

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи

Аминов Дилшод Саидович

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ ВОДОПОГРУЖНЫХ
ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В КАЧЕСТВЕ
ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ МАЛЫХ
И СРЕДНИХ РЕК**

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук,
доцент
Ганджа С.А.

Челябинск – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	5
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	8
ВВЕДЕНИЕ.....	9
1. ВЫБОР ВАРИАНТА ИСПОЛНЕНИЯ МИНИ-ГЭС И ТИПА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ДЛЯ ГИДРОГЕНЕРАТОРА.....	22
1.1. Выбор конструктивной схемы гидрогенератора	27
1.2 Краткий анализ типов гидрогенераторов малой и средней энергетики. Выбор базовой конструкции генератора	29
1.3. Описание конструкции и принципа действия синхронного генератора комбинированного возбуждения	30
Выводы по главе 1	33
2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО РАСЧЕТА ВЕНТИЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА КОМБИНИРОВАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ЕГО ГЕОМЕТРИИ.....	35
2.1. Разработка методики и математической модели расчета магнитной системы с постоянным высококоэрцитивным магнитом для вентильного генератора комбинированного возбуждения	36
2.1.1. Постановка задачи.....	37
2.1.2. Использование метода конечных элементов для построения математической модели.....	39
2.1.3. Построение математической модели расчета	42
2.2. Разработка математической модели расчета магнитной цепи вентильного генератора комбинированного возбуждения.	47
2.2.1. Воздушный зазор.....	48
2.2.2. Зубец обмотки якоря	49
2.2.3. Спинка якоря	50
2.2.4. Торцевая часть магнитопровода якоря	50
2.2.5. Осевая часть магнитопровода якоря	51
2.2.6. Постоянный магнит	51
2.2.7. Вкладыш магнитопровода индуктора	51

2.2.8. Осевая часть магнитопровода индуктора	52
2.2.9. Суммарная намагничивающая сила магнитной цепи генератора комбинированного возбуждения (А):	52
2.3. Разработка математической модели электромагнитного расчета вентильного генератора комбинированного возбуждения.	53
2.3.1. Входные параметры математической модели	54
2.3.1.1. Константы	54
2.3.1.2. Ограничения	55
2.3.1.3. Независимые переменные	55
2.3.1.4. Выходные параметры математической модели	56
2.4. Алгоритм математической модели расчета ВГКВ	57
2.5. Блок-схема алгоритма расчета ВГКВ	67
Выводы по главе 2	73
3. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВГКВ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПРОЕКТНЫХ СИТУАЦИЙ.....	74
3.1. Требования к математической модели.....	74
3.2. Требования к системе оптимизации.....	75
3.3. Требование совместимости с существующими программными системами.....	75
3.4. Выбор тип оптимизации	76
3.5. Выбор метода оптимизации	79
3.5.1. Определение уровней оптимизации	80
3.5.2. Полная габаритная оптимизация	82
3.5.3. Габаритная оптимизация при фиксированном числе	83
пар полюсов	83
3.5.4. Габаритная оптимизация при фиксированном наружном диаметре	84
3.5.5. Габаритная оптимизация при фиксированном внутреннем диаметре	84
3.5.6. Габаритная оптимизация при фиксированной наружной длине.....	85
3.5.7. Габаритная оптимизация при фиксированном наружном и внутреннем диаметрах	85
3.5.8. Оптимизация при фиксированном наружном, внутреннем диаметрах и наружной длине (в заданных габаритах)	85

3.5.9. Оптимизация при заданных размерах постоянного магнита.	86
3.5.10. Поверочный расчет	87
Выводы по главе 3.....	88
4. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СОСТОЯНИЯ ВГКВ.....	90
4.1. Электромагнитный анализ ВГКВ с помощью программного комплекса Ansys Electronics Desktop.....	91
4.2. Применение имитатора электронных Maxwell Circuit для анализа динамических характеристик.....	94
4.3. Анализ теплового состояния гидрогенератора.....	99
4.3.1. Анализ теплового состояния генератора на основе метода эквивалентных тепловых схем замещения.....	100
4.3.2. Анализ теплового состояния генератора на основе метода конечных элементов	104
Выводы по главе 4.....	107
5. РАЗРАБОТКА ПРОЕКТНОЙ СИСТЕМЫ ПО СОЗДАНИЮ ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ КОМБИНИРОВАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ.....	109
5.1. Оценка энергетического потенциала реки	109
5.2. Структурная схема проектной системы по созданию гидрогенератора ..	111
5.3. Использование проектной системы для разработки мини-ГЭС для реки Искандердарья (Таджикистан).....	115
5.4. Разработка конструкции гидрогенератора в САД системе Solidworks	122
Выводы по главе 5.....	127
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	129
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	133
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ МАЛЫХ ГЭС	160
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ПОСТОЯННОГО МАГНИТА ПРИ ПОМОЩИ ИНЖЕНЕРНОЙ МЕТОДИКИ И ПРИ ПОМОЩИ САД СИСТЕМЫ ANSYS ELECTRONICS DESKTOP.....	162
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. ДОКУМЕНТЫ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ	164

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В диссертации применяются следующие термины с соответствующими определениями:

Анализ электрической машины – определение основных параметров и характеристик электрической машины без изменения ее геометрии, материалов и обмоточных данных.

Алгоритм расчета – конечный набор процедур, позволяющих рассчитывать геометрию, параметры и характеристики электрической машины.

Вентильная электрическая машина - бесщеточная машина постоянного тока, обмотка якоря которой связана с внешними цепями через вентильное коммутирующее устройство.

Интерфейс – графическая программная оболочка, при помощи которой пользователь управляет программным комплексом.

Критерий оптимальности – показатель, на основании которого производится сравнительная оценка вариантов расчета электрической машины и выбор лучшего варианта.

Математическая модель – совокупность аналитических зависимостей, однозначно определяющих геометрию электрической машины, ее параметры и характеристики.

Многоуровневая оптимизации - оптимизация, позволяющая в процессе перебора независимых переменных фиксировать одну или несколько из них.

Метод оптимизации – метод перебора переменных для приближения к оптимальному решению.

Метод покоординатного спуска - методы многомерной оптимизации, при котором все независимые переменные последовательно перебираются.

Метод тепловых схем замещения – метод расчета средних температур частей сложного устройства, основанный на аналогии тепловых и электрических потоков и тепловых и электрических сопротивлений.

Метод Фибоначчи - один из методов генерации псевдослучайных чисел. Используется для одномерного перебора значений независимой переменной.

Независимые переменные – значения, которые в результате перебора в процессе оптимизации могут меняться независимо друг от друга в допустимых для них пределах.

Однокритериальная оптимизация – задача оптимизации, имеющая только один показатель качества.

Поверочный расчет – расчет параметров и характеристик электрической машины при заданных геометрических размерах.

Полная габаритная оптимизация – оптимизация, при которой для выбора наилучшего варианта варьируются все независимые переменные.

Проектная система - набор программных средств, работающих совместно для выполнения одной или нескольких сходных задач.

Проектная ситуация - техническое задание на проектирование электрической машины, в котором строго оговорено, какие независимые переменные могут варьироваться для выбора наилучшего варианта, а какие должны быть зафиксированы.

Трёхмерная твердотельная модель – компьютерная графическая модель объекта, содержащая информация об его объеме и свойствах, входящих в него материалов.

Синтез – разработка геометрии электрической машины с заданными параметрами и характеристиками.

Схема Ларионова - трёхфазный выпрямитель, в котором три полумоста, соединенные параллельно, объединены звездой («звезда-Ларионова»).

Уровень оптимизации – оптимизация, характерной особенностью которой является количество варьируемых и фиксированных независимых переменных. Количество варьируемых переменных определяют уровень оптимизации. При изменении всех независимых переменных говорят о самом высоком уровне оптимизации, при фиксации всех переменных – о самом низком уровне (поверочный расчет).

Частичная габаритная оптимизация – оптимизация, при которой для выбора наилучшего варианта часть независимых переменных варьируется,

часть независимых переменных остается фиксированными в соответствии с проектной ситуацией.

Электромагнитный момент - момент, развиваемый электромагнитными силами на роторе электрической машины.

Электропривод – электрическая машина, работающая совместно с электронной системой управления.

