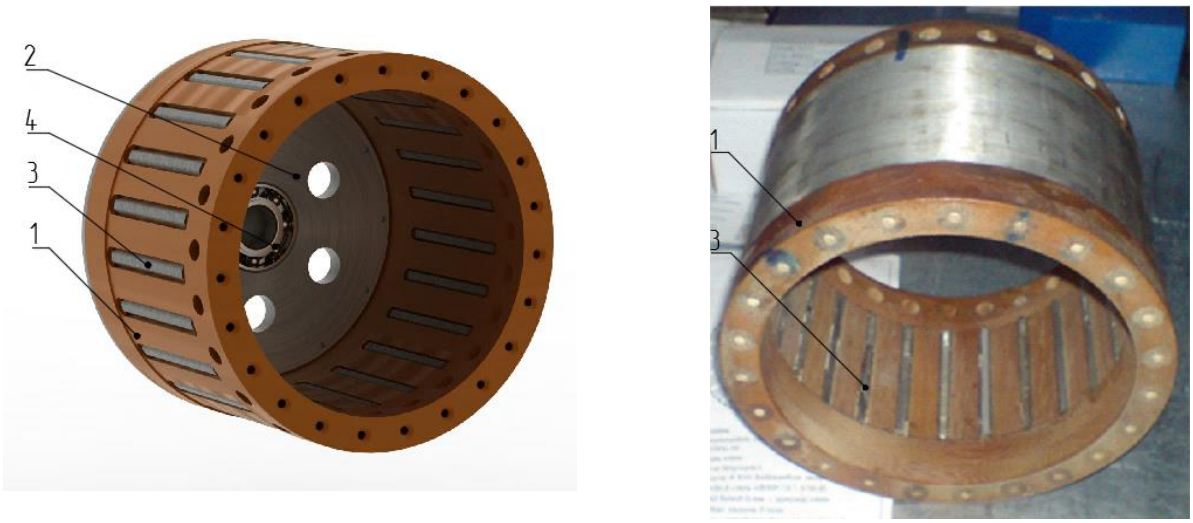
Рисунок 64 – Экспериментальный образец магнитной передачи:
а – 3D модель; б – общий вид



а б

Рисунок 65 – Часть конструкции статора магнитной передачи в станине:
а – 3D модель; б – экспериментальный образец; 1 – станина; 2 – крышка; 3 – подшипниковая опора низкоскоростного ротора; 4 – постоянные магниты; 5 – магнитопровод

Статор охватывает низкоскоростной ротор (рисунок 66), который состоит из корпуса, представляющего собой полый цилиндр из немагнитного неэлектропроводящего материала (текстолит) с торцевыми крышками из немагнитной нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т. Одна из торцевых крышек низкоскоростного ротора выполнена заодно с тихоходным валом. Полый цилиндр имеет 23 паза, равномерно расположенных вдоль окружности. Внутри пазов установлены сегменты, выполненные из композитного магнитомягкого материала на основе *Somaloy* 5*P* (рисунок 11). В крышках корпуса низкоскоростного ротора расположены две подшипниковые опоры, обеспечивающие вращение высокоскоростного ротора.

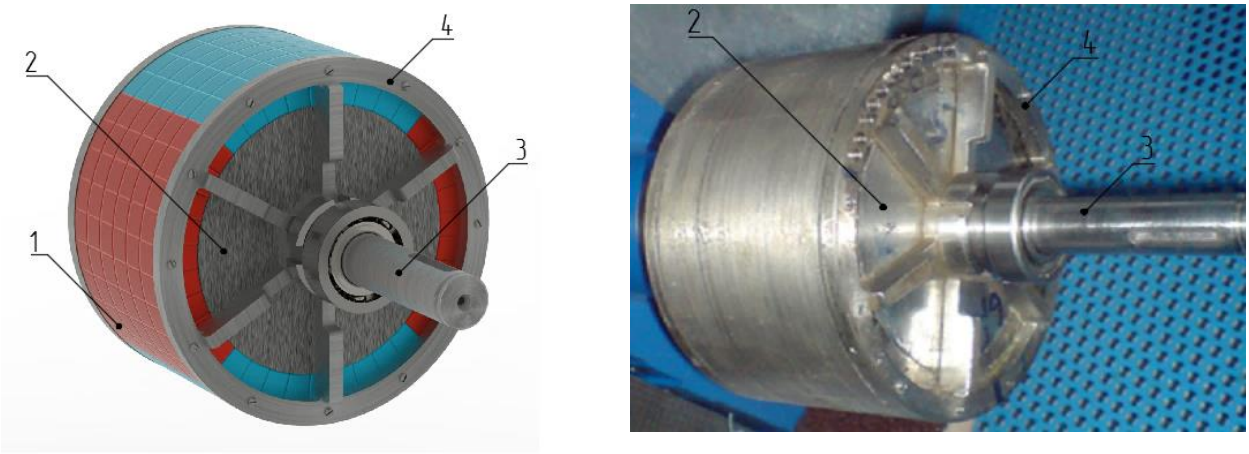


а б

Рисунок 66 – Часть конструкции низкоскоростного ротора магнитной передачи:
а – 3D модель; б – экспериментальный образец; 1 – корпус; 2 – крышка; 3 – сегмент низкоскоростного ротора; 4 – подшипниковая опора высокоскоростного ротора

Низкоскоростной ротор охватывает высокоскоростной ротор (рисунок 67), который содержит четырёхполюсную магнитную систему из радиально намагниченных редкоземельных постоянных магнитов марки *N38UH* (рисунок 8), разделённых в осевом направлении на сегменты размером 10 мм. Магниты расположены на цилиндре — магнитопроводе, набранном из дисков сортовой электротехнической стали марки 21850 (рисунок 9) толщиной 10 мм, насаженных на быстроходный вал. По торцам высокоскоростного ротора установлены кольца из немагнитной нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т со спицами, образующими лопатки, которые выполняют функцию вентилятора и обеспечивают интенсивное

перемешивание воздуха внутри корпуса устройства. Габаритные размеры 269,5×276×285 мм, масса ~ 42,7 кг. Масса постоянных магнитов 4,8 кг.



а б

Рисунок 67 – Высокоскоростной ротор магнитной передачи:
а – 3D модель; б – экспериментальный образец; 1 – постоянные магниты; 2 – магнитопровод; 3 – быстроходный вал; 4 – кольца со спицами

4.2 Методика и результаты измерения максимального момента

Максимальный момент экспериментального образца магнитной передачи определялся на экспериментальной установке, изображённой на рисунке 68. Для проведения эксперимента магнитная передача 1 закрепляется на неподвижном основании 2. К быстроходному валу магнитной передачи присоединён шкив 3 радиусом 150 мм, на который намотана тонкая нить 4. К нити 4, в свою очередь, прикреплён тонкостенный сосуд 5. В сосуд 5 добавлялся малыми порциями песок до момента «срыва» (достижения максимального электромагнитного момента). После этого производится измерение массы сосуда с песком при помощи электронного безмена. Было проведено семь экспериментов при различных положениях роторов относительно статора, результаты которых приведены в таблице 3. Среднее значение массы сосуда с песком составило 7,125 кг. При этом средний максимальный электромагнитный момент высокоскоростного ротора

$$T_{в\,max} = m_г \cdot g \cdot R_{шк} = 7{,}13 \cdot 9{,}81 \cdot 150 \cdot 10^{-3} = 10{,}5\ Н \cdot м, \quad (85)$$

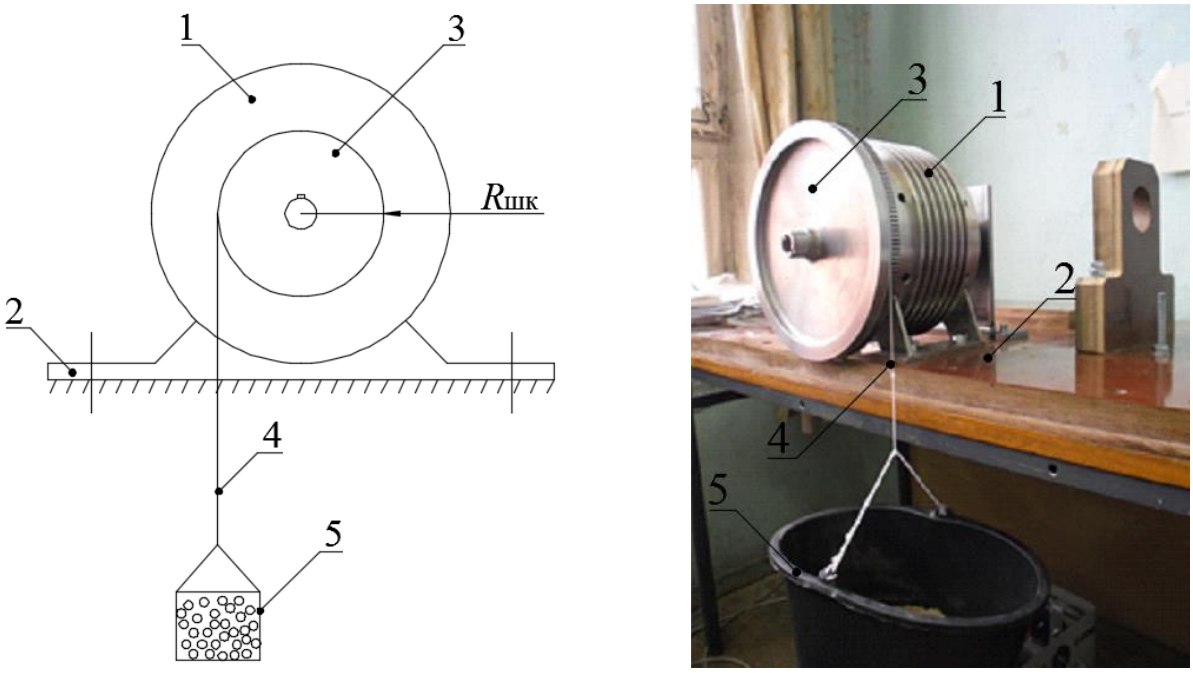
где $m_г$ — масса груза, кг;

$R_{шк}$ — радиус шкива, м.

Экспериментальное определение максимального момента на низкоскоростном роторе более трудоёмко, что связано с его большим значением. Однако момент на низкоскоростной ротор может быть рассчитан исходя из того, что отношение электромагнитных моментов, развиваемых роторами равно передаточному отношению, что, в свою очередь, было получено при моделировании (рисунок 17, 18) и далее будет подтверждено экспериментально (п. 4.5). Таким образом, максимальный электромагнитный момент, действующий на низкоскоростной ротор, составляет

$$T_{\text{н max}} = T_{\text{в max}} \cdot i = 10{,}5 \cdot 11{,}5 = 120{,}8\ H \cdot м, \qquad (86)$$

что меньше расчётного значения на 12,7 %. Уменьшение момента является следствием наличия в реальной конструкции клеевых зазоров и возможного отклонения свойств магнитных материалов от принятых при расчёте. Плотность момента экспериментального образца по активным материалам составила 47,7 кН·м/м^3.



а б

Рисунок 68 – Экспериментальная установка для определения максимального электромагнитного момента:
а – принципиальная схема; б – общий вид; 1 – магнитная передача; 2 – основание; 3 – шкив; 4 – нить; 5 – груз

Таблица 3 – Результаты эксперимента по определению максимального момента

Номер эксперимента	1	2	3	4	5	6	7	Среднее
Масса груза, кг	7,63	7,08	7,16	6,92	7,00	7,05	7,08	7,13

4.3 Методика и результаты измерения момента трогания

При вращении вала экспериментального образца магнитной передачи наблюдается следующее явление. Если к роторам передачи не приложены внешние моменты, то они занимают некоторое устойчивое положение равновесия. При плавном увеличении момента, приложенного к одному из роторов, для определённости к высокоскоростному, угол его поворота начинает увеличиваться. Угол поворота низкоскоростного ротора при этом также увеличивается. При этом если перестать прикладывать момент к высокоскоростному ротору, то происходит возвращение роторов в исходное положение равновесия, а при превышении приложенным моментом некоторого значения происходит самопроизвольная установка низко- и высокоскоростного роторов в новое положение равновесия. Иными словами, роторы системы занимают дискретные положения, подобные таковым в шаговых электродвигателях, что является следствием наличия реактивного момента. Схема установки для определения момента трогания представлена на рисунке 69.

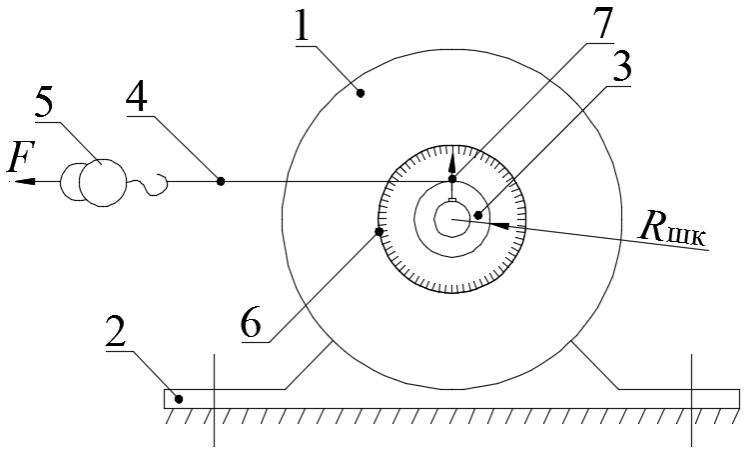


Рисунок 69 – Принципиальная схема экспериментальной установки для определения момента трогания:
1 – магнитная передача; 2 – основание; 3 – шкив на валу; 4 – нить; 5 – измеритель силы; 6 – шкала; 7 – стрелка

Экспериментальный образец магнитной передачи 1 закрепляется на основании 2. На быстроходный вал устанавливается шкив 3 радиусом 30,65 мм, а на тихоходный — радиусом 250,5 мм. На шкив наматывается тонкая нить 4, к которой через измеритель силы 5 прикладывается плавно увеличивающаяся сила до тех пор, пока роторы системы не перейдут в новое устойчивое положение равновесия. Угловое положение ротора фиксируется при помощи неподвижной шкалы 6, закреплённой на крышке корпуса, и стрелки 7, жёстко соединённой с валом. Измеренные значения силы, которую необходимо приложить для перехода роторов в новое положение равновесия, представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты определения силы трогания

№ эксперимента	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ср.
Тихоходный вал, Н	49,6	57,2	99,8	83,2	77,4	110,2	55,3	80,0	108,0	79,0	80,0
Быстроходный вал, Н	44,5	58,6	26,5	64,5	61,0	70,2	31,2	51,5	70,8	64,4	54,3

Моменты трогания рассчитывались как

$$T_{\text{тр}} = F_{\text{т ср}} \cdot R_{\text{шк}}, \tag{87}$$

где $F_{\text{т ср}}$ — среднее значение силы трогания, измеренное на быстроходном валу.

Таким образом, моменты трогания для быстроходного и тихоходного валов составили 1,67 Н·м и 20,05 Н·м. Отношение средних моментов трогания равно 12, что на 4,3 % больше передаточного отношения исследуемой магнитной передачи. С учётом несовершенства методики эксперимента полученное значение можно считать удовлетворительным результатом, соответствующем результатам п. 2.5.2.

В процессе проведения эксперимента было установлено, что трогание происходит после принудительного поворота высокоскоростного ротора на 8,5°, что в четыре раза превышает рассчитанный ранее полупериод реактивной силы (рисунок 34). После превышения углом поворота высокоскоростного ротора 8,5° происходит самопроизвольная установка роторов в новое положение равновесия, отличающееся от предыдущего примерно на 17°. Причиной расхождения между расчётным (4,29°) и измеренным значением периода реактивной силы может быть неравномерность воздушного зазора или свойств магнитных материалов.

Например, если один из постоянных магнитов высокоскоростного ротора имеет значение остаточной магнитной индукции, отличающееся от остальных постоянных магнитов, что могло произойти при сборке магнитной системы из-за отсутствия входного контроля. Если при расчёте изменить остаточную магнитную индукцию одного из постоянных магнитов с 1,26 Т до 1 Т, то кривая реактивной силы изменяется таким образом, что её период станет равным 17,1° (рисунок 70), что соответствует результатам эксперимента.

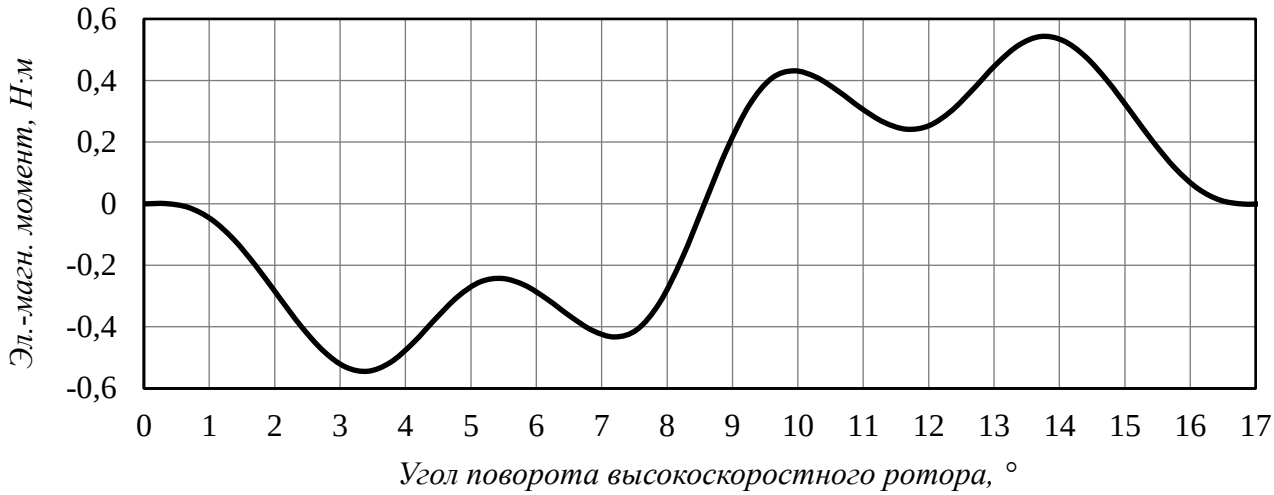


Рисунок 70 – Расчётная зависимость реактивного момента от угла поворота при разной намагниченности одного из ПМ высокоскоростного ротора

4.4 Методика и результаты измерения передаточного отношения по углу поворота

Соотношение между углами поворота роторов магнитной передачи есть передаточное отношение по углу поворота. Принципиальная схема экспериментальной установки для определения этого параметра аналогична той, что используется для определения момента трогания магнитной передачи (рисунок 69). Сила прикладывается напрямую через нить 4 к шкиву 3 без использования силоизмерительного устройства. При этом измеряется угол поворота роторов системы, для чего на крышках корпуса закреплены круговые шкалы 6 с ценой деления 1°, а на входном и выходном валах установлены стрелки 7. Осуществляется поворот быстроходного вала на угол $\varphi_в$ и фиксируется угол поворота тихоходного вала $\varphi_н$. Передаточное отношение по углу поворота определяется по формуле

$$i_{\varphi} = \frac{\varphi_{в}}{\varphi_{н}}. \quad (88)$$

Роторы экспериментального образца магнитной передачи занимают дискретные положения, в результате чего в ходе эксперимента невозможно зафиксировать их поворот на целое число оборотов. При проведении эксперимента низкоскоростной ротор повернулся на 359° (361°), при этом быстроходный ротор повернулся на 4131° (4149°). Таким образом, передаточное отношение по углу для этих двух случаев составили 11,507 и 11,493 соответственно. Среднее значение передаточного отношения составляет 11,5, что соответствует расчётному значению.

4.5 Методика и результаты измерения передаточного отношения магнитной передачи по моменту

Отношение моментов, действующих на роторы, равно передаточному отношению по моменту, которое в свою очередь должно быть равно передаточному отношению по углу. Для проверки данного утверждения была собрана установка, принципиальная схема которой приведена на рисунке 71.

В ходе проведения эксперимента магнитная передача 1 закрепляется на неподвижном основании 2. На быстроходный вал жёстко закрепляется шкив 3 радиусом 30,65 мм, к которому посредством тонкой нити 4 через блок 5 подвешен груз 6 массой 16 кг. Тихоходный вал заблокирован при помощи рычага 7 длиной 403 мм, упирающегося в неподвижное основание 2. Рычаг 7 установлен горизонтально. К рычагу 7 через силоизмерительное устройство 8 прикладывается сила, направленная строго вертикально. Сила плавно увеличивается до тех пор, пока рычаг 5 не начинает отрываться от основания 3. Измеренная сила составила 145,1 Н. Момент рассчитывается по формуле

$$M = R_{шк} \cdot F. \quad (89)$$

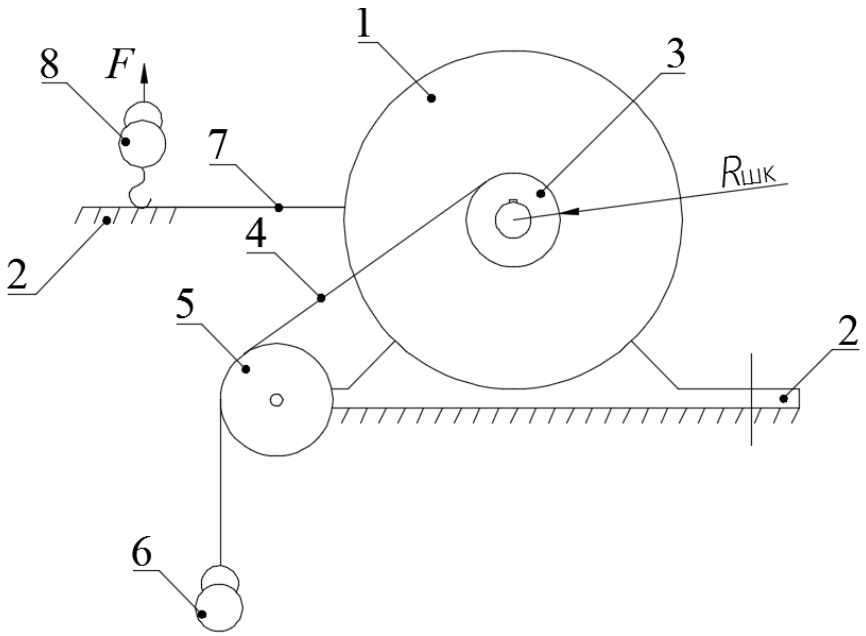


Рисунок 71 – Принципиальная схема экспериментальной установки для определения передаточного отношения по моменту:
1 – магнитная передача; 2 – основание; 3 – шкив; 4 – нить; 5 – блок; 6 – груз; 7 – рычаг; 8 – измеритель силы

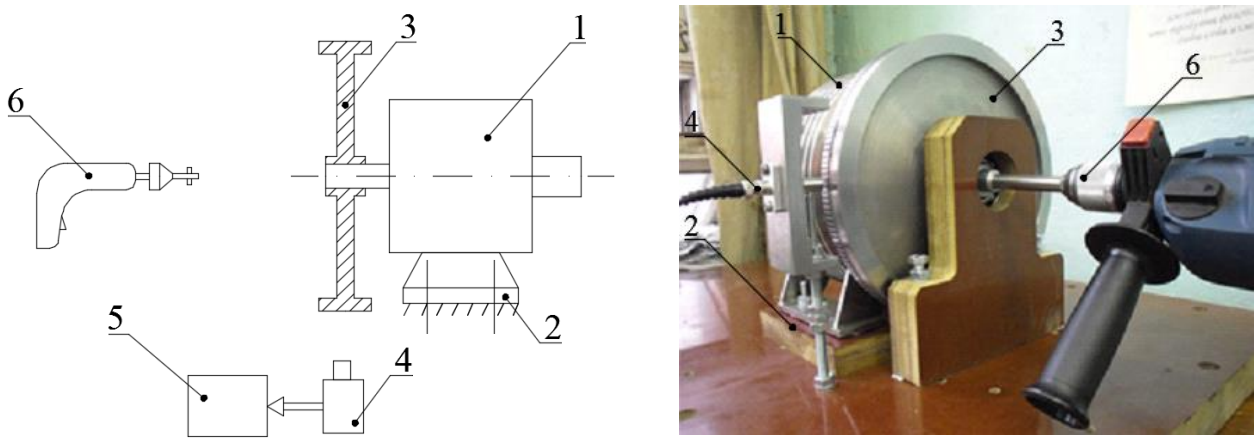
Таким образом, момент на тихоходном валу составил 58,4 Н·м, в то время как на быстроходном валу — 4,8 Н·м. Передаточное отношение по электромагнитным моментам составило

$$i_{\text{Т}} = \frac{58,4}{4,8} = 12,2. \quad (90)$$

Данный результат на 6% отличается от расчётного значения (11,5), что связано с несовершенством используемого метода измерения.

4.6 Методика и результаты определения потерь мощности

Для определения зависимости мощности потерь экспериментального образца магнитной передачи от скорости вращения её роторов использовался экспериментальный стенд, принципиальная схема и внешний вид которого показан на рисунке 72.



а б

Рисунок 72 – Экспериментальная установка для измерения потерь мощности
а – принципиальная схема; б – внешний вид; 1 – магнитная передача; 2 – основание;
3 – маховик; 4 – оптический датчик скорости; 5 – персональный компьютер; 6 – разгонное устройство (дрель).