Ansys Icepak – CAD система, позволяющая рассчитывать тепловое состояние сложных объектов на основе метода конечных элементов

Ansys Electronics Desktop – CAD система, позволяющая рассчитывать электрические и магнитные поля сложных систем на основе метода конечных элементов. Позволяет создавать цифровые двойники электромеханических систем

Ansys Workbench – программная оболочка, позволяющая объединять различные CAD системы и решать таким образом связанные задачи.

Delphi – язык программирования высокого уровня

Mathcad — инженерное математическое программное обеспечение, которое позволяет выполнять, анализировать сложные расчеты и обмениваться ими.

Trancient – режим программы **Ansys Electronics Desktop** который позволяет проводить анализ динамических характеристик с учетом взаимного перемещения статора и ротора

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ВГКВ – вентильный генератор комбинированного возбуждения

ГЭС - гидроэлектростанция

ГОСТ – государственный стандарт

КПД – коэффициент полезного действия;

ЛЭП – линия электропередачи

МКЭ – метод конечных элементов;

Мини-ГЭС – гидроэлектростанция малой и средней мощности

НИОКР – научно-исследовательская и опытно-конструкторская работа;

РФ – Российская Федерация

СП – стандарт предприятия

ТЗ – техническое задание;

ТОЭ – кафедра теоретических основ электротехники;

ЭДС – электродвижущая сила.

ЮУрГУ – Южно-Уральский государственный университет

CAD – система автоматизированного проектирования;

Все аналитические выражения в диссертации приводятся для единиц измерения системы СИ.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность предмета исследования. В последнее время в мире возрастает интерес к альтернативным источникам энергии, использующим энергию ветра, солнца, приливов и отливов, волн, геотермальную энергию. Одним из наиболее эффективных направлений развития нетрадиционной энергетики является использование энергии небольших водотоков с помощью малых гидроэлектростанций (ГЭС). Практически в любой стране существует большое количество рек с небольшой величиной водотока, которые с успехом могут быть использованы для строительства мини - ГЭС. В настоящее время наблюдается тенденция уменьшения доли традиционных источников энергии в энергобалансе ведущих развитых стран и возрастание доли альтернативных источников энергии.

Это обусловлено:

- истощением запасов углеводородных источников;
- требованиями экологии по уровню выброса углекислого газа.

Сжигание углеводородов наносит большой вред окружающей среде. Использование энергии больших рек приводит к затоплению территорий, сокращению земель для сельского хозяйства. Не все страны имеют запасы угля, нефти и газа. Поэтому они попадают в энергетическую зависимость от стран производителей электроэнергии.

Альтернативные источники энергии экологически безопасны, они равномерно распределены по земному шару. В последнее время они становятся экономически выгодными.

Разработка надежного и экономичного оборудования для малых ГЭС является актуальной задачей, имеющей большое практическое значение при строительстве малых автономных гидроэлектростанций. Гидрогенераторы для малых рек – это надежные, экологически чистые, компактные, быстро окупаемые источники электроэнергии. Они экономически целесообразны для деревень, дачных поселков, фермерских хозяйств, а также мельниц, хлебопекарен, небольших производств в отдаленных, горных и

труднодоступных районах, где нет линий электропередач, а их строительство требует больших финансовых затрат и времени.

Большой практический интерес в этой концепции представляют реки Таджикистана, Узбекистана и других стран с большим количеством горных водных ресурсов, расположенных в труднодоступных местах.

Возобновляемые с источники имеют хорошую перспективу и, во многом, могут решить проблему увеличения выработки электроэнергии.

- они имеют неограниченный ресурс;
- они экологически чисты.

По данным Европейской Ассоциации малой гидроэнергетики суммарная установленная мощность малых гидроэлектростанций на 2010 год в мире составила 37 ГВт, в том числе в Евросоюзе-14 ГВт. Наилучшие результаты по освоению гидроресурсов малых рек имеют следующие страны Евросоюза: Италия 21%, Франция 17,5%, Испания 15,5%, Германия 14%, Австрия 9,4% от общего баланса выработки электроэнергии малыми гидроэлектростанциями [3].

На рис.1 представлена диаграмма использования гидроресурсов в мире.

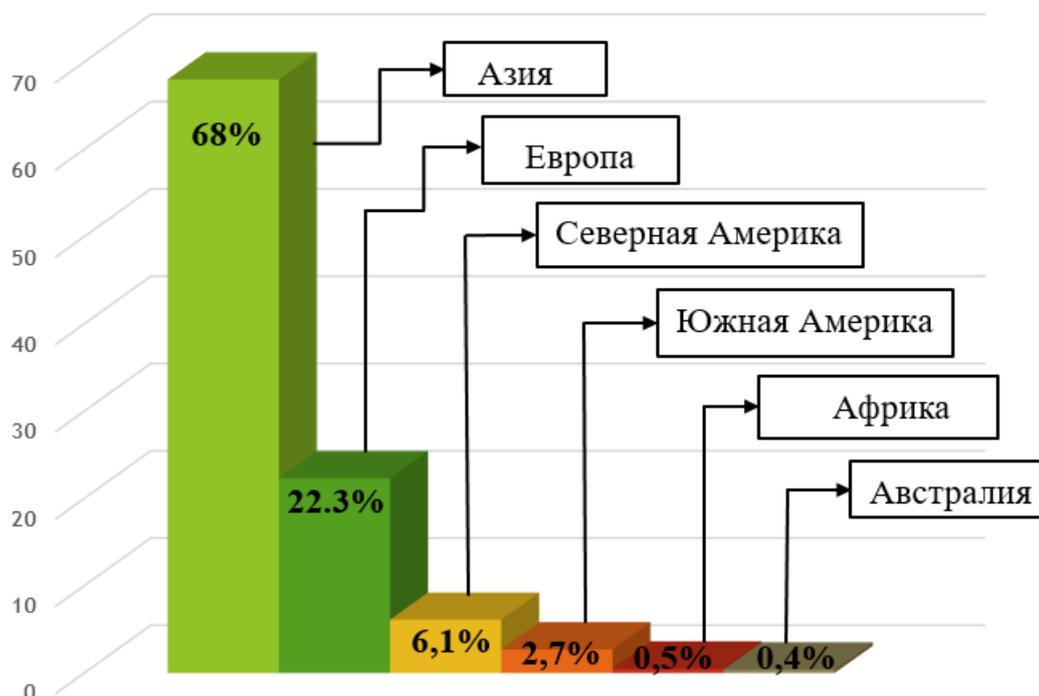


Рисунок.1. Распределение установленной мощности малой гидроэнергетики по регионам в мире.

В России энергетический потенциал малых рек составляет более 1000 млрд кВт·ч в год (см. табл.1), что в несколько раз превосходит этот показатель для большой гидроэнергетики.

Таблица 1

Потенциал мини-ГЭС в РФ (млрд. кВт·ч/год)

Федеральный округ	Теоретический потенциал	Технический потенциал
Северо-Западный	48.6	15.1
Центральный	7.6	2.9
Приволжский	35	11,4
Южный	50.1	15.5
Уральский	42.6	13.2
Сибирский	469.7	153
Дальневосточный	452	146
Итого по России	1105.6	357.1

Указанные цифры доказывают, что научные исследования и инженерные работы в направлении развития малой гидроэнергетики важны и актуальны.

Следует отметить, что при достигнутых значительных результатах инженерные и научные проблемы в этой области до конца не решены. Это связано с особенностями использования гидроресурсов малых рек.

Каждая малая река имеет свою специфику: скорость течения, мощность водяного потока, глубину, особенность рельефа. В этих условиях очень сложно создать универсальный генератор, который удовлетворял бы всем требованиям. По этой причине серийно выпускаемые генераторы в каждом конкретном месте малой реки будут работать неэффективно, так как они спроектированы на конкретный режим работы. Поэтому, очень сложно получить максимально возможный КПД, требуемое напряжение, наилучшие массоэнергетические показатели генератора в месте эксплуатации. В связи с этим возникает

проблема проектирования специального гидрогенератора для данной реки и конкретного места установки.

В настоящее время в литературе не описана методика проектирования таких гидрогенераторов. Отечественные диссертационные работы в полной мере не решают эту проблему, поэтому разработка таких энергетических источников остается актуальной проблемой.