Эксперимент проводился методом самоторможения [141]. Для проведения эксперимента экспериментальный образец магнитной передачи 1 закрепляется на неподвижном основании 2, на быстроходный вал ротора устанавливается цилиндрический маховик 3 (рисунок 73) с известным моментом инерции. На боковой поверхности маховика нанесены деления, на которые обращён сенсор оптического датчика скорости 4, передающий данные на персональный компьютер 5. В процессе проведения эксперимента маховик 3 раскручивается при помощи разгонного устройства 6 до скорости 660 об/мин. Затем разгонное устройство выводится из зацепления с маховиком. Таким образом, магнитная передача переводится в режим свободного выбега. В таком режиме частота вращения постепенно уменьшается под действием тормозящего момента, вызванного наличием как магнитных потерь, так и механических потерь в подшипниках. За время самоторможения вся кинетическая энергия, приобретённая вращающимися частями магнитной передачи и маховиком, переходит в тепло. Полученная в результате эксперимента кривая зависимости угловой скорости высокоскоростного ротора от времени приведена на рисунке 74 и может быть аппроксимирована следующей функцией

$$\omega_{в}(t) = 0,012t^2 + 2,9t + 69,9. \quad (91)$$

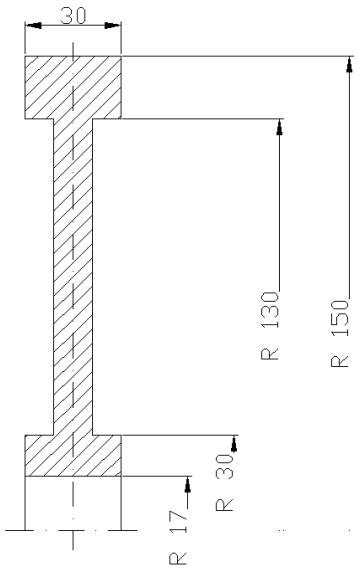


Рисунок 73 – Эскиз маховика

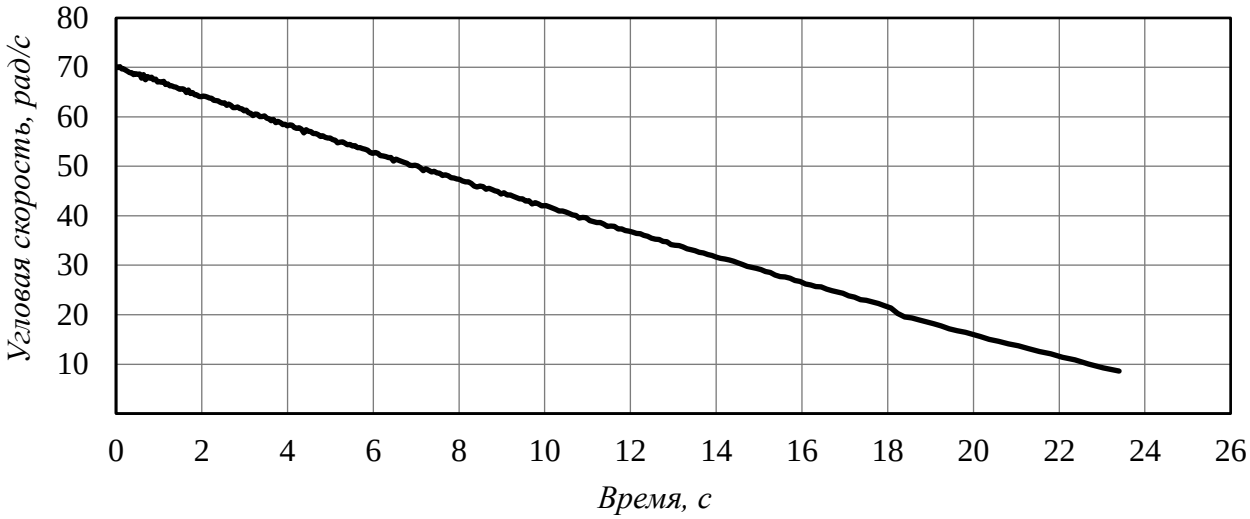


Рисунок 74 – Экспериментальная зависимость угловой скорости от времени в режиме самоторможения

Закон движения в режиме самоторможения определяется дифференциальным уравнением

$$T_{\text{п}} = \left(J_{\text{м}} + J_{\text{п}} \right) \cdot \frac{d\omega_{\text{в}}}{dt}, \tag{92}$$

где $T_{\text{п}}$ — момент потерь, Н·м;

$J_{\text{м}}$ — момент инерции маховика, кг·м^2;

$J_{\text{п}}$ — приведённый к высокоскоростному ротору момент инерции роторов магнитной передачи, кг·м^2.

По данным расчёта $J_м$ = 0,1042 кг·м^2, $J_п$ = 0,011 кг·м^2. Кривая зависимости момента потерь от скорости вращения быстроходного вала получена с использованием выражения (92) и представлена на рисунке 75.

Зависимость мощности потерь от частоты вращения быстроходного вала получена с использованием формулы

$$P_п(\omega_в) = T_п(\omega_в) \cdot \omega_в \tag{93}$$

и представлена на рисунке 76.

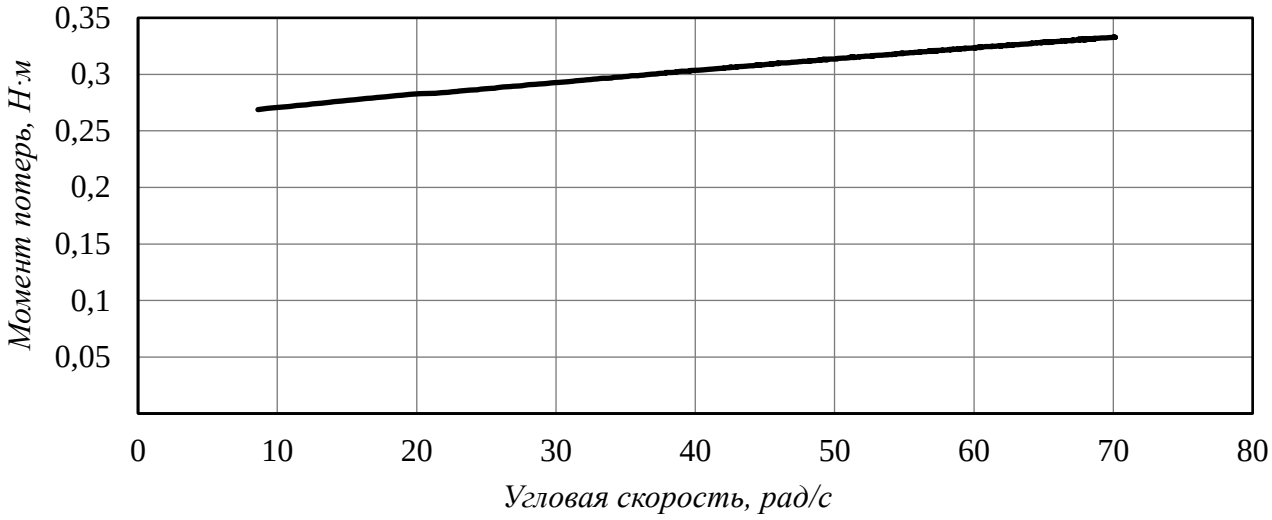


Рисунок 75 – Экспериментальная зависимость момента потерь от угловой скорости вращения высокоскоростного ротора

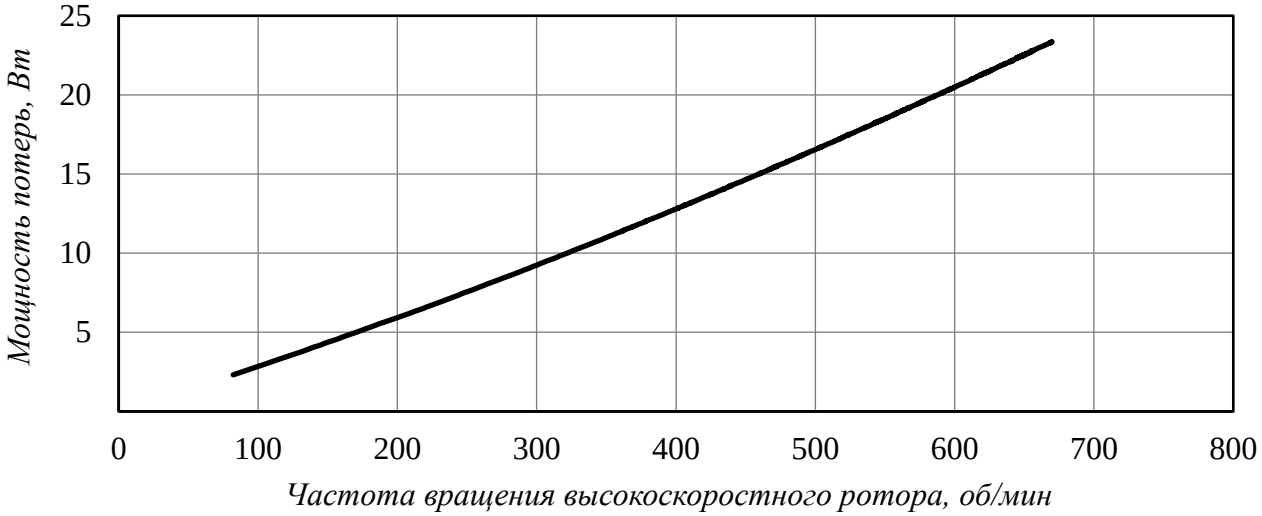


Рисунок 76 – Экспериментальная зависимость мощности потерь от частоты вращения маховика

Зависимость потерь в экспериментальном образце магнитной передачи от частоты вращения высокоскоростного ротора аппроксимирована полиномом второго порядка

$$P_п(\omega_в) = \left(9,6 \cdot 10^{-4}\right) n_в{}^2 + \left(2,7 \cdot 10^{-1}\right) n_в. \tag{94}$$

Мощность, выделяемая в результате возникновения вязкого трения и индуцированных токов, пропорциональна второй степени частоты вращения, а мощность, выделяемая из-за потерь, связанных с сухим трением и потерями на гистерезис, пропорциональна первой степени частоты вращения. Коэффициент аппроксимирующей функции при второй степени частоты вращения на три порядка меньше, чем при первой степени. Таким образом, можно сделать вывод, что на исследуемом диапазоне скоростей преобладают потери мощности, связанные с возникающим в магнитопроводах гистерезисом и сухим трением в подшипниках. Измеренное значение потерь значительно отличается от полученных в результате расчёта (п.2.5.5), что может быть связано с тем, что в проведённом эксперименте измерялись все виды потерь (магнитные и механические). Наличие повышенных потерь, пропорциональных второй степени частоты вращения, связано с наведением индуцированных токов в электропроводящих элементах конструкции экспериментального образца магнитной передачи (корпусах, подшипниках) вследствие сильно выраженных краевых эффектов. Повышенные потери, пропорциональные первой степени скорости вращения, связаны с наличием сухого трения в подшипниках, радиальная нагрузка которых достаточно высокая из-за наличия некомпенсированных радиальных сил магнитного тяжения, действующих на роторы системы.

Полученные коэффициенты аппроксимации полинома (94) могут быть использованы для уточнения параметров динамической макромодели магнитной передачи (п. 3.3).

По зависимости момента потерь от скорости вращения определена зависимость КПД от скорости вращения (рисунок 77). При допущении о независимости максимального момента от скорости КПД рассчитывается как

$$\eta = \frac{T_{\text{н}} / i - T_{\text{п}}(\omega_{\text{в}})}{T_{\text{н}} / i}, \tag{95}$$

где $T_{\text{н}}$ — номинальный момент на высокоскоростном роторе магнитной передачи на 30 % меньше максимального.

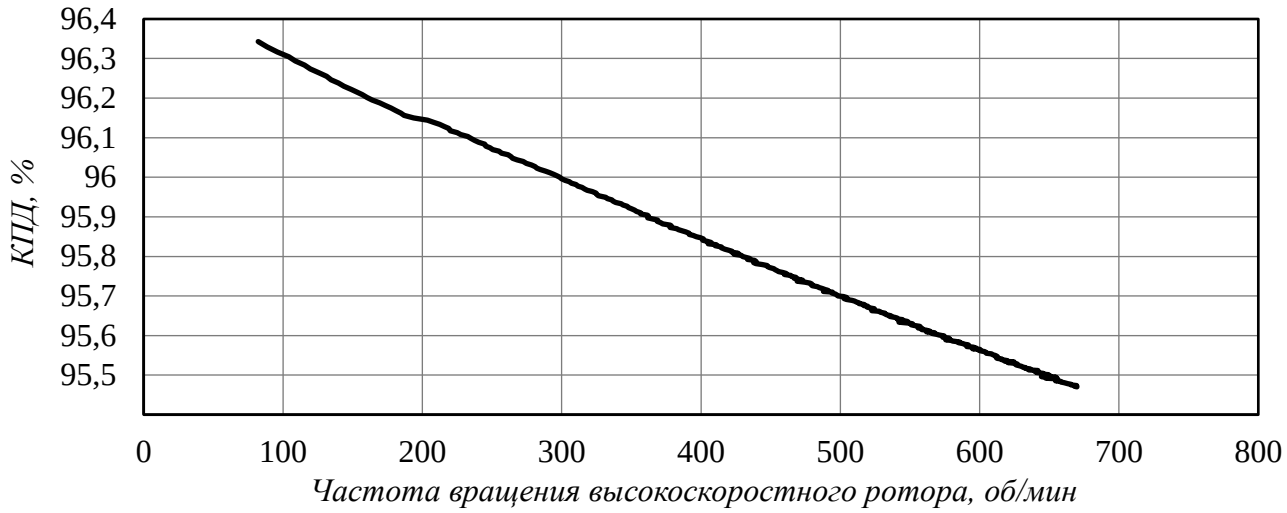
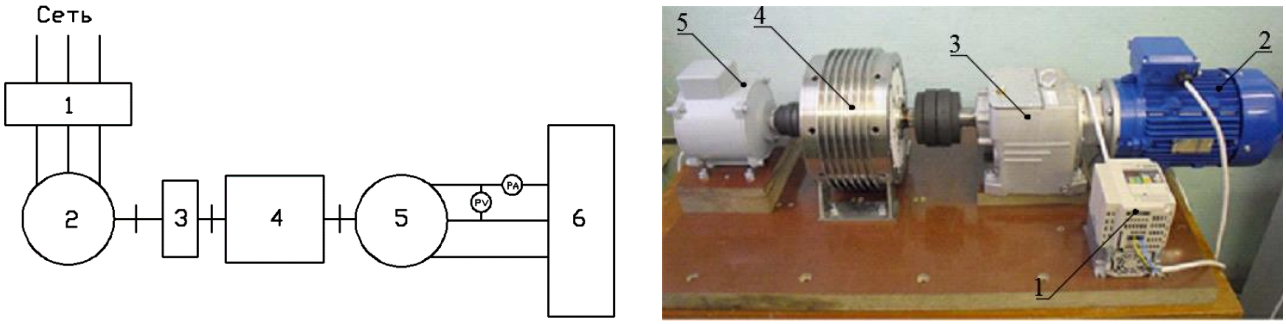


Рисунок 77 – Экспериментальная зависимость КПД от частоты вращения быстроходного вала.

4.7 Методика и результаты исследования работы магнитной передачи в рабочем режиме

В рабочем режиме магнитная передача выступает в роли преобразователя механической энергии, изменяя частоту вращения и момент. При этом она должна быть способна пропускать через себя поток механической мощности, проходящий от её источника к потребителю. Определение способности функционировать в рабочем режиме исследовано на лабораторном стенде (рисунок 78).



а б

Рисунок 78 – Экспериментальная установка для исследования магнитной передачи в рабочем режиме:
а – принципиальная схема; б – внешний вид; 1 – преобразователь частоты; 2 – электродвигатель; 3 – редуктор; 4 – магнитная передача; 5 – электрогенератор; 6 – нагрузка

Стенд для проведения лабораторных исследований получает питание от сети переменного трёхфазного напряжения 220/380 В. В качестве привода используется трёхфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором 2

совместно с понижающим редуктором 3. Регулирование скорости вращения электродвигателя 2 осуществляется при помощи статического преобразователя частоты 1. Механическая энергия вращения с вала понижающего редуктора 3 передаётся на испытуемый образец магнитной передачи 4, который производит повышение скорости вращения и уменьшение механического момента. Для создания момента нагрузки используется бесконтактный синхронный электрогенератор с возбуждением от постоянных магнитов 5, нагруженный на активную нагрузку 6 в виде магазина сопротивлений, соединённых в треугольник (на рисунке не показан). Параметры элементов лабораторного стенда представлены в приложении В. В ходе эксперимента устанавливалось значение сопротивления нагрузки 6. Затем производилось плавное увеличение скорости вращения электродвигателя 2 посредством увеличения частоты статического преобразователя 1. В целях ограничения максимальной скорости вращения по соображениям безопасности частота вращения вала электрогенератора не превышала 600 об/мин, что контролировалось по частоте тока на нагрузке, которая для электрогенератора, имеющего восемь пар полюсов, не должна превышать 80 Гц. При максимальном значении частоты питания электродвигателя 2 производилось измерение тока и напряжения на нагрузке 6, посредством чего оценивалась её мощность. Эксперимент был проведён для двух различных фазных сопротивлений нагрузки — 25,4 Ом и 7,6 Ом. В эксперименте с фазным сопротивлением нагрузки 7,6 Ом при плавном увеличении скорости вращения наблюдался «срыв» магнитной передачи, в результате которого передача мощности между её валами прекращалась. Частота напряжения, при которой происходил «срыв», составила 70 Гц, что соответствует скорости вращения быстроходного вала магнитной передачи 525 об/мин. Мощность, выделяемая на нагрузке, при этом составила 256 Вт. Результаты эксперимента приведены в таблице 5. Используя нагрузочную характеристику генератора (приложение В), можно рассчитать его внутреннее активное фазное сопротивление ($R_ф$), которое составило 3,5 Ом.

В момент времени непосредственно перед «срывом» линейный ток (I) был 5,8 А и значение мощности, рассеиваемой на внутреннем сопротивлении электрогенератора, составляло

$$P_{ф} = R_{ф} \cdot I^2 = 3{,}5 \cdot 5{,}8^2 = 353\,\text{Вт}. \quad (96)$$

Магнитные и механические потери в генераторе неизвестны. Принимая допущение о малости остальных видов потерь по сравнению с Джоулевыми потерями в обмотке в данном режиме работы, электромагнитный момент, развиваемый генератором, а значит и максимальный момент магнитной передачи, может быть оценён как

$$M_{max} = \frac{i \cdot 60\left(P_{ф} + P_{н}\right)}{2\pi \cdot n} = \frac{11{,}5 \cdot 60\left(353 + 256\right)}{2\pi \cdot 525} = 127\ \text{Н} \cdot \text{м}. \quad (97)$$

Что на 5% больше значения, полученного в результате эксперимента по определению максимального момента (п. 4.2). Стоит также отметить, что явление «срыва» магнитной передачи также наблюдалось при резком изменении нагрузки, что соответствует результатам главы 3.

Таблица 5 – Результаты эксперимента по работе магнитной передачи на нагрузку

	$R_{н}$ = 25,4 Ом	$R_{н}$ = 7,6 Ом	$R_{н}$ = 7,6 Ом
Ток нагрузки линейный, А	2,3	5,8	0
Напряжение на нагрузке фазное, В	33,4	25,5	0
Частота напряжения на нагрузке, Гц	80	70	0
Частота напряжения питания двигателя, Гц	45,1	39,4	40
Мощность нагрузки, Вт	133	256	0
Наблюдалось	Устойчивая работа	Устойчивая работа	«Срыв»

4.8 Результаты разработки магнитной системы магнитной передачи для скважинного винтового насоса

Скважинные винтовые насосы имеют низкую частоту вращения на уровне 200 – 300 об/мин. Традиционно для привода такого насоса применяются вентильные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов. Основная

особенность таких систем состоит в малом внешнем диаметре магнитной системы, который ограничен диаметром трубы 120 мм. В связи с этим для достижения необходимой мощности системы прямого привода могут достигать длины более десяти метров. Применение системы с зубчатым редуктором нежелательно в связи с повышенными динамическими нагрузками, за счёт чего повышается вероятность отказа всей системы, что влечёт за собой длительный простой насосной установки.

Основные технические требования к магнитной передаче для скважинного винтового насоса приведены в таблице 6. Проектирование магнитной системы было выполнено с использованием разработанной в данной диссертации методике. Эскиз разработанной конструкции магнитной системы приведён в приложении Г.

Таблица 6 – Требуемые параметры магнитного редуктора скважинного винтового насоса

Внешний диаметр магнитной системы	80 мм
Немагнитный зазор	Не менее 0,6 мм
Передаточное отношение	в диапазоне от 9 до 11
Материал магнитопроводов	Сталь 2412
Материал постоянных магнитов	Sm_2Co_{17}
Рабочая температура	200℃
Номинальная частота вращения	3000 об/мин
Коэффициент теплоотдачи с поверхности статора	0,037 кВт/м^{2}К
Люфт подшипников	0,1 мм

Требуемое передаточное отношение в заданном диаметре магнитной системы возможно обеспечить только, используя малое полюсное деление статора (около 5 мм), что приводит к увеличению полей рассеяния во внешнем немагнитном зазоре магнитной передачи и, как следствие, неэффективному использованию материала постоянных магнитов. Это вызвало необходимость отказаться от традиционной схемы расположения постоянных магнитов на статоре и перехода к схеме с однонаправленной намагниченностью постоянных магнитов [142]. При такой схеме используется зубчатый статор, в пазах которого располагаются постоянные магниты с радиальным направлением

намагниченности. Магнитный редуктор предполагается быть маслонаполненным. Для защиты постоянных магнитов от выкрашивания в немагнитный зазор вследствие воздействия агрессивной окружающей среды внутренние постоянные магниты выполнены интегрированными в ротор. Выполнить постоянные магниты статора по такой же схеме нельзя, так как из-за малости полюсного деления магнитный поток от них шунтируется. По этой причине они закрыты пластинами из немагнитной нержавеющей стали.

Низкоскоростной ротор (модулятор) для обеспечения прочности выполнен из тонколистовой электротехнической стали. Для обеспечения его прочности со стороны внутреннего немагнитного зазора выполнены перемычки. Промежутки между сегментами модулятора для большей жёсткости конструкции заполнены латунью с отверстиями под шпильки для стягивания пакета шихтовки.

Основные результаты расчётов магнитной системы магнитного редуктора для скважинного винтового насоса представлены на рисунке 79 и в таблице 7.

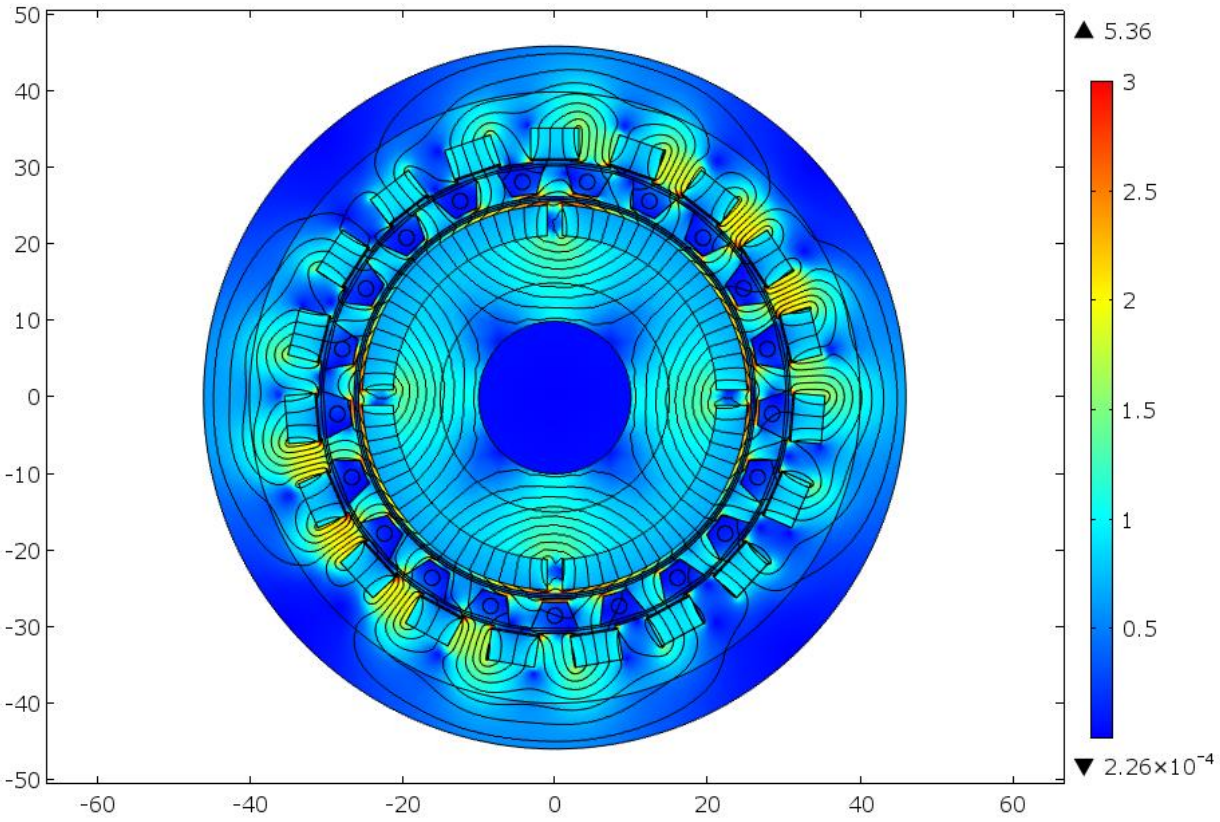


Рисунок 79 – Магнитная индукция (Т) и силовые линии магнитного поля

Таблица 7 – Основные результаты расчётов

Активная аксиальная длина	4,3 м
Масса постоянных магнитов	37 кг
Магнитные потери при 3000 об/мин	718 Вт
КПД при 3000 об/мин	87%
Максимальная плотность момента	36 кН·м/м^3
Рабочая температура	264℃
Радиальная сила тяжения	1700 Н
Передаточное отношение	10,5

Важно отметить, что при проектировании данного магнитного редуктора было просчитано несколько вариантов магнитной системы, с учётом различных конструктивных особенностей. При заданных размерах максимальная плотность момента достигала 60 кН·м/м^3, однако при введении всех конструктивных допущений плотность момента значительно снизилась и в окончательном варианте магнитной системы составила 36 кН·м/м^3. Плотность момента для двигателя, применяемого в системе прямого привода, находится на уровне 10 кНм/м^3, поэтому применение разработанного магнитного редуктора обеспечивает снижение длины и массы насосной установки. При проектировании выявлены основные технологические сложности, связанные с:

1. изготовлением низкоскоростного ротора (модулятора). Это связано с тем, что необходимо обеспечить одновременно его высокую механическую прочность, высокие магнитные свойства и малую электропроводность;
2. необходимостью изоляции постоянных магнитов от немагнитного зазора с целью обеспечения надёжности работы устройства;
3. необходимостью обеспечения минимально возможного люфта в подшипниках, что связано с концентричным расположением вращающихся частей;
4. необходимостью обеспечить малый немагнитный зазор, для обеспечения максимальной плотности момента и технической эффективности.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

1. На основании полученных расчётных данных разработаны конструктивные решения, применённые в экспериментальном образце магнитной передачи.

2. Разработана методика проведения экспериментальных исследований магнитной передачи, на основании которой проведён ряд измерений, подтвердивших как данные проведённых теоретических исследований, так и работоспособность экспериментального образца магнитной передачи в качестве преобразователя параметров механической энергии.

3. Полученные результаты по определению потерь мощности показали, что помимо магнитных потерь в магнитной системе, значительную часть общих потерь мощности составляют механические потери в подшипниках, вызванные повышенной нагрузкой на них в результате наличия нескомпенсированных радиальных электромагнитных усилий, а также магнитные потери в элементах конструкции, вызванные выраженными краевыми эффектами.

4. Экспериментально получено, что плотность момента исследуемого варианта магнитной передачи составляет 47,7 кН·м/м^3, что значительно больше чем аналогичная величина для синхронной электрической машины с возбуждением от постоянных магнитов и естественным воздушным охлаждением.