Степень научной разработанности исследуемой темы. Научная общественность проблеме развития малой гидроэнергетики уделяет пристальное внимание более 100 лет. За этот период накопился достаточный практический и теоретический опыт, как положительный, так и отрицательный. Если в начале развития этой отрасли проблемы экологии вообще не рассматривались, то в настоящее время без их учета невозможно принимать технические решения. Практика показала, что большая гидроэнергетика существенным образом влияет на баланс природных ресурсов. Отчуждение сельскохозяйственных земель, заиливание водных бассейнов, влияние на естественную биосферу, затраты на переселение людей и их новое обустройство – это только малый список реальных проблем.

При анализе научных заделов в этой области следует учесть комплексность решаемой проблемы, в частности по выбору типа мини-ГЭС, типа генератора, системы управления, накопления электроэнергии.

Существуют наработки по проектированию плотинных ГЭС [169].

Ученые Московского энергетического института внесли существенный вклад в проектирование асинхронных и синхронных генераторов для мини-ГЭС, в частности электрических машин с мощными высококоэрцитивными постоянными магнитами [15-16]. Представляют интерес наработки по малой гидрогенерации, использующей избыточное магистральное давление [17-25].

Ученые Ивановского энергетического государственного университета внесли существенный научный вклад в вопросы оптимального проектирования электрических машин и их анализа [82-87,162-166].

Следует отметить вклад ученых Новосибирского государственного университета в область малой гидроэнергетики, в частности, разработки генератора двойного питания [68-71].

Интересен опыт Алтайского государственного технического университета по разработке мини-ГЭС с асинхронным генератором для сельскохозяйственного применения [134-156].

Самарский государственный технический университет внес существенный вклад в развитие альтернативной энергетики, в частности, в разработку генераторов для ветроэнергетических установок [5-6,104-109,197].

Заслуживают внимание научные заделы Уральского политехнического института по разработке специальных электрических машин, в частности, машин, работающих в агрессивных средах [123,133].

Южно-Уральский государственный университет в течение ряда лет занимается вопросами освоения альтернативной энергии и имеет научные заделы в этой области [31-65].

В наукометрической базе Scopus и Web of Science существует обширный материал, посвященный этой проблеме [183-199]. Рассмотрены различные типы существующих мини-ГЭС, разные типы генераторов и систем управления к ним. В частности, изучены вентильно-индукторные генераторы, генераторы с электромагнитной индукцией, асинхронизированные синхронные генераторы [184-189]. Хорошо представлены методы анализа сложных электромеханических систем на основе новейших инженерных технологий [190-193].

Большое количество научных работ говорит о том, что на сегодняшний день вопрос о выборе типа мини-ГЭС и типа электрической машины для гидрогенератора до конца не решен и идет активный поиск. Следует отметить, что исследования носят разрозненный характер по решению локальных узких технических задач. Не разработана проектная система, позволяющая решить связанную сквозную задачу от постановки технического задания по проектированию мини-ГЭС для конкретного места реки до синтеза и анализа

конкретного устройства. Современный уровень развития вычислительной техники позволяет решить эту задачу.

Цель диссертационного исследования. Основной целью диссертационного исследования является создание методики по проектированию водопогружных гидрогенераторов, используемых в качестве возобновляемых источников энергии малых и средних рек. Данная методика должна позволить разработчику для выбранного места реки с конкретными гидроэнергетическими параметрами разработать систему генерации электроэнергии с максимальными показателями энергоэффективности (КПД, массоэнергетическими параметрами, надежностью).

Задачи исследования: для достижения этой цели необходимо последовательно решить следующие **научные задачи:**

- выбрать тип минигидроэлектростанции, определить ее структуру;
- выбрать тип гидрогенератора, разработать его конструкцию;
- разработать методику расчета магнитной системы гидрогенератора;
- разработать математическую модель для оптимизационного расчета гидрогенератора;
- разработать гибкую систему многоуровневой оптимизации гидрогенератора;
- разработать систему анализа электромагнитного состояния гидрогенератора;
- разработать систему анализа теплового состояния гидрогенератора;
- связать в единую проектную систему синтез гидрогенератора и анализ электромагнитных и тепловых характеристик.

Объект исследования. Объектом исследования является вентильная машина комбинированного возбуждения, работающая в режиме генератора.

Предмет исследования. Предметом исследования являются методы анализа и синтеза вентильной машины комбинированного возбуждения, работающей в режиме генератора. Это методы разработки математических моделей для оптимизации, математических моделей для оценки

электродинамического и теплового состояния, методы оптимального проектирования.

Методология и методы исследования. Поставленные научные задачи решены с применением общей теории электрических машин, методов проектирования на основе схем замещения, методов нелинейного программирования для решения задачи оптимизации, метода конечных элементов для решения задач электромагнитного и теплового анализа, методов физического моделирования, методов трехмерного твердотельного моделирования.

Научная новизна

Класс вентильных машин комбинированного возбуждения известен достаточно давно, но принцип комбинированного возбуждения может быть реализован в большом количестве конструктивных исполнений. Как правило, конструкции машин этого класса имеют паразитный магнитный зазор, который ухудшает основные параметры. Этот фактор ограничивает развитие этих электрических машин. В работе применена уникальная конструкция вентильного генератора комбинированного возбуждения, которая не имеет этого недостатка. На конструкцию имеется патент РФ. Представленная в работе методика расчета этой конструкции обладает научной новизной и является дальнейшим развитием теории электрических машин этого класса.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод расчета магнитной системы вентильной электрической машины комбинированного возбуждения, **отличающийся от известных методов тем**, что в основу его положен метод конечных элементов, но число элементов заранее определено таким образом, чтобы количество уравнений, описывающих магнитное состояние системы, было небольшим и позволяло включить электромагнитный расчет в большое число оптимизационных циклов.

2. Математическую модель расчета вентильного генератора комбинированного возбуждения, **которая описывает уникальное запатентованное устройство**, имеющее различные конструктивные

модификации и позволяющее включить эту модель в оптимизационные циклы для определения наилучшей по выбранному критерию геометрии.

3. Математическую модель многоуровневой однокритериальной оптимизации генератора комбинированного возбуждения, **отличающуюся тем**, что она позволяет создать гибкую проектную систему, позволяющую разработать генератор для различных проектных ситуаций.

4. Математическую модель анализа электромагнитного и теплового состояния генератора комбинированного возбуждения, которая, **в отличие от существующих методов анализа**, позволяет решить связанную задачу электродинамики и термодинамики генератора уникальной конструкции.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты. Полученные в работе научные результаты соответствуют пп. 2 «Разработка научных основ создания и совершенствования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов», пп. 3 «Разработка методов анализа и синтеза преобразователей электрической и механической энергии», пп. 5 «Разработка подходов, методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих проектирование, надежность, контроль и диагностику функционирования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов в процессе эксплуатации, в составе рабочих комплексов» паспорта специальности.

Теоретическая значимость. В работе представлено дальнейшее развитие теории вентильных машин комбинированного возбуждения, которые недостаточно изучены в общей теории электрических машин, в частности, теоретическую новизну представляет собой методика расчета постоянного магнита, метод оптимизации этого класса машин, метод анализа электромагнитного и теплового состояния, который основан на решении связанной задачи.

Практическая значимость. Основным практическим результатом проведенных исследований является создание гибкой проектной системы,

которая позволит в зависимости от требования заказчика спроектировать гидрогенератор с оптимальной геометрией и наилучшими массоэнергетическими параметрами для конкретного места реки. Данные исследования являются основой системы автоматизированного проектирования для гибкого производства мини-ГЭС. Массовое производство мини-ГЭС позволит освоить гидропотенциал малых и средних рек, который по экспертным оценкам в несколько раз превосходит этот показатель для больших рек.

Разработанный метод расчета магнитной системы доведен до инженерной практики и может быть использован для расчета плоских прямоугольных постоянных магнитов для различных магнитных систем.

Внедрение результатов работы. Результаты научных исследований вызвали большой интерес в организации Ассоциация малой энергетики. Это один из динамичных отраслевых союзов России, который объединяет предприятия и организации, осуществляющие свою деятельность в сфере малой распределенной и альтернативной энергетики и смежных отраслях. Проект участвовал в Международном конкурсе «Малая энергетика-большие достижения» в номинации «Инновационная разработка в сфере энергетики» и получил одобрение экспертов.

Метод расчета постоянного магнита и методика расчета электрической машины комбинированного возбуждения внедрены в учебный процесс при подготовке бакалавров по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника в курсе «Проектирование специальных электрических машин».