5. Разработаны конструктивные технические решения для прототипа магнитной передачи для привода скважинного винтового насоса, позволяющие обеспечить его надёжную работу и снизить массу насосной установки в целом.

6. Показано, что коаксиальная планетарная магнитная передача принципиально позволяет получать плотность момента в несколько раз больше чем у электродвигателя, совместно с которым она работает, что определяет эффективность её применения в электромеханических системах. Однако полученный опыт проектирования таких устройств свидетельствуют о том, что максимальная теоретически возможная плотность момента магнитной передачи не может быть обеспечена из-за существующих технологических ограничений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований получен ряд научных и практических результатов, позволяющих осуществлять проектирование бесконтактных магнитных передач для их внедрения в промышленность. Основные выводы и результаты работы:

1. разработаны математические модели и методика анализа магнитной передачи, которые, в отличие от известных, позволяют осуществлять моделирование как электромагнитных, так и динамических механических процессов;

2. определены требования к конструктивному исполнению магнитных передач и предложены технические решения для достижения высоких значений КПД;

3. разработана методика экспериментальных лабораторных исследований магнитной передачи;

4. получены экспериментальные данные, подтверждающие достоверность данных расчётов по разработанным моделям и обоснованность принятых конструктивных решений;

5. созданные в результате выполнения диссертационной работы математические модели и методики, подтверждённые экспериментальными исследованиями, составили методическую базу для проектирования промышленных магнитных передач, в том числе магнитного редуктора для скважинного винтового насоса, внедрённого в ООО «Производственная компания «Борец»;

6. получены оценки предельных удельных технических параметров магнитных передач;

7. создан необходимый практический задел конструкторско-технологических решений для дальнейших разработок, реализованный в экспериментальном образце магнитной передачи.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

$\mathbf{A}$ — векторный магнитный потенциал, Вб/м;

$\mathbf{A}_1$, $\mathbf{A}_2$ — векторные магнитные потенциалы на границе смежных областей 1 и 2, Вб/м;

$\mathbf{A}_{вн}$ — векторный магнитный потенциал на внешней границе расчётной области, Вб/м;

$C_м$ — механическая ёмкость, представляющая упругую связь, рад/Н·м;

$\mathbf{f}$ — вектор плотности силы, Н/м^2;

F — сила, Н;

f — частота перемагничивания, Гц;

$f_с$ — основная гармоника перемагничивания статора, Гц;

$f_{св}$ — частота собственных колебаний, Гц;

$f_в$ — основная частота перемагничивания высокоскоростного ротора, Гц;

$f_н$ — основная частота перемагничивания низкоскоростного ротора, Гц;

$f_р$ — частота основной гармоники реактивной силы, Гц;

$\mathbf{H}$, H — вектор напряжённости магнитного поля и его модуль, А/м;

i — передаточное отношение;

$i_Т$ — передаточное отношение по моменту;

i_φ — передаточное отношение по углу поворота;

J — момент инерции, кг·м^2;

$J'_в$ — приведённый момент инерции высокоскоростного ротора, кг·м^2;

$J_в$ — момент инерции высокоскоростного ротора, кг·м^2;

$J_м$ — момент инерции маховика, кг·м^2;

$J_н$ — момент инерции низкоскоростного ротора, кг·м^2;

$J_п$ — суммарных приведённый момент инерции роторов магнитной передачи, кг·м^2;

K — поправочный коэффициент потерь;

$k'_{1\,в}$ — приведённый коэффициент диссипации мощности за счёт гистерезиса для высокоскоростного ротора, Н·м;

$k_{1\,в}$ — коэффициент диссипации мощности за счёт гистерезиса для высокоскоростного ротора, Н·м;

$k_{1\,н}$ — коэффициент диссипации мощности за счёт гистерезиса для низкоскоростного ротора, Н·м;

$k_{нагр}$ — коэффициент трения нагрузки;

k_1 — обобщённый коэффициент диссипации мощности за счёт гистерезиса, Н·м;

k_2 — обобщённый коэффициент диссипации мощности за счёт индуцированных токов, Н·м·с/рад;

$k_{2\,в}$ — коэффициент диссипации мощности за счёт индуцированных токов для высокоскоростного ротора, Н·м·с/рад;

$k'_{2\,в}$ — приведённый коэффициент диссипации мощности за счёт индуцированных токов для высокоскоростного ротора, Н·м·с/рад;

$k_{2\,н}$ — коэффициент диссипации мощности за счёт индуцированных токов для низкоскоростного ротора, Н·м·с/рад;

$k_у$ — коэффициент упругости, Н·м/рад;

$\mathbf{M}$ — вектор намагниченности, А/м;

$m_г$ — масса груза, кг;

$m_{мп}$ — масса магнитопровода, кг;

$\mathbf{n}$ — вектор нормали;

$N_в$ — число волн (роликов на высокоскоростном роторе);

$n_в$ — частота вращения высокоскоростного ротора, об/мин;

$n_{внеш}$ — частота вращения внешнего магнитного колеса, об/мин;

$n_{внутр}$ — частота вращения внутреннего магнитного колеса, об/мин;

$n_{вод}$ — частота вращения водила, об/мин;

$N_{в\text{-}с}$ — число периодов реактивного момента, за полный оборот высокоскоростного ротора за счёт его взаимодействия со статором;

$n_к$ — частота вращения коронной магнитной шестерни, об/мин;

$n_н$ — частота вращения низкоскоростного ротора, об/мин;

$N_{н\text{-}в}$ — число периодов реактивного момента, за полный оборот высокоскоростного ротора за счёт его взаимодействия с низкоскоростным ротором;

$N_{н\text{-}с}$ — число периодов реактивного момента, за полный оборот высокоскоростного ротора за счёт взаимодействия низкоскоростного ротора и статора;

$n_{пр}$ — частота вращения промежуточного магнитного колеса, об/мин;

$N_с$ — число сегментов в промежуточном магнитном колесе (низкоскоростном роторе);

$n_{сол}$ — частота вращения солнечной магнитной шестерни, об/мин;

P_Σ — суммарные магнитные потери мощности, Вт;

$p_{1,0/50}$ — удельные магнитные потери при магнитной индукции 1 Т и частоте 50 Гц, Вт/кг;

P_2 — потери мощности, пропорциональные второй степени скорости, Вт;

$p_с$ — число пар полюсов на статоре;

$p_{сат}$ — число пар полюсов на сателлите;

$p_в$ — число пар полюсов на высокоскоростном магнитном колесе (роторе);

$p_{внеш}$ — число пар полюсов внешнего магнитного колеса;

$p_{внутр}$ — число пар полюсов внутреннего магнитного колеса;

$P_г$ — потери на гистерезис, Вт;

$P_и$ — потери на индуцированные токи, Вт;

$p_к$ — число пар полюсов на коронной магнитной шестерне;

$P_н$ — мощность нагрузки, Вт;

$p_н$ — число пар полюсов на низкоскоростном магнитном колесе (роторе);

$P_п$ — мощность потерь, Вт;

$p_{сол}$ — число пар полюсов на солнечной магнитной шестерне;

$F_{тр\ ср}$ — среднее значение силы трогания, кг;

$R_н$ — активное сопротивление нагрузки, Ом;

$R_{шк}$ — радиус шкива, м;

$S_г$ — произвольная замкнутая поверхность, ограничивающая элемент на который производится расчёт электромагнитного момента, м^2;

$\mathbf{T}$, T — вектор электромагнитного момента и его модуль, Н/м;

$T'_в$ — приведённый электромагнитный момент высокоскоростного ротора, Н·м;

$T_в$ — электромагнитный момент высокоскоростного ротора, Н·м;

$T_{в\ max}$ — макс. электромагнитный момент высокоскоростного ротора, Н·м;
$T_{н}$ — электромагнитный момент низкоскоростного ротора, Н·м;
$T_{н\ max}$ — макс. электромагнитный момент низкоскоростного ротора, Н·м;
$T_{нагр}$ — момент нагрузки, Н·м;
$T_{п}$ — момент потерь, Н·м;
$T_{п\ в}$ — момент потерь, действующий на высокоскоростной ротор, Н·м;
$T_{п\ н}$ — момент потерь, действующий на низкоскоростной ротор, Н·м;
$T_{пр}$ — момент привода, Н·м;
$T_{р}$ — рабочий момент, Н·м;
$T_{р\ в\ max}$ — амплитуда реактивного момента на высокоскоростном роторе, Н·м;
$T_{р\ н\ max}$ — амплитуда реактивного момента на низкоскоростном роторе, Н·м;
$T_{тр}$ — момент трогания, Н·м;
V_{m} — скалярный магнитный потенциал, А;
$V_{m\ 1}$, $V_{m\ 2}$ — скалярные магнитные потенциалы на границе смежных областей 1 и 2, А;
$V_{m\ вн}$ — скалярный магнитный потенциал на вешней границе расчётной области, А;
α — логарифмический коэффициент затухания колебаний, Гц;
β — коэффициент, учитывающий зависимость потерь от частоты;
γ — линейный коэффициент затухания колебаний, рад;
η — КПД;
Θ — угол нагрузки, град.;
$\Theta_{р}$ — рабочий угол нагрузки, град.;
σ — удельная электропроводность, См/м;
$\varphi_{в}$ — угол поворота высокоскоростного ротора, град;
$\varphi_{н}$ — угол поворота низкоскоростного ротора, град;
$\varphi_{п\ в}$ — электрический угол поворота рабочей гармоники магнитного поля, возбуждаемого высокоскоростным ротором, рад;
$\varphi_{п\ н}$ — электрический угол поворота рабочей гармоники магнитного поля, возбуждаемого системой статор модулятор, рад;
$\varphi_{р\ в}$ — угловой период основной гармоники реактивного момента относительно высокоскоростного ротора, град;
$\varphi_{р\ н}$ — угловой период основной гармоники реактивного момента относительно низкоскоростного ротора, град;
ω — угловая скорость, рад/с;
$\omega'_{в}$ — приведённая угловая скорость высокоскоростного ротора, рад/с;
$\omega_{в}$ — угловая скорость высокоскоростного ротора, рад/с;
$\omega_{в\ max}$ — амплитуда свободной составляющей пульсаций угловой скорости на высокоскоростном роторе, рад/с;
$\omega_{н\ max}$ — амплитуда свободной составляющей пульсаций угловой скорости на низкоскоростном роторе, рад/с;
$\omega_{н}$ — угловая скорость низкоскоростного ротора, рад/с;
$A_{р}$ — работа реактивного момента его полупериоде, Дж;
НОД — наибольший общий делитель;
НОК — наименьшее общее кратное.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копылов, И. П. Проектирование электрических машин : учеб. для вузов / И. П. Копылов, Б. К. Клоков, В. П. Морозкин, Б. Ф. Токарев ; под ред. И. П Копылова. — 4-е изд., перераб. и доп. — М. : Высшая школа, 2005. — 767 с.

2. Свечарник, Д. В. Электрические машины непосредственного привода: Безредукторный электропривод / Д. В. Свечарник. — М. : Энергоатомиздат, 1988. — 208 с.

3. Hau, E. Wind turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics / E. Hau. — London : Springer, 2012. — 879 с.

4. Gouda, E. Comparative Study Between Mechanical and Magnetic Planetary Gears / E. Gouda, S. Mezani, L. Baghli, A. Rezzoug // IEEE Transactions on Magnetics. — 2011. — Т. 47, № 2. — С. 439.

5. Тягунов, М. Г. Развитие энергетики возобновляемых источников на основе типовых гибридных комплексов в распределенных энергосистемах / М. Г Тягунов // Инноватика и экспертиза. — 2012. — № 2. — С. 91.

6. Ныркoвский, В. И. Перспективы развития ветроэнергетического машиностроения в России / В. И. Ныркoвский, А. В. Кулаков // Энергетик. — 2015. — Т. 2. — С. 16.

7. Понкратьев, П. А. Современное состояние, потенциал и перспективы развития ветроэнергетики в России / П. А. Понкратьев // Экспертная встреча «Дорожные карты развития и внедрения технологий использования ВИЭ: состояние дел в России и мире». — М. : ИНТЕРРАО, 2011.

8. Hau, E. WEGA: Large Wind Turbines / E. Hau, J. Langenbrinck, P. Wolfgang // New York : Springer-Verlag Berlin Heidelberg. — 1993. — 143 с.

9. Power transmitting device : пат. US687292 США / Armstrong C. G. — заявл. 06.09.1900. — 3 с. : ил.

10. Ганзбург, Л. Б. Проектирование электромагнитных и магнитных механизмов : справочник / А. И. Федотов, Л. Б. Ганзбург. — Ленинград : Машиностроение, 1980. — 364 с.

11. Ганзбург, Л. Б. Механизмы с магнитной связью / Л. Б. Ганзбург, Н. П. Глуханов, Е. Д. Рейфе. А. И. Федотов. — М. : Машиностроение, 1973. — 272 с.

12. Рейфе, Е. Д. Исследование магнитных и электромагнитных редукторов : автореф. дис. … канд. тех. наук : 05.02.03 / Рейфе Евгений Давидович. — Ленинград, 1973. — 15 с.

13. Вейц, В. Л. Бесконтактные магнитные зубчатые редукторы : монография / В. Л. Вейц, Л. Б. Ганзбург, В. М. Петров. — СПб : Изд-во СПбГПУ, 2004. — 291 с.

14. Rens, J. A novel high-performance magnetic gear / J. Rens, K. Atallah, D. Howe, S. Calverley // IEEE Transactions on Magnetics. — 2001. — Т. 37, № 4. — С. 2844.