Степень достоверности результатов работы. Достоверность полученных научных результатов подтверждается корректным использованием известных методов анализа и синтеза, применяемых в общей теории электрических машин, таких как метод эквивалентных схем замещения, метод конечных элементов, методы нелинейного программирования. Технологичность и собираемость разработанной конструкции проверена на масштабной модели, изготовленной по технологии 3D принтера.

Апробация работы.

Основные положения результатов диссертационной работы и отдельные ее части докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях и семинарах:

- 12-я научная конференция аспирантов и докторантов Южно-Уральский государственный университет. (Челябинск 2020);
- Научный семинар аспирантов «IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry» (Магнитогорск 2019);
- Международная научная конференция по энергетическому, экологическому и строительному инжинирингу «ЕЕСЕ-2019» (Санкт-Петербург 2019);
- Международная научно-техническая конференция «International Conference on Industrial Engineering» (Москва 2018-2019);
- десятая научная конференция аспирантов и докторантов Южно-Уральского государственного университета. (Челябинск 2018);
- 70-я научная конференция профессорско-преподавательского состава, аспирантов и сотрудников Южно-Уральского государственного университета. (Челябинск 2018);
- II Всероссийская (национальная) научно-практическая конференция «Приоритетные направления развития энергетики в АПК» (Курган 2018);
- Международная научно-техническая конференция «2018 Global Smart Industry Conference» (Челябинск 2018);
- Международная научно-техническая конференция «International Ural Conference on Green Energy» (Челябинск 2018).

Публикации по теме диссертации.

По результатам диссертационной работы опубликовано **19** работ, из них: **10** работ индексированы в базе данных **Scopus**, **1** статья опубликована в базе данных **Scopus TOP 25** рейтинга мировых научных журналов, **3** статьи в журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых изданий, **рекомендованных ВАК** Минобрнауки РФ, **5** статей в журналах **РИНЦ**.

Личный вклад автора в диссертационное исследование

Все научные результаты, включенные в диссертацию и представленные к защите, получены лично автором. Личный вклад диссертанта в работах, опубликованных в соавторстве, состоит в определении направлений исследований, постановке задач, разработке математических и имитационных моделей.

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю доктору технических наук, доценту Гандже Сергею Анатольевичу за конструктивную критику и содействие при работе над диссертацией.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из определений, используемых научных терминов, основных обозначений и сокращений, введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 201 наименований, 3 приложений. Работа изложена на 166 страницах, из них 132 страницы основного текста. Работа содержит 47 иллюстраций, 97 аналитических выражений, 3 таблицы.

Диссертация имеет следующую структуру и логику построения.

Во введении показана актуальность выбранной темы. Отмечено, что гидроресурсы малых и средних рек при правильном использовании могут в несколько раз превосходить этот показатель для крупных рек. Показана степень научной разработанности исследуемой темы, задачи исследования, объект и предмет исследования, примененные в работе методы исследования, научная новизна и положения, выносимые на защиту, соответствие паспорту специальности, практическая значимость и результаты внедрения, апробация и публикации по теме диссертационного исследования.

Первая глава содержит классификацию малых и средних рек. Определен тип мини – ГЭС. В качестве основного варианта выбрана водопогружная мини – ГЭС проточного типа. Функциональная схема мини-ГЭС включает в себя гидрогенератор, выпрямитель, накопитель энергии, инвертор постоянного тока в переменный. В качестве гидрогенератора выбрана уникальная

запатентованная машина комбинированного возбуждения [117]. Приводится ее описание и принцип действия.

Во второй главе приводится разработка математической модели электромагнитного расчета вентильного генератора комбинированного возбуждения. Математическая модель является основой для оптимизации геометрии генератора по выбранному критерию. Точность математической модели зависит от точности расчета постоянного магнита. В главе разрабатывается методика расчета постоянного магнита. Основу ее составляет метод конечных элементов, но она существенно упрощена за счет того, что количество элементов задается заранее для любого размера магнита. Модель при высокой точности позволяет включить себя в большое число циклов оптимизации, что важно для подсистемы синтеза. Приведена модель расчета магнитной цепи генератора комбинированного возбуждения и общая модель электромагнитного расчета. Разработанные модели составили основу подсистемы синтеза.

В третьей главе представлена разработка системы оптимального проектирования генераторов комбинированного возбуждения, сформулированы требования к математической модели, к системе оптимизации. В качестве метода оптимизации выбран метод покоординатного спуска Гаусса-Зейделя в сочетании с методом Фибоначчи. Дано понятие уровней оптимизации. Определено 8 уровней оптимизации. Для каждого уровня определена система констант, ограничений, независимых переменных и критериев оптимальности. С учетом выбора различных критериев система позволяет реализовать до 12 проектных ситуаций, закрывая практически все потребности реального проектирования вентильного генератора комбинированного возбуждения (ВГКВ) данной конструкции.

В четвертой главе описана подсистема анализа проектной системы. Подсистема анализа включает в себя оценку электромагнитного состояния и оценку теплового состояния гидрогенератора. В основу подсистемы анализа положены разработанные и проверенные на практике САД программы,

реализующие метод конечных элементов. Подсистема анализа связана с подсистемой синтеза общей оболочкой и входит в общую проектную систему по созданию гидрогенераторов данного типа. Разработанная подсистема теплового анализа реализована в два этапа. На первом этапе используется метод тепловых схем замещения, на основании которого определяются усреднённые температуры нагрева частей гидрогенератора. На втором этапе применена САД система Ansys Icerak, реализующая метод конечных элементов.

В пятой главе доказывається работоспособность и эффективность работы проектной системы. В главе рассчитывается конкретная мини-ГЭС для реки Искандердаря (Таджикистан). С помощью системы определена оптимальная геометрия и основные параметры и характеристик мини-ГЭС, состоящей из 4 гидрогенераторов.

Заключение содержит выводы, сделанные по результатам всей работы. Определены направления дальнейших исследований в области теории и инженерной практики.

В диссертации приведен список использованных источников из 201 наименования отечественных и зарубежных авторов.

В работе имеется 2 приложения, содержащих основные типы мини-ГЭС и сравнение результатов расчета постоянного магнита при помощи инженерной методики и при помощи САД системы Ansys Electronics Desktop.

1. ВЫБОР ВАРИАНТА ИСПОЛНЕНИЯ МИНИ-ГЭС И ТИПА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ДЛЯ ГИДРОГЕНЕРАТОРА

Вводные замечания

Разделение водотоков по категориям большие, средние и малые весьма условно и его часто связывают с видом использования этих ресурсов [169]. Наиболее широкое применение имеет классификация их по гидрологическим характеристикам, например, по ГОСТ 19179-73. Согласно этому документу, к малым причисляют реки длиной до 100 км и площадью водосбора до 2000 км².

ГОСТ 17.1.1.02-77 делит водотоки на категории. Малой категории соответствуют реки, площадью водосбора не более 20 тыс. кв. км и расходом воды за период низкого стока не выше 5 м³/с.

СП 33-101-2003 называет малыми реки с площадью водосбора от 1000 до 5000 кв. км.

Целесообразно при оценке гидроэнергоресурсов делить реки по величине потенциальной мощности. По этой классификации к малым относят водотоки мощностью не более 2000 кВт для равнинных условий и не более 1700 кВт – для горных условий.

Классификация рек Северо-Востока РФ [169] делит их на 3 группы по величине потенциальной мощности за лимитирующий сезон (май-сентябрь):

1-я группа – мощностью более 5000 кВт;

2-я группа – 1000-5000 кВт;

3-я группа – 100-1000 кВт.

Малыми реками принято так же считать водотоки некоторой территории длиной не более 200 км, площадью водосбора до 5000 кв. км, с расходом до 50 м³/с, которые имеют особый характер гидрологических процессов и определенные возможности хозяйственного использования природных ресурсов.

Не вдаваясь в особенности классификации, приведем перечень наиболее характерных малых и средних рек России и ближнего зарубежья, который показан в табл.1.1.

Таблица 1.1.

Перечень малых и средних рек России и ближнего зарубежья

Название реки	Длина, км	Площадь Бассейна, тыс.км ²	Средний годовой расход м ³ /сек
Река Теберда на Северном Кавказе в Карачаево-Черкесии, левый приток реки Кубань	60	1080	27,3м ³ /с
Река Большой Зеленчук в районе Северного Кавказа	158	2730	40м ³ /с
Река Апчас, образуется на северо-восточных склонах хребта Котх, севернее Большого Кавказа	120	550	19 м ³ /с
Река Битюг, протекает в Тамбовской, Липецкой и Воронежской областях, левый приток Дона	379	8840	18,2м ³ /с
Река Усмань, приток реки Воронеж. Протекает по Воронежский и Липецкой обл. В нижнем течении называется Усманка.	151	2840	1,99м ³ /с
Река Воронеж, левый приток Дона. Протекает по территории Тамбовской, Липецкой и Воронежской области.	520	342	70,8м ³ /с
Река Олым, протекает в Курской области, частично проходит по границе Воронежской и Липецкой областей, частично проходит по границе с Орловской областью.	151	3090	6,5 м ³ /с
Река Вопь, находится в Смоленской области, правый приток Днепра. Истоки находятся в болотах Смоленской	158	3300	22 м ³ /с

возвышенности			
Река Чир, расположена в Ростовской и Волгоградской областях. Это правый приток Дона, впадает в Цимлянское водохранилище	317	9580	12 м ³ /с
Река Снов, протекает по Брянской области России и Черниговской области Украины	253	8705	24 м ³ /с
Река Шостка, протекает по территории Глуховского, Ямпольского и Шосткинского районов Сумской области Украины	56	412	360м ³ /с.

В таблице представлена только часть речного потенциала России и ближнего зарубежья. Общую статистику приведем в табл.1. 2.

Таблица.1.2.

Общая статистика малых рек на территории Российской Федерации

Градация водотоков по длине, км		Европейская территория	Азиатская территория	Всего по РФ
Самые малые	<10	427 151	1 988 267	2 415 418
	10-25	17 777	77 208	94 985
Малые	26-50	4 299	15 949	20 248
	51-100	1 747	5 494	7 241
Всего		450 974	2 086 918	2 537 892

Всего на территории РФ насчитывается около 2,9 млн. рек, которые создают общий объем среднемноголетнего стока в размере 4262 км³/год.

Следует особо отметить, что богатыми водными ресурсами обладает Таджикистан. Теоретический потенциал малых и средних рек страны при строительстве малых ГЭС составляет более 30 млн. кВт с годовой выработкой электроэнергии порядка 100 млрд.кВт·час. Использование

энергии малых рек может в значительной мере или полностью обеспечить отдаленные районы электрической энергией.

В Таджикистане на период 2010 - 2030 годы планируется поэтапное строительство 189 малых ГЭС совокупной мощностью 103.18 МВт и стоимостью \$641,7 млн.

Таким образом, анализ энергоемкости водных ресурсов малых и средних рек показывает, что их энергетический потенциал достаточно высок. Его грамотное использование может дать значительный экономический эффект и вклад в развитие индустрии России и стран ближнего зарубежья.

По типу использования энергии водотока мини-ГЭС можно разделить на следующие основные типы:

- плотинные мини-ГЭС, для которых напор образуется плотиной;
- деривационные мини-ГЭС, для которых напор создается деривацией, сооружаемой в виде канала, лотка, туннеля, трубопровода;
- мини-ГЭС, использующие энергию свободного течения воды.

К настоящему времени наибольшее распространение получили мини-ГЭС плотинного типа. Основное их преимущество заключается в накоплении большого количества потенциальной энергии за счет плотины и создание большого напора воды за счет перепада высоты верхнего и нижнего бьефа.

Однако в последнее время требования экологии становятся первостепенными и начинают существенным образом влиять на выбор вариантов и принятие технических решений. Отметим отрицательное влияние на экологию этого варианта:

- во время строительства нарушается естественный ландшафт, происходит загрязнение атмосферы выбросами строительной техники, запыление при возведении грунтовых сооружений и рытья котлованов, движения транспорта, происходит выделение в атмосферу углекислого газа от изготовления материалов, строительных и монтажных работ при сооружении энергетических гидроузлов;

– оказывается воздействия на окружающую среду – атмосферу, водные объекты, земельные ресурсы, хозяйство, население:

– водохранилища на малых водотоках оказывают влияние на микроклимат прибрежной зоны. Весной и летом отмечается охлаждающее влияние водохранилищ на прилегающую сушу, осенью – отепляющее. Образование водной поверхности водохранилища приводит к увеличению испарения, что ведет к изменению относительной влажности воздуха над зеркалом воды;

– с заилением и обмелением водохранилищ тесно связано их зарастание высшей водной растительностью;

– затопление территории приводит к её изъятию из хозяйственного использования; кроме того, изымаются земли под сооружение гидроузла, дороги, коридоры ЛЭП.

Основной недостаток деривационных мини-ГЭС заключается в том, что они нарушают эстетику естественной природы. Там, где раньше располагалась красивая горная река, которая сотни лет украшала данную местность, размещаются технические сооружения в виде труб, каналов, лотков. Это так же приводит к локальному изменению экологии и биосферы данной местности, в частности нарушается естественное орошение, водопой для диких животных, окружающая атмосфера. При массовом внедрении этого типа мини-ГЭС могут произойти и глобальные изменения в природе данной местности.

Третий тип мини-ГЭС, который использует энергию свободного течения воды, может несколько уступать первым двум рассмотренным вариантам по энергоэффективности, но он гармонично вписывается в естественную природу, не приводя ни к существенному изменению экологии, ни к эстетическим негативным явлениям. Мини-ГЭС этого типа можно сделать водопогружными, при этом они не нарушат ни ландшафт, ни экологию. Необходимую требуемую мощность можно получить за счет наращивания количества таких мини-ГЭС по течению русла реки.

В данном диссертационном исследовании на основании приведенного выше анализа в качестве основного выбран именно этот тип мини-ГЭС. При этом следует отметить необходимость решения целого комплекса научных проблем и технических задач:

- выбор конструктивной схемы водопогружного гидрогенератора;
- решение вопроса гидроизоляции водопогружной машины;
- выбор типа генератора;
- разработка методики синтеза и анализа гидрогенераторов данного типа.

Далее покажем последовательность решения этих задач.

1.1. Выбор конструктивной схемы гидрогенератора

Оценить энергетический потенциал реки в данном выбранном месте можно по следующей зависимости:

$$P_{рек} = \rho_{воды} \frac{b_{реки} \cdot h_{реки}}{2} V_{ср}^3 \cdot \eta_{миниГЭС}, \quad (1.1)$$

где $P_{рек}$ - средняя мощность реки в данном месте (Вт); $\rho_{воды}$ - удельная плотность воды ($\text{кг}/\text{м}^3$); $b_{реки}$ - ширина реки (м); $h_{реки}$ - средняя глубина реки (м); $V_{ср}$ - средняя скорость реки в данном месте (м/с); $\eta_{миниГЭС}$ - КПД мини-ГЭС, включая КПД турбины и генератора.

Для наиболее типичных параметров средних рек при ширине реки 10 м, глубине реки 1 м, средней скорости реки 2 м/с и общем КПД гидрогенератора 0.25 можно оценить, что с данного сечения реки можно снять мощность около 10-15 кВт.

Если сформировать по руслу реки на протяжении 1 км около 10 таких мини-ГЭС, то можно получить общую мощность около 100 кВт, которая при экономном энергопотреблении с учетом накопления в период спадов потребления будет достаточна для небольшого экопоселения.

Соответственно с увеличением количества мини – ГЭС мощность можно наращивать.

Сглаживать естественные пики и провалы энергопотребления можно за счет накопителя. Наиболее дешевым и надежным накопителем электроэнергии может служить химический источник электроэнергии - аккумуляторная батарея.

Соответственно, работая на накопитель, генератор должен вырабатывать постоянное напряжение для его зарядки. Следовательно, генератор для мини-ГЭС этого типа должен иметь встроенный выпрямитель.

Для получения стандартного напряжения из накопленного постоянного выпрямленного напряжения используем инвертор. На данные мощности стандартный инвертор представляет собой серийное комплектующее изделие.

Предварительный анализ показал, что генератор будет тихоходным с частотой вращения порядка 200 – 400 об/мин. Отечественный и зарубежный производитель серийно не производит генераторы на эту частоту вращения. Такой генератор является специальным изделием и требует отдельного проектирования и производства.