15. Magnomatics Limited [Электронный ресурс]. — Режим доступа: www.magnomatics.com.

16. Дильс, Г. Античная техника / Г. Дильс; пер. и примеч. М. Е. Сергеенко и П. П. Забаринского ; под ред. и с предисл. С. И. Ковалёва. — М.–Л. : ОНТИ Гос. техн.-теор. изд-во, 1934. — 217 с.

17. Бабичев, Д. Т. История развития теории зубчатых передач / Д. Т. Бабичев, А. Э. Волков // Вестник научно-технического развития. — 2015. — Т. 5, № 93. — С. 25.

18. Власенко, В. Н. Мультипликатор в современных ветроэнергетических установках / В. Н. Власенко, В. М. Фей // Вестник НТУ ХПИ. — 2008. — № 28. — С. 99.

19. Механизм для передачи вращательного движения с изменением скорости вращения : пат. 153633 СССР : МПК[7] F 06 h / Ганзбург Л. Б. — заявл. 06.10.1961. — 2 с. : ил.

20. Передачи зубчатые. Общие термины, определения и обозначения : ГОСТ 16530–83 ; введ. 01.01.1984. — 27 с.

21. Rasmussen, P. O. Development of a high performance magnetic gear / P. O. Rasmussen, T. O. Andersen, F. T. Jorgensen, O. Nielsen // IEEE Transactions on Industry Applications. — 2003. — Т. 41, № 3. — С. 1696.

22. Jørgensen, F. T. Design and construction of permanent magnetic gears : PhD diss. / Frank Thorleif Jørgensen. — Дания : UNI.PRINT. Aalborg University. — 2010. — 127 с.

23. Nakamura, K. Performance improvement of magnetic gear and efficiency comparison with conventional mechanical gear / K. Nakamura, M. Fukuoka, O. Ichinokura // Journal of Applied Physics. — 2014. — Т. 115, № 17. — 3 с.

24. Torque Density of PM motors Developed under Government Programs [Электронный ресурс] : отчёт о НИР : Report 06–08 / Precision Magnetics Inc. ; Dantam K. R. — 2008. — 7 с. — Режим доступа: https://ru.scribd.com/document/87569175/Torque-Density-of-PM-Motors.

25. A new PM Machine topology for low-speed, high-torque drives / K. Atallah [и др.] // Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines. — 2008. — 4 с.

26. Electromagnetic gearing : пат. 750009 США / Thordon E. — заявл. 06.02.1903. — 6 с. : ил.

27. Transmission mechanism : пат. 2167641 США / Dewan L — заявл. 22.10.1937. — 2 с. : ил.

28. Permanent magnet device for generating electrical energy : пат. 3273001 США / Baermann M. — заявл. 01.06.1965. — 4 с. : ил.

29. Магнитная передача : пат. 665157 СССР : МПК[7] F 16H 1/06 / Федотов А. И. [и др.]. — заявл. 10.05.1977. — 2 с. : ил.

30. Магнитная передача : пат. 459627 СССР : МПК[7] F 16H 1/02 / Бансевичус Р. Ю., Рагульскис К. М., Якубаускас А. К. — заявл. 12.06.1972. — 1 с. : ил.

31. Magnet gearing : пат. 2243555 США / Faus H. T. — заявл. 21.08.1940. — 3 с. : ил.

32. Magnetic gearing system : пат. 2548373 США / Hurvitz H. — заявл. 15.11.1948. — 2 с. : ил.

33. Magnetic circuits and devices : пат. 2722617 США / Cluwen J. M. — заявл. 19.11.1952. — 7 с. : ил.

34. Magnetic Transmission : пат. 3523204 США / Rand S. — заявл. 19.01.1968. — 4 с. : ил.

35. Лобовая магнитная передача : пат. 1260599 СССР : МПК[7] F 16H 1/06 / Киясбейли А. Ш. [и др.]. — заявл. 09.10.1984. — 2 с. : ил.

36. Low friction miniature gear drive for transmitting small forces, and method of making same : пат. 3792578 США / Hetzel M. B. — заявл. 10.01.1973. — 3 с. : ил.

37. Tsurumoto, K. A new magnetic gear using permanent magnet / K. Tsurumoto, S. Kikuchi // IEEE Transactions on Magnetics. — 1987. — Т. 23, № 5. — С. 3622.

38. Magnetic coupling studies between radial magnetic gears / Y. D. Yao [и др.] // IEEE Transactions on Magnetics. — 1997. — Т. 33, № 5. — С. 4236.

39. The radial magnetic coupling studies of perpendicular magnetic gears / Y. D. Yao [и др.] // IEEE Transactions on Magnetics. — 1996. — Т. 32, № 5. — С. 5061.

40. Левитан, Ю. В. Червячные редукторы : спарвочник / Ю. В. Левитан, В. П. Обморнов, В. И. Васильев / Л. : Машиностроение, Ленигр. отд-ение, 1985. — 168 с.

41. Improvements in Worm Gearing : пат. 15780 США / Lecoche J. — заявл. 15.12.1906. — 6 с. : ил.

42. Magnetic gearing : пат. 1337732 США / Stoller H. M. — заявл. 07.11.1916. — 5 с. : ил.

43. Червячная электромагнитная передача : пат. 132015 СССР / Кощеев Л. Г. — заявл. 24.09.1959. — 2 с. : ил.

44. Бесконтактная магнитная червячная передача : пат. 677049 СССР : МПК[7] H 02 K 49/10 / Свечарник Д. В. — заявл. 16.05.1977. — 3 с. : ил.

45. Kikuchi, S. Design and characteristics of a new magnetic worm gear using permanent magnet / S. Kikuchi, K. Tsurumoto // IEEE Transactions on Magnetics. — 1993. — Т. 25, № 6. — С. 2923.

46. Pakdelian, S. Principles of the Trans-Rotary Magnetic Gear / S. Pakdelian, N. W. Frank, H. A. Toliyat // IEEE Transactions on Magnetics. — 2013. — Т. 49, № 2. — С. 883.

47. Heikkinen, J. E. Rotordynamics of a Trans-Rotary Magnetic Gear Rotor / J. E. Heikkinen, S. Pakdelian // Proceedings of the International Mechanical Engineering Congress and Exposition. — 2013. — Paper № IMECE2013–63813.

48. Willis, R. Principles of Mechanism / R. Willis. — London: John W. Parker, West Strand. — 1841. — 450 с.

49. Magnetic transmission: пат. 5013949 США : МПК[7] H02K 49/10 / Mabe W. J. — заявл. 25.06.1990. — 15 с. : ил.

50. Магнитный планетарный редуктор : пат. 114117 Российская Федерация : МПК[7] F16H 1/32, F16H 57/02 / Осетров В. Г., Семаков К. Н. ; заявитель и патентообладатель Ижевский государственный технический университет. — заявл. 03.11.2011.

51. Development of a Magnetic Planetary Gearbox / D. G. Dorrell [и др.] // IEEE Transactions on Magnetics. — 2008. — Т. 44, № 3. — С. 403.

52. Niguchi, N Transmission Torque Analysis of a Novel Magnetic Planetary Gear Employing 3-D FEM / N. Niguchi, K. Hirata // IEEE Transactions on Magnetics. — 2012. — Т. 48, № 2. — С. 1043.

53. Magnetic gear : пат. 2010/0207472 A1 США : МПК[7] H 02 K 49/10 / Atallah K. ; Magnomatics Limited. — заявл. 11.05.2007.

54. Jørgensen, F. T. The cycloid permanent magnetic gear / F. T. Jørgensen, T. O. Andersen, P. O. Rasmussen // IEEE Transactions on Industry Applications. — Т. 44, № 6. — С. 1659.

55. Jelaska, D. Gears and Gear Drives / D. Jelaska. — Chichester : John Wiley & Sons Ltd., 2012. — 465 с.

56. Магнитная передача : пат. 1523787 СССР : МПК[7] F 16 H 1/06 / Яковлев В. А., Герасимов А. Ф. — заявл. 09.03.1988. — 3 с. : ил.

57. A Novel Magnetic Harmonic Gear / J. Rens [и др.] // Proceedings of Electric Machines & Drives Conference. — 2007. — С. 698.

58. A Novel Magnetic Harmonic Gear / J. Rens [и др.] // IEEE Transactions on Industry Applications. — 2010. — Т. 46, № 1. — С. 206.

59. Chicurel-Uziel, R. Cycloidal Magnetic Gear Speed Reducer / R. Chicurel-Uziel // Modern Mechanical Engineering. — 2013. — №3. — с. 147.

60. Pérez, L. Diseño y construcción de un reductor de velocidad cicloidal magnético balanceado : магистерская диссертация / Luis Alberto Vázquez Pérez. — Мехико, 2013. — 54 с.

61. Optimum design for improving modulating-effect of coaxial magnetic gear using response surface methodology and genetic algorithm / L. Jian [и др.] // Progress In Electromagnetics Research. — 2011. — Т. 116. — С. 297.

62. Magnetic transmission : пат. 3378710 США / Martin T. B. — заявл. 01.06.1964.

63. Appsratus for transmitting power : пат. 1171351 США / Neuland A. H. — заявл. 22.03.1913.

64. Magnetic transmission : пат. 3645650 США / Laing L. — заявл. 09.02.1970.

65. Vernier motor : пат. 1894979 США / Chubb L. W. — заявл. 26.07.1931

66. Брокгауз, Ф. А. Энциклопедический словарь. Т. 6 / под ред. проф. И. Е. Андреевского. — СПб : Ф. А. Брокгауз, И. А. Ефрон, 1890 – 1907. — 24 см.

67. Vernier Motor : пат. 2066965 США / Dicke, O. H. — заявл. 23.05.1929.

68. Magnetic Gearing Arrangement : пат. 3301091 США / Reese G. A. — заявл. 05.07.1963.

69. Магнитная передача : пат. 280142 СССР / Бансевичус Р. Ю. — заявл. 12.05.1968.

70. Бесконтактная магнитная муфта редуктор : пат. 268811 СССР : МПК[7] F 16 D / Борисов Л. А., Периков Л. М., Яропольский В. В. — заявл. 29.11.1968.

71. Magnetic gears : пат. US3382386 США / Schlaeppi H. P. — заявл. 23.12.1964.

72. Магнитный редуктор : пат. 699621 СССР : МПК[7] H 02 K 49/10 / Ганзбург Л. Б. [и др.]. — заявл. 01.06.1978.

73. Редуктор элетромагнитный : пат. 2529422 Российская Федерация : МПК[7] H 02 K 49/10 / Афанасьев А. А., Чихняев В. А. ; заявитель и патентообладатель Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова. — заявл. 29.05.2013.

74. Бесконтактная магнитная муфта-редуктор : пат. 544070 СССР : МПК[7] H 02 K 49/10 / Абрамцев Е. П. — заявл. 09.06.1975.

75. Магнитная муфта-редуктор : пат. 1113869 СССР : МПК[7] H 02 K 49/10 / Антонова Г. К., Ивашов Е. Н., Некрасов М. И. — заявл. 01.07.1983.

76. Магнитная муфта-редуктор : пат. 1449737 СССР : МПК[7] F 16 D 27/01 / Яковлев В. А., Герасимов А. Ф. — заявл. 19.05.1987.

77. Магнитная передача : пат. 1429245 СССР : МПК[7] H 02 K 49/10 / Яковлев В. А., Герасимов А. Ф. — заявл. 23.03.1987.

78. Магнитный редуктор : пат. 2369955 Российская Федерация : МПК[7] H 02 K 51/10 / Афанасьев А. Ю., Давыдов Н. В. ; заявитель и патентообладатель Казанский государственный технический университет им. А. Н. Туполева. — заявл. 11.04.2008.

79. Магнитный редуктор : пат. 2545166 Российская Федерация : МПК[7] H 02 K 51/10 / Афанасьев А. Ю., Давыдов Н. В., Ефремов Д. О. ; заявитель и патентообладатель Казанский государственный технический университет им. А. Н. Туполева. — заявл. 20.08.2013.

80. Atallah, K. Design, analysis and realisation of a high-performance magnetic gear / K. Atallah, S. Calverley, D. Howe // IEE Proceedings of Electric Power Applications. — 2006. — С. 135.

81. Performance of a magnetic gear using ferrite magnets for low speed ocean power generation / Jonathan Bird [и др.] // Proceedings of IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). — 2012. — С. 3348.

82. Analysis and Design Optimization of a Coaxial Surface-Mounted Permanent-Magnet Magnetic Gear / Zhang X. [и др.] // Energies. — 2014. — № 7. — С. 8535.

83. A magnetic gearbox with an active region torque density of 239Nm/L / Jonathan Bird [и др.] // Proceedings of IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). — 2014. — С. 1422.

84. Torque Ripple Reduction of Radial Magnetic Gearbox Using Axial Pole Pairing / H. Zaytoon [и др.] // Proceedings of 7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2014). — 2014. — С. 1.

85. Torque ripple alleviation of a radial magnetic gearbox using step skewing approach / H. Zaytoon // Proceedings of 2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM). — 2014. — С. 648.

86. Frank, N. W. Gearing ratios of a magnetic gear for wind turbines / N. W. Frank, H. A. Toliyat // Proceedings of 2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference. — 2009. — С. 1224.

87. Eddy current analysis of magnetic gear employing 3-D FEM / N. Niguchi [и др.] // Digests of the 2010 14th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation. — 2010. — С. 1.

88. Bird, J. Z. An Iterative Magnetomechanical Deflection Model for a Magnetic Gear / K. K. Uppalapati, J. Z Bird // IEEE Transactions on Magnetics. — 2014. — Т. 50, № 2. — С. 245.

89. Analysis of the Harmonic Response of a Modulation Permanent Magnetic Transmission Equipment Based on ANSYS / Z. Zeng [и др.]. — Energy and Power Engineering. — Т. 07, № 3. — С. 63.

90. Frank, N. W. Analysis of the Concentric Planetary Magnetic Gear With Strengthened Stator and Interior Permanent Magnet Inner Rotor / N. W. Frank, H. A. Toliyat // IEEE Transactions on Industry Appl. — 2011. — Т. 47, № 4. — 1652.

91. Gerber, S. Evaluation of a prototype magnetic gear // Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). — 2013. — С. 319.

92. Design and transient behavior of magnetic gears / P. Zheng [и др.] // Journal of Applied Physics. — 2014. — № 115. — С. 17E706.

93. A New Coaxial Magnetic Gear Using Stationary Permanent Magnet Ring / K. Tsurumoto [и др.] // IEEE Transactions on Magnetics. — 2013. — Т. 23, № 5. — С. 3622.

94. Niguchi, N Electromagnetic Vibration Analysis and Measurement of a Magnetic Gear / N. Niguchi, K. Hirata, A. Zaini // IEEJ Journal of Industry Application. — 2013. — Т. 2, № 6. — С. 261.

95. Surface Magnet Gears with a New Magnet Arrangement and Optimal Shape of Stationary Pole Pieces / T. Fujita // Journal of Electromagnetic Analysis and Applications. — 2013. — № 5. — С. 243.

96. Evans, D. J. Influence of design parameters on magnetic gear’s torque capability / D. J. Evans, Z. Q. Zhu // Proceedings of 2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). — 2011. — С. 1403.

97. Design optimization of magnetic gears using mesh adjustable finite-element algorithm for improved torque / S. Niu [и др.] // IEEE Transactions on Magnetics. — 2012. — Т. 48, № 11. — С. 4156.

98. Fukuoka, M. A method for optimizing the design of SPM type magnetic gear based on reluctance network analysis / M. Fukuoka, K. Nakamura, O. Ichinokura // Proceedings of 2012 20th International Conference on Electrical Machines). — 2012. — С. 30.

99. Jian, L. A coaxial magnetic gear with halbach permanent-magnet arrays / L. Jian, K. Chau // IEEE Transactions on Energy Conversion. — 2010. — Т. 21, № 2 — С. 319.

100. Study on Improvement of Transmission Torque for a Surface Permanent Magnet Type Magnetic Gear / M. Oka [и др.] // Materials Science Forum. — 2012. — Т. 721. — С. 237.

101. An improved coaxial magnetic gear using flux focusing / X. Li [и др.] // Proceedings of International Conference on Electrical Machines and Systems. — 2011. — С. 2.

102. Slip investigation and magnetic redesign of motor integrated permanent magnet gear / T. V Frandsen [и др.] // Proceedings of 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). — 2015. — С. 929.

103. Ганзбург, Л. Б. Бесконтактные магнитные маханизмы / Л. Б. Ганзбург, В. Л. Вейц. — Л. : Изд-во ЛГУ, 1985. — 151 с.

104. Ge, Y. A three dimensional analytical calculation of the airgap magnetic field and torque of coaxial magnetic gears / Y. J. Ge, C. Y. Nie, Q. Xin // Progress In Electromagnetics Research. — 2012. — Т. 131. — С. 391.

105. Курбатов, П. А. Численный расчёт электромагнитных полей / П. А. Курбатов, С. А. Аринчин. — М. : Энергоатомиздат, 1984. — 167 с.

106. Design and analysis of interior-magnet outer-rotor concentric magnetic gears / X. Liu [и др.] // Journal of Applied Physics. — 2009. — Т. 105, № 7. — С. 103.

107. COMSOL Inc. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: www.comsol.ru.

108. Arnold Magnetic Technologies. Neodymium-Iron-Boron Magnets [Электронный ресурс]. — Режим доступа: www.arnoldmagnetics.com/en-us/Products/Neodymium-Magnets.

109. Сталь электротехническая холоднокатаная изотропная : ГОСТ 21427.2–83 ; введ. 01.01.1984. — 15 с.

110. Молотилов, Б. В. Холоднокатаные электротехнические стали : справочник / Б. В. Молотилов, Л. В. Миронов, А. Г. Петренко ; под ред. Б. В. Молотилова. — М. : Металлургия, 1989. — 168 с.

111. Сталь сортовая электротехническая нелегированная. Технические условия : ГОСТ 11036–75 ; введ. 01.01.1977. — 9 с.

112. Höganäs [Электронный ресурс]. — Режим доступа: www.hoganas.com.

113. Pyrhönen, J. Design of Rotating Electrical Machines / J. Pyrhönen, T. Jokinen, V. Hrabovcová. — Chichester : JohnWiley & Sons Ltd, 2008. — 512 с.

114. Беспалов, В. Я. Электрические машины : учебное пособие для студентов вузов / В. Я. Беспалов, Н. Ф. Котеленец. — М. : Издательский центр «Академия», 2006. — 320 с.

115. Zhu, Z. Q. Influence of Design Parameters on Cogging Torque in Permanent Magnet Machines / Z. Q. Zhu, D. Howe // IEEE Transactions on Energy Conversion. — 2000. — Т. 15, № 4. — С. 407.

116. Arnold Magnetic Technologies. Hk: A Key Magnetic Figure of Merit [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.arnoldmagnetics.com/en-us/Tech-Library/Technical-Publications.

117. Analyses and experimental validation of coaxial magnetic planetary gear / **O. Molokanov**, P. Dergachev, V. Kiruhin, P. Kurbatov // Proceedings of 18th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA). — 2014. — С. 1.

118. Анализ двухступенчатого магнитного мультипликатора / П. А. Дергачёв, В. П. Кирюхин, Ю. В. Кулаев, П. А. Курбатов, **О. Н. Молоканов** // Электротехника. — 2012. — № 5. — С. 39.

119. Магнитная передача : пат. на полезн. модель № 122459 Российская Федерация : МПК[7] F 16 H 1/06 / Дергачёв П. А., Кирюхин В. П., Кулаев Ю. В., Курбатов П. А., **Молоканов О. Н.** ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ». — заявл. 04.07.2012.

120. Jian, L. Analytical Calculation of Magnetic Field Distribution in Coaxial Magnetic Gears / L. Jian, K.T. Chau // Progress In Electromagnetics Research. — 2009. — Т. 92. — С. 1.

121. Jiles, D. Ferromagnetic hysteresis / D. Jiles, D. Atherton // IEEE Transactions on Magnetics. — 1983. — Т. 19, № 5. — С. 2183.

122. Study on cogging torque in coaxial planetary magnetic gear / **O. Molokanov**, P. Dergachev, S. Osipkin, P. Kurbatov // Proceedings of IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conference. — 2016. — С. 1.

123. Гольдберг, О. Д. Проектирование электрических машин : учеб. для студентов вузов / О. Д. Гольдберг, И. С. Свириденко ; под ред. О. Д. Гольдберга. — Изд. 3-е, перераб. — М. : Высш. шк., 2006. — 429 с.

124. Magnetic pole-piece structure : пат. 2011/0133594 США : МПК[7] H 02 K 1/06 / Atallah K., Clark R. E., Rens J. J ; заявитель и патентообладатель Magnomatics Limited. — заявл. 12.05.2009.

125. Improved pole-piece structure : пат. WO 2013/186551: МПК[7] H 02 K 51/00 / Birchall J. G. ; заявитель и патентообладатель Magnomatics Limited. — заявл. 11.06.2012.

126. Магнитная передача : пат. на полезн. модель № 122461 Российская Федерация : МПК[7] F 16 H 1/06 / Дергачёв П. А., Кирюхин В. П., Кулаев Ю. В., Курбатов П. А., **Молоканов О. Н.** ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ». — заявл. 21.06.2012.

127. Marinucci, T. Identification of the Jiles-Atherton Parameters Using Commercial Software [Электронный ресурс] / T. Marinucci, V. Maglietta. — Режим доступа: docslide.us/documents/ieeetransmag091.html.

128. Transient analysis of coaxial magnetic gears using finite element comodeling / K. T. Chau [и др.] // Journal of Applied Physics. — 2007. — Т. 103, № 7. — С. 101.

129. Oka, M. Study on Force-Transmissibility of a Magnetic Gear by Using 3-D Boundary Element Analysis / M. Oka, T. Todaka, M. Enokizono // Material Science Forum. — 2014. — Т. 792. — С. 221.

130. Fukuoka, M. Dynamic Analysis of Planetary-Type Magnetic Gear Based on Reluctance Network Analysis / M. Fukuoka, K. Nakamura, O. Ichinokura // IEEE Transactions on Magnetics. — 2011. — Т. 47, № 10. — С. 2414.

131. Dynamic model of coaxial magnetic planetary gear / **O. Molokanov**, P. Kurbatov, P. Dergachev, A. Alami // Proceedings of 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). — 2015. — 944.

132. Дергачёв, П. А. Магнитный мультипликатор с регулируемым передаточным отношением для ветровых и малых гидравлических электростанций / П. А. Дергачёв, П. А. Курбатов, **О. Н. Молоканов** // Электротехника. —2013. — № 4. — С. 33.

133. MATLAB [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.mathworks.com.

134. Song, X. The torsional stiffness of involute spur gears / X. Song [и др.] // Proceedings of the 9th IFToMM International Conference on Rotor Dynamics. Mechanisms and Machine Science. — 2015. — Т. 21. — С. 1369.

135. Montague, R. G. Magnetic gear dynamics for servo control / R. G. Montague, C. M Bingham, K. Atallah // 2010 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference. — 2010. — С. 1192.

136. Montague, R. G. Dual-observer-based position-servo control of a magnetic gear / R. G. Montague, C. M Bingham, K. Atallah // IET Electric Power Applications. — Т. 41, № 9. — С. 708.

137. Курбатов, П. А. Математическое моделирование электромеханических систем электрических аппаратов : учебное пособие / П. А. Курбатов. — М. : Издательский дом МЭИ, 2007. — 110 с.

138. Основы теории цепей : учебник для вузов / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. — 5-е изд., перераб. — М. : Энергоатомиздат, 1989. — 527 с.

139. Liang, J. W. Identifying Coulomb and viscous friction from free-vibration decrements / J. W. Liang, B. F. Feeny // Nonlinear Dynamics. — 1998. — Т. 16, № 4. — С. 337.

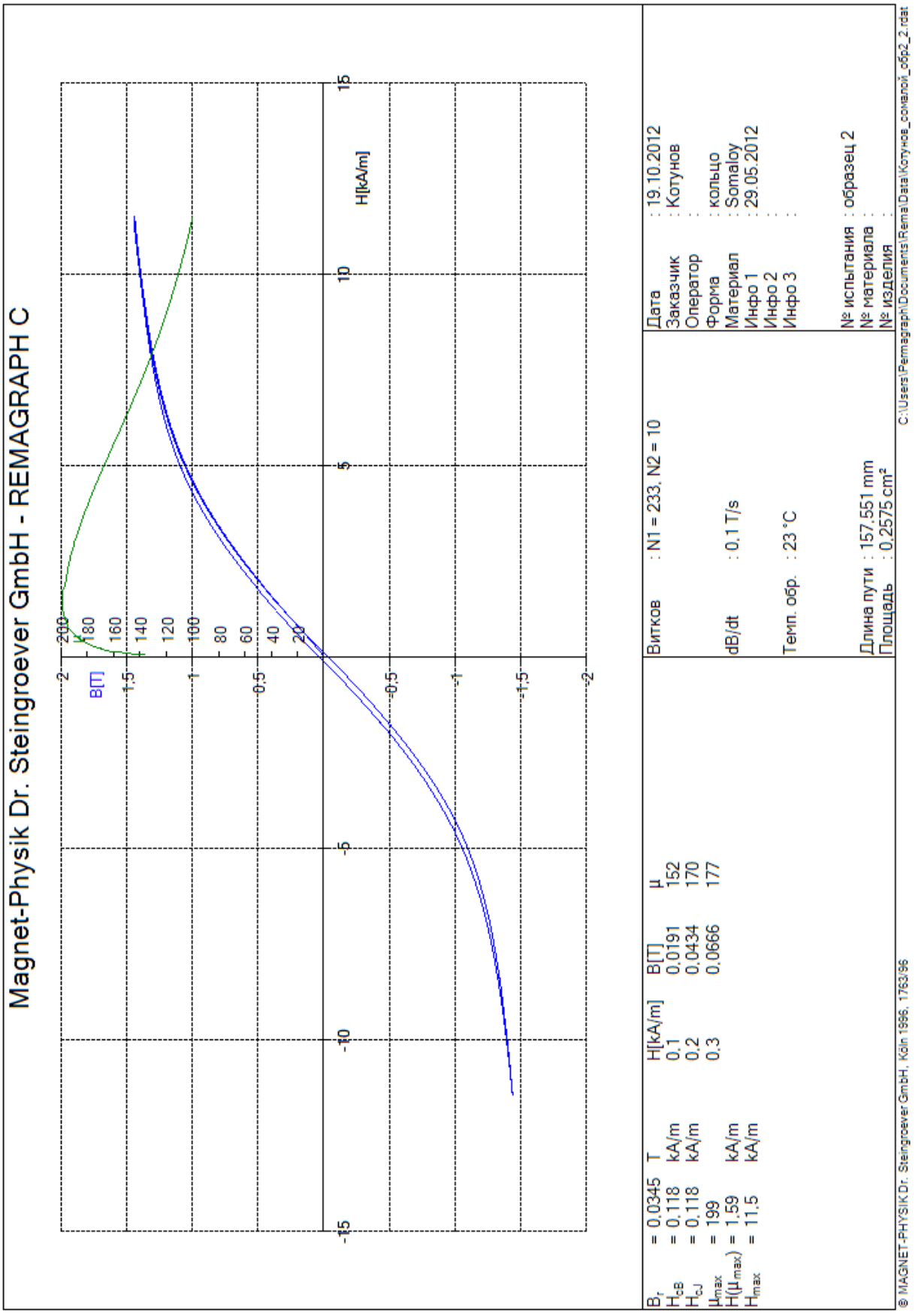
140. Бутиков, Е. И. Осциллятор с сухим и вязким трением : учебное пособие [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://butikov.faculty.ifmo.ru/Applets/manlr_2.pdf.