Низкая частота вращения по сравнению со стандартной позволяет решить вопрос его герметичности следующим образом. Практика эксплуатации водопоргрузных электрических машин показывает, что сальниковые уплотнения не позволяют надежно защитить электрическую машину от попадания внутрь воды. В процессе эксплуатации при нагревании воздух выдавливается в окружающую водную среду, а при остывании вода всасывается внутрь электрической машины. После нескольких циклов эксплуатации внутренняя полость электромашины заполняется водой. В случае агрессивной среды происходит ускоренное разрушение изоляции, повышенная коррозия металла и, как результат, выход изделия из строя.

Для низко оборотистых машин надежным средством от проникновения внутрь воды является заполнение их трансформаторным маслом с

применением компенсаторов давления. Гидрофобные свойства масла не дают проникнуть внутрь воде, а расширение масла приводит к заполнению компенсаторов, которые не предотвращают его вытекание под давлением. На основании изложенного, в качестве основного варианта выбираем низкооборотный генератор, наполненный маслом с компенсаторами давления. Электрическая принципиальная схема мини-ГЭС представлена на рис.1.1.

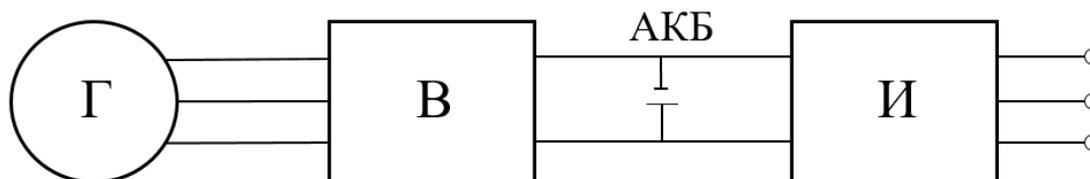


Рисунок.1.1. Электрическая принципиальная схема мини-ГЭС

Таким образом, в качестве основного варианта выбираем низкооборотный генератор, наполненный маслом с компенсаторами давления, с выпрямителем переменного тока в постоянный и с инвертором постоянного тока в переменный.

1.2 Краткий анализ типов гидрогенераторов малой и средней энергетики. Выбор базовой конструкции генератора

Наиболее распространёнными типами применяемых электрических машин являются:

- асинхронные генераторы, работающие с возбуждением от конденсаторов [145–149];
- бесконтактные синхронные генераторы с постоянными магнитами [17–21].

Первый тип генераторов имеет высокую надежность за счет короткозамкнутого ротора. Но без конденсаторных батарей в автономном режиме он работать в принципе не может. Наличие конденсаторных батарей снижает надежность и существенно увеличивает стоимость всей установки.

Синхронные генераторы с постоянными магнитами тоже имеют высокую надежность за счет бесконтактного токоподвода. Но в этих электрических машинах нельзя регулировать магнитный поток. Это

приводит к тому, что генератор должен быть спроектирован на широкий диапазон изменения частоты вращения, чтобы обеспечить требуемый уровень выходного напряжения. То есть, генератор должен иметь завышенные габариты и мощность. Кроме этого, стабилизация выпрямленного для накопителя напряжения по якорной цепи приводит к дополнительным потерям и удорожанию системы управления.

Наиболее приемлемым вариантом для поставленной цели следует признать синхронный генератор, с так называемым, комбинированным возбуждением [31,36,38]. Этот класс электрических машин содержит два источника для возбуждения: постоянные магниты и обмотку возбуждения. При этом применение мощных постоянных магнитов позволит уменьшить габариты генератора, а возможность регулирования магнитного потока за счет обмотки возбуждения во многом упростит систему по стабилизации выходного напряжения. Известные генераторы комбинированного возбуждения имеют существенные недостатки, которые ограничили их применение [7,75]. Это дополнительный паразитный воздушный зазор, увеличивающий габариты и контактный токоподвод, который снижает надежность. Предлагаемая авторами конструкция лишена этих недостатков [190].

Данная конструкция уникальна, на нее оформлен патент РФ, авторами которого является профессорско-преподавательский состав кафедры ТОЭ ЮУрГУ [117].

Описание конструкция и принцип действия генератора представлены ниже.

1.3. Описание конструкции и принципа действия синхронного генератора комбинированного возбуждения

Особенность генератора заключается в наличие двух источников магнитного поля для возбуждения. Это постоянные магниты и обмотки возбуждения. Такая сложность индуктора технически оправдана. Известно,

что магнитные системы с постоянными магнитами имеют меньшие габаритные размеры по сравнению с электромагнитным возбуждением при одинаковом магнитном потоке. Это объясняется тем, что постоянный магнит создает поток своим объемом, то есть магнитный поток зависит от линейных размеров в третьей степени. При электромагнитном возбуждении магнитный поток зависит от сечения полюса и сечения меди обмотки возбуждения, то есть от линейных размеров в четвертой степени. Таким образом, применяя мощные высококоэрцитивные магниты, мы можем существенно уменьшить размеры индуктора. Обмотка возбуждения позволяет регулировать суммарный магнитный поток в якорной цепи, добавляя свой поток к потоку постоянных магнитов или вычитая его. На цепь возбуждения приходится от 3 до 8 % общей мощности, поэтому управлять выходным напряжением с помощью обмотки возбуждения очень выгодно. Для этого можно использовать слаботочную электронику. Таким образом, мы имеем возможность уменьшить габариты генератора и упростить систему управления выходным напряжением. Эскиз генератора показан на рис. 1.2.

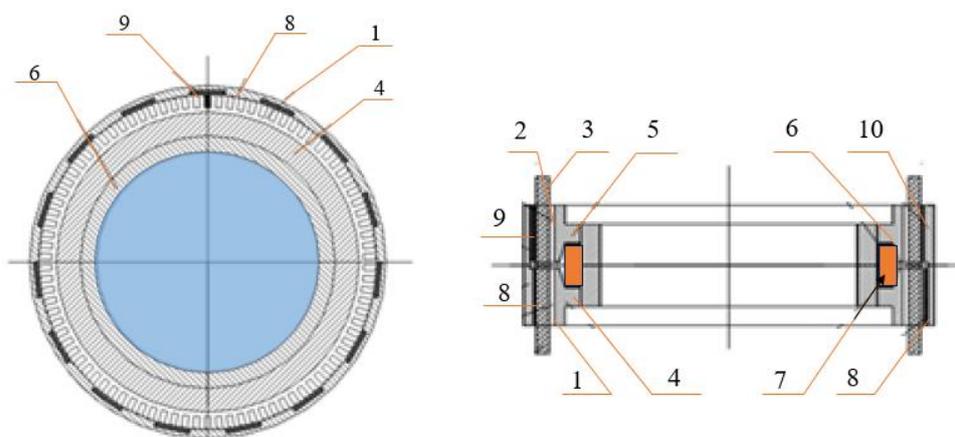


Рисунок.1.2. Эскиз генератора комбинированного возбуждения.

Генератор состоит из двух основных частей: статора и ротора. Статор содержит шихтованные из электротехнической стали пакеты 1 и 2 с пазами. Пазы пакетов в осевом направлении совпадают. В пазах пакета расположена многофазная обмотка 3. Пакеты крепятся к массивным частям магнитопровода 4 и 5. Части 4 и 5 напрессованы на втулку 6. Между

пакетами магнитопровода расположена неподвижная обмотка возбуждения 7. Ротор генератора расположен снаружи статора. Он имеет массивный ферромагнитный полюс 8 и постоянные магниты 9 и 10. Постоянные магниты и полюса чередуются друг с другом и расположены по кругу. Они образуют два кольца, которые охватывают пакеты 1 и 2. Кольца индуктора расположены таким образом, что в осевом направлении напротив полюса 8 расположен постоянный магнит 9 или 10. Магниты 9 и 10 имеют радиальную намагниченность, при этом в одном кольце магниты имеют "южную" намагниченность 9 на поверхности, обращенной к пакету, в другом кольце - "северную" намагниченность 10.

Генератор работает следующим образом. Когда обмотка возбуждения 7 питается постоянным током, она создает магнитный поток, который замыкается по пути: пакет 1, воздушный зазор, массивный полюс 8 первого кольца, задняя часть ротора, массивный полюс 8 второго кольца, воздушный зазор, пакет 2, магнитопровод 5, втулка 6, магнитопровод 4.

Магнитный поток, который создается постоянными магнитами, замыкается по следующему пути: пакет 1, воздушный зазор, «южный магнит» 9, задняя часть ротора, «северный магнит» 10, воздушный зазор, пакет 2, магнитопровод 5, втулка 6, магнитопровод 4 [61].

Направление магнитного потока от постоянных магнитов не меняется, соответственно не меняется ЭДС вращения, наводимая этим потоком.

Направление потока от обмотки возбуждения может меняться. Это зависит от полярности источника питания, к которому обмотка подключена. Соответственно, ЭДС вращения, наводимая от потока обмотки возбуждения, меняет знак и может быть добавлена к результирующей ЭДС или вычитаться из нее.

При изменении скорости вращения вала ротора величина и направление тока в обмотке возбуждения выбираются таким образом, чтобы результирующая ЭДС была постоянной. При этом амплитуда выходного напряжения генератора остается постоянной при изменении частоты

вращения в широком диапазоне, что необходимо для автономных источников питания [36].

Данная конструкция была взята в качестве базовой для проектирования гидрогенераторов малой и средней мощности, которые через выпрямитель работают на накопитель электроэнергии в виде аккумуляторных батарей и далее на инвертор, который преобразует постоянный ток в переменный со стандартными параметрами.

Следующими шагом исследования является разработка метода проектирования гидрогенераторов данного типа в соответствии с техническим заданием заказчика. Было принято решение отказаться от проектирования типового ряда гидрогенераторов, а проектировать изделия для конкретного места реки с конкретными параметрами по скорости течения и глубине погружения. Такой подход позволяет существенно повысить эффективность преобразования механической энергии потока воды в электрическую энергию, поскольку гидрогенератор можно оптимально спроектировать для конкретного места.

Выводы по главе 1

1. Сделан обзор водных ресурсов РФ и ближнего зарубежья и их гидроэнергетического потенциала. На основании обзора сделан вывод о том, что энергоемкость малых и средних рек, которую можно использовать на практике, в несколько раз превышает этот показатель для больших рек.

2. В качестве основного варианта исполнения выбрана мини-ГЭС, которая использует энергию свободного течения воды. Данный выбор обусловлен в основном требованиями экологии и эстетики для места расположения станции.

3. Для функциональной схемы выбран вариант мини-ГЭС, состоящий из генератора переменного тока, встроенного в него выпрямителя, преобразующего переменный ток в постоянный, накопителя электроэнергии

в виде аккумуляторной батареи, инвертора, преобразующего постоянный ток в стандартный переменный.

4. Из возможных вариантов исполнения генератора выбран генератор комбинированного возбуждения уникальной конструкции, на которую имеется патент РФ. Выбор типа генератора определяется возможностью регулирования выходного напряжения по цепи возбуждения, что во многом упрощает систему автоматизированного управления мини-ГЭС.

5. Для обеспечения гидроизоляции водопогружного генератора принято решение наполнить его маслом с применением компенсаторов давления. Такое решение технически оправдано, поскольку генератор имеет относительно низкую частоту вращения.

2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО РАСЧЕТА ВЕНТИЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА КОМБИНИРОВАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ЕГО ГЕОМЕТРИИ

Вводные замечания

Проектирование электрической машины, в особенности нестандартной электрической машины, должно пройти известные стадии развития, определенные стандартом с присвоением соответствующих литер конструкторской документации на каждой стадии: макетный образец, опытный образец, опытная партия, серийное изделие [29,78,95,128]. Данный цикл достаточно длителен, трудоемок и требует значительных финансовых затрат. Современное развитие методик расчета и вычислительных возможностей компьютерных систем позволяет во многом сократить сроки и затраты этого цикла. Один из вариантов такого ускорения – это создание цифровых двойников и отработка всех технических вопросов на этих двойниках. Перспективой развития этого направления является создание сквозных систем проектирования, которые минимизируют, а в некоторых случаях исключают бумажные твердые копии для сопровождающей производство конструкторской документации. Разработка идет по следующей технологической цепочке: техническое задание на разработку → оптимизация геометрии на основе упрощенной математической модели(синтез) → анализ изделия на основе технологии цифровых двойников → производство изделия на станках ЧПУ по разработанным твердотельным моделям.

Создание таких сквозных САД систем требуют длительной и кропотливой работы, но уже сегодня при разработке новых технических устройств необходимо учитывать эти тенденции.

Заложим этот принцип в методику проектирования предлагаемого вентильного генератора комбинированного возбуждения. Проектную систему по разработке данного генератора представим в виде двух

подсистем: подсистемы синтеза, в основу которой положим оптимальное проектирование геометрии по выбранным критериям, и подсистемы анализа, включая анализ электромагнитного и теплового состояния электрической машины.

Далее последовательно покажем шаги по разработке такой проектной системы.

2.1. Разработка методики и математической модели расчета магнитной системы с постоянным высококоэрцитивным магнитом для вентильного генератора комбинированного возбуждения

В настоящее время создать электромеханические устройства с высокими массоэнергетическими показателями невозможно без точных методов расчета полей и оптимизационных расчетов. При этом возникает следующее техническое противоречие. Точные электромагнитные расчеты требуют значительных вычислительных ресурсов и применения сложных программ, таких как Ansys, Cosmos, а методы оптимизации нуждаются в большом количестве циклов вычислений при выборе наилучших параметров. Включить тяжеловесные программы в оптимизационные циклы, не смотря на их точность, не представляется возможным из-за неприемлемого времени вычисления. Разрешить это противоречие можно только в одном случае: необходимо создать простую, но точную модель расчета магнитной системы, которую можно было бы использовать для оптимизации.

Кафедра теоретических основ электротехники ЮУрГУ с этой проблемой столкнулась много лет назад при разработке электроприводов для специальной техники. Все эти годы делались неоднократные попытки разработать простую, но приемлемую по точности методику расчета магнитных систем с высококоэрцитивными магнитами. Применялся метод по кривым возврата, метод граничной коллокации, метод планирования эксперимента и другие методы [31,44,45,49,54]. Все эти попытки приводили к удовлетворительному решению конкретных узких задач, но при включении

этих методов в оптимизационный цикл получался, как правило, отрицательный результат. Из-за погрешности расчета блок-оптимизатор часто выбирал нереальные для практики размеры. Например, из-за погрешности расчета потока рассеяния с боковой грани магнита, программа оптимизации часто выбирала высоту магнита из материала неодим-железобор более 300 мм. Такие магниты на практике не изготавливают из-за невозможности их качественного промагничивания. Следует отметить, что точность расчета магнитной системы очень важна, так как эти параметры в основном определяют энергетику системы (потери, тепловое состояние, КПД).

Таким образом, задача разработки простой, но достаточно точной методики расчета систем с постоянными магнитами до сих пор остается острой и актуальной. Анализ литературы [31-57] и практика оптимизации магнитоэлектрических систем позволяет утверждать, что решение данной задачи представляет научную новизну.

2.1.1. Постановка задачи

Магнитную систему практически всех электротехнических изделий можно привести к виду, представленному на рис. 2.1.

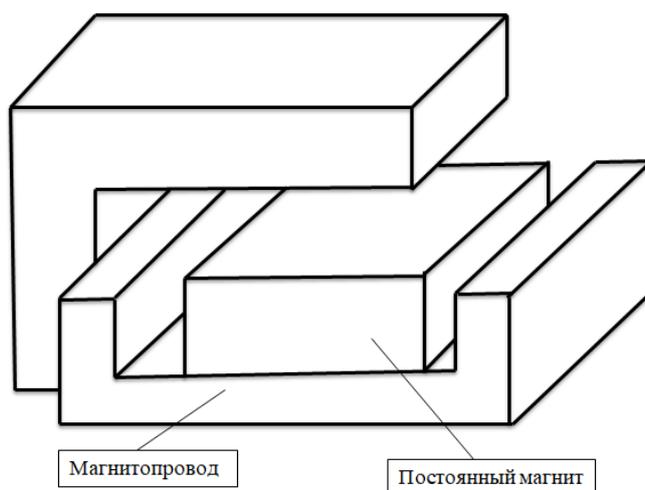


Рисунок. 2.1. Расчетная модель магнитной системы

Данная модель учитывает все особенности магнитного состояния системы: потоки в нейтральном сечении, потоки рассеяния, рабочий поток. Даже электрическую машину со сложной геометрией зубцовой зоны можно в первом приближении привести к указанной расчетной схеме. Это можно объяснить тем, что основное сопротивление магнитному потоку для ненасыщенных и слабо насыщенных магнитных систем представляет воздушный зазор.

Если идти по пути дальнейшего упрощения, то можно перейти от трехмерной задачи к плоской задаче, которая представлена на рис. 2.2.

На рис. 2.2 показаны следующие размеры:

h_m – высота магнита;

b_m – ширина магнита;

h_j – толщина магнитопровода;

δ – расстояние между торцевой гранью магнита и магнитопроводом;

δ – воздушный зазор.

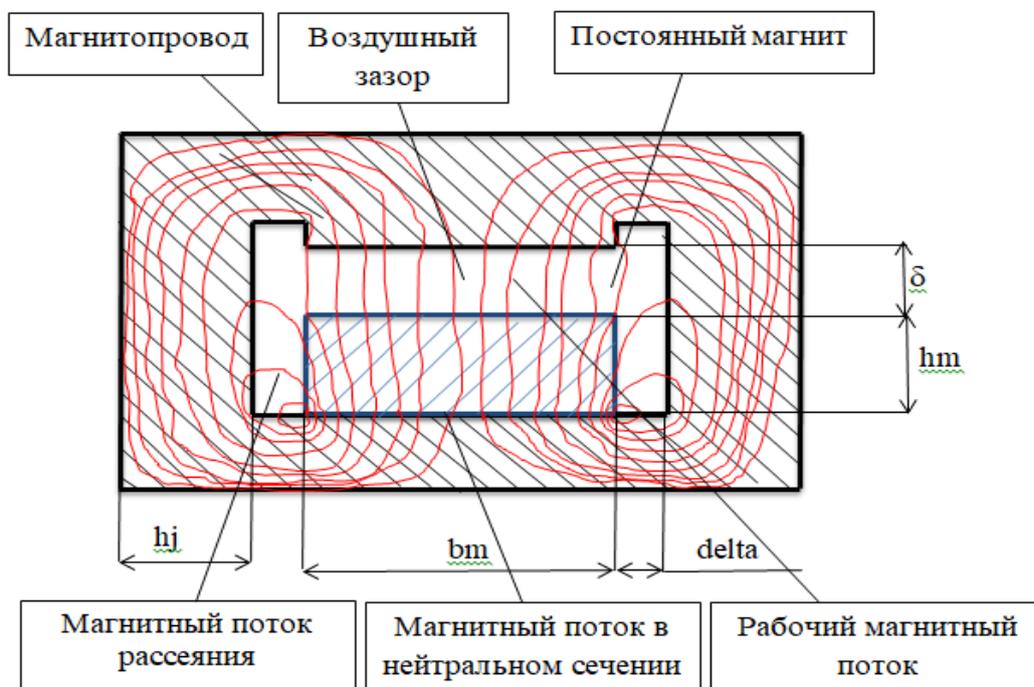


Рисунок. 2.2. Плоский вариант расчетной задачи

Как было отмечено выше, наиболее надежным и проверенным на практике методом расчета магнитных систем является метод конечных элементов [8,9,162,182]. Но применение данного метода содержит следующее противоречие: использование большого количества элементов повышает точность расчета, но делает применение этого метода громоздким и неприемлемым для формирования системы уравнений вручную. С другой стороны, малое количество элементов недопустимо огрубляют задачу и не позволяют получить требуемую для практики точность.

Для решения поставленной задачи было принято простое, но достаточно эффективное решение. Путем нескольких тестовых вычислений для достаточно большого количества разнообразных магнитных систем было выбрано количество элементов, обеспечивающих требуемую точность расчета и позволяющих сформировать систему уравнений вручную. Эти уравнения были первоначально заложены и проверены в программе Mathcad, а затем переведены на программный язык высокого уровня Delphi для проведения оптимизационных расчетов различных магнитных систем. Для указанных программ были сформированы инженерные методики расчета для учебного процесса и научных исследований.

2.1.2. Использование метода конечных элементов для построения математической модели

Метод конечных элементов для расчета магнитных полей основан на аппроксимации векторного магнитного потенциала дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей, называемых конечными элементами (КЭ). Плоскопараллельные краевые задачи используют декартову систему координат. Внутри каждого элемента векторный магнитный потенциал можно представить в виде интерполяционного полинома первой степени (рис.2.3)

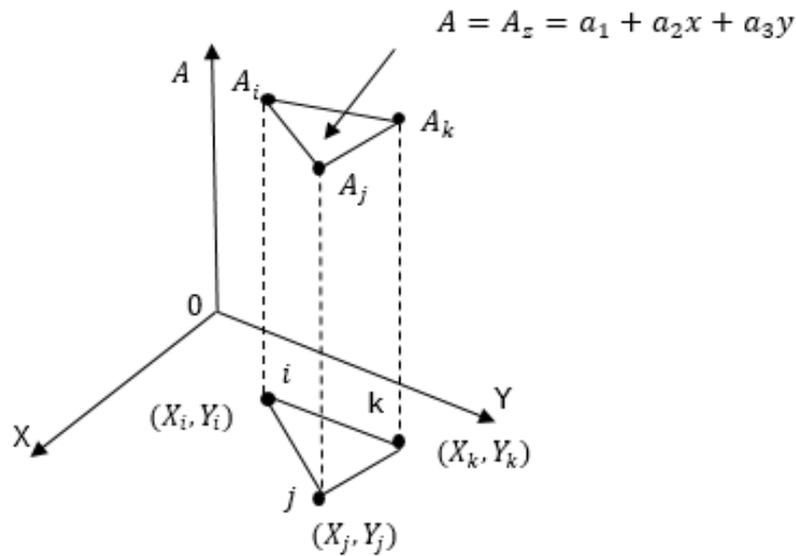


Рисунок. 2.3. Представление векторного магнитного потенциала для одного элемента

Примем нумерацию узлов в элементе i, j, k против часовой стрелки. Узловые значения потенциала обозначим через A_i, A_j, A_k , а координаты узлов соответственно $(X_i, Y_i), (X_j, Y_j), (X_k, Y_k)$. Подстановка в интерполяционный полином приводит к системе уравнений.

$$\begin{aligned}
 A_i &= \alpha_1 + \alpha_2 X_i + \alpha_3 Y_i \\
 A_j &= \alpha_1 + \alpha_2 X_j + \alpha_3 Y_j, \\
 A_k &= \alpha_1 + \alpha_2 X_k + \alpha_3 Y_k
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

В результате решения системы уравнений можно определить коэффициенты.

$$\begin{aligned}
 \alpha_1 &= \frac{1}{2S_a} \left[(X_j Y_k - X_k Y_j) A_i + (X_k Y_i - X_i Y_k) A_j + (X_i Y_j - X_j Y_i) A_k \right] \\
 \alpha_2 &= \frac{1}{2S_a} \left[(Y_j - Y_k) A_i + (Y_k - Y_i) A_j + (Y_i - Y_j) A_k \right], \\
 \alpha_3 &= \frac{1}{2S_a} \left[(X_k - X_j) A_i + (X_i - X_k) A_j + (X_i Y_j - X_j Y_i) A_k \right]
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

Площадь элемента S_a можно определить из матричного соотношения.

$$S_a = 0.5 \cdot \begin{vmatrix} 1 & X_i & Y_i \\ 1 & X_j & Y_j \\ 1 & X_k & Y_k \end{vmatrix}, \quad (2.3)$$

Подставляя значения коэффициентов в интерполяционный полином, можно записать выражение для функции векторного магнитного потенциала через три функции формы по одной для каждого узла.

$$A = N_i A_i + N_j A_j + N_k A_k, \quad (2.4)$$

Для каждого узла функция формы выглядит следующим образом:

$$N_i = \frac{1}{2S_a} (a_i + b_i x + c_i y) \quad (2.5)$$

$$a_i = X_j Y_k - X_k Y_j, \quad b_i = Y_j - Y_k, \quad c_i = X_k - X_j,$$

$$N_j = \frac{1}{2S_a} (a_j + b_j x + c_j y) \quad (2.6)$$

$$a_j = X_k Y_i - X_i Y_k, \quad b_j = Y_k - Y_i, \quad c_j = X_i - X_k,$$