141. Машины электрические вращающиеся. Методы определения потерь и коэффициента полезного действия : ГОСТ 25941–83 ; введ. 01.01.1984. — 30 с.

142. Peng, S A Novel High Torque-Density Triple-Permanent-Magnet-Excited Magnetic Gear / S. Peng, W. N. Fu, S. L. Ho // IEEE Transactions on Magnetics. — 2014. — Т. 50, № 11. — С. 1.

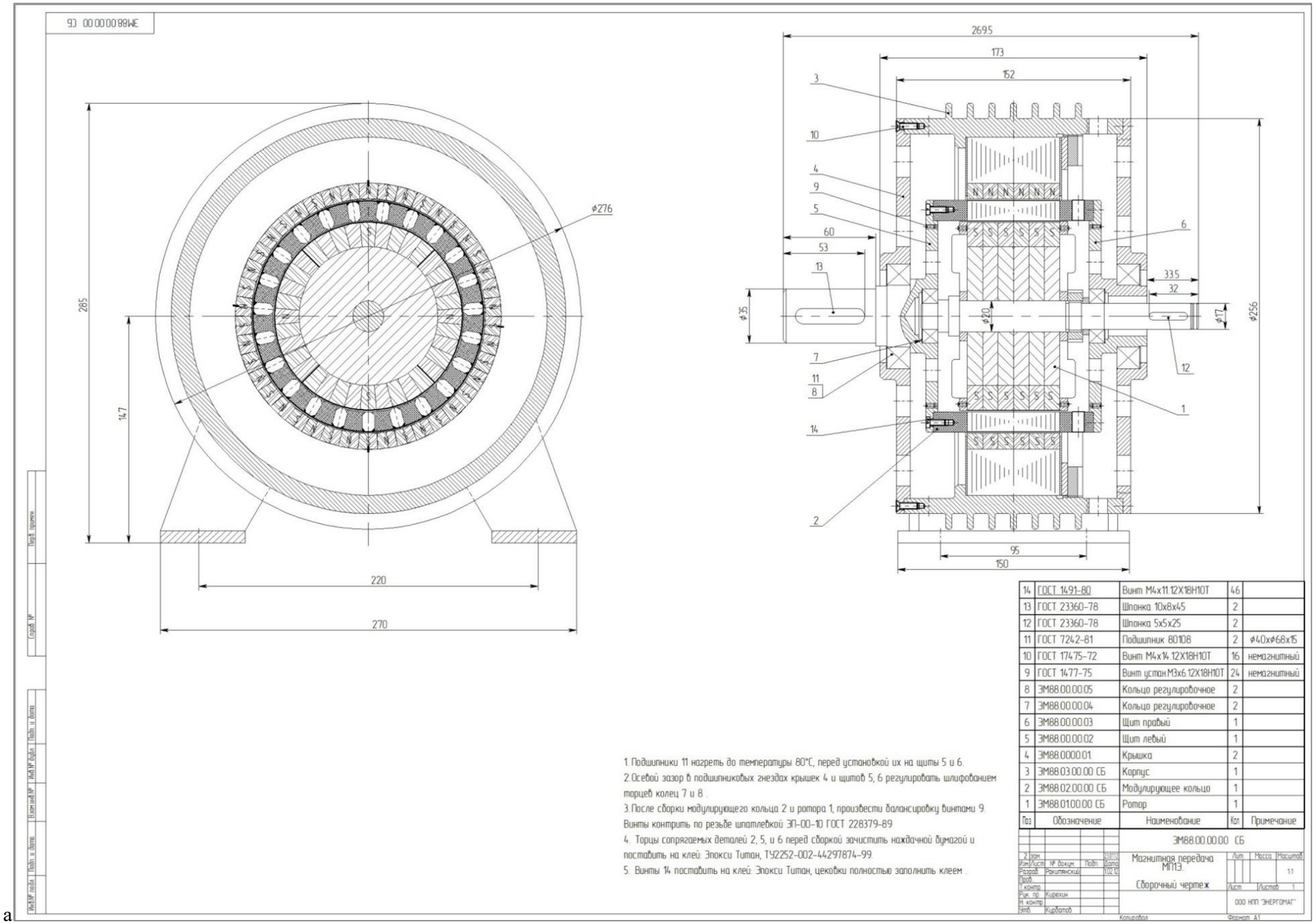
ПРИЛОЖЕНИЕ А

Протокол испытаний *Somaloy*



ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Сборочный чертёж экспериментального образца магнитной передачи



Поз	Обозначение	Наименование	Кол	Примечание
14	ГОСТ 1491-80	Винт М4х11.12Х18Н10Т	46	
13	ГОСТ 23360-78	Шпонка 10х8х45	2	
12	ГОСТ 23360-78	Шпонка 5х5х25	2	
11	ГОСТ 7242-81	Подшипник 80108	2	ф40хф68х15
10	ГОСТ 17475-72	Винт М4х14.12Х18Н10Т	16	немагнитный
9	ГОСТ 1477-75	Винт устан.М3х6.12Х18Н10Т	24	немагнитный
8	ЭМ88.00.00.05	Кольцо регулировочное	2	
7	ЭМ88.00.00.04	Кольцо регулировочное	2	
6	ЭМ88.00.00.03	Щит правый	1	
5	ЭМ88.00.00.02	Щит левый	1	
4	ЭМ88.0000.01	Крышка	2	
3	ЭМ88.03.00.00 СБ	Корпус	1	
2	ЭМ88.02.00.00 СБ	Модулирующее кольцо	1	
1	ЭМ88.01.00.00 СБ	Ротор	1	

ЭМ88.00.00.00 СБ

Магнитная передача МП13. Сборочный чертеж

Лит | Масса | Масштаб 1:1

Лист | Листов 1

ООО НПП "ЭНЕРГОМАГ"

Копировал | Формат А1

а

Редуктор

Производитель	*TOS ZNOJMO*
Модель	*MTC* 42*A*
Тип	2 ст. цилиндрический
Мощность	55,8 Вт
Номинальный момент	376,3 Н·м
Передаточное число	25,4
Ном. частота вращения	55,8 об/мин
Номинальная мощность	2,2 кВт

Электродвигатель

Производитель	*Able*
Модель	*MS*100*L*1-4
Тип	асинхронный
Номинальная мощность	2,2 кВт
Синхронная частота вращения	1500 об/мин
Ном. частота вращения	1430 об/мин
Напряжение питания	220/380 В
Номинальный ток	8,6/5,0 А
КПД	81%
Коэффициент мощности	0,82
Кратность пускового тока	7
Масса	23 кг

Электрогенератор

Производитель	Сарапульский электрогенерат. з-д
Модель	ГСПМ-500/24-400
Тип	Синхронный с возбужд.от ПМ
Номинальная мощность	500 Вт
Номинальное напряжение	24 В
Номинальная частота вращения	600 об/мин
Номинальная частота ЭДС	80 Гц
Число пар полюсов	8
Схема соединения обмотки	звезда

Преобразователь частоты

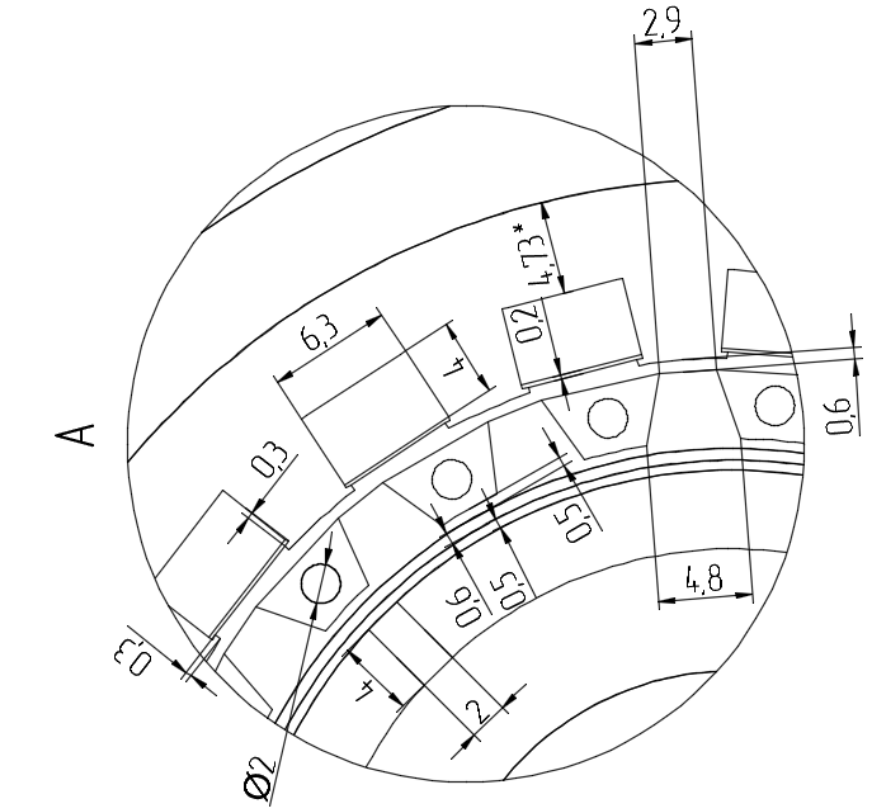
Производитель	*Hitachi*
Модель	*L*100
Номинальное напряжение, В	380
Диапазон выходных частот, Гц	0,5 – 360
Диапазон выходного напряжения	0 – 380 В
Номинальная мощность	2,2 кВт

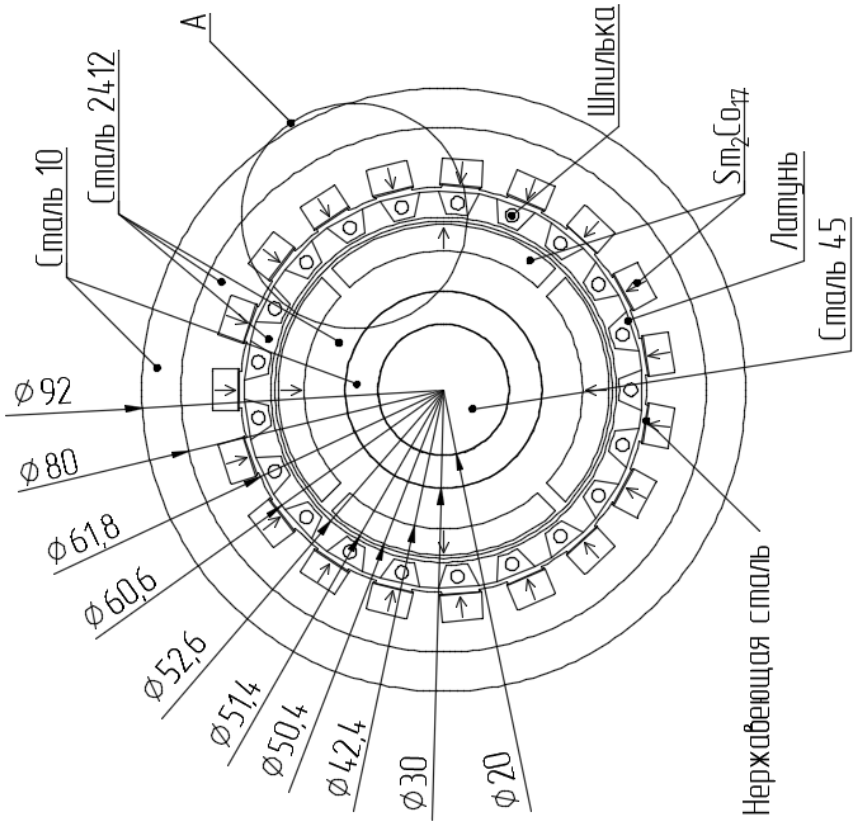
Рабочие характеристики электрогенератора

Частота вращения, об/мин	200	400	500	600	800
Напряжение холостого хода, В	20	40	50	60	80
Фазное напряжение, В	9	20	24	25	30
Фазный ток нагрузки, А	3	5,6	7	8,1	9,8
Мощность на нагрузке, Вт	81	336	500	610	884

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Эскиз магнитной системы магнитного редуктора для скважинного винтового насоса





ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Патент на полезную модель

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 122461

МАГНИТНАЯ ПЕРЕДАЧА

Патентообладатель(ли): ***Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ" (ФГБОУ ВПО "НИУ МЭИ") (RU)***

Автор(ы): ***см. на обороте***

Заявка № **2012125839**

Приоритет полезной модели **21 июня 2012 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации ***27 ноября 2012 г.***

Срок действия патента истекает **21 июня 2022 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Патент на полезную модель

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 122459

МАГНИТНАЯ ПЕРЕДАЧА

Патентообладатель(ли): ***Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ" (ФГБОУ ВПО "НИУ МЭИ") (RU)***

Автор(ы): ***см. на обороте***

Заявка № **2012127747**

Приоритет полезной модели **04 июля 2012 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации ***27 ноября 2012 г.***

Срок действия патента истекает **04 июля 2022 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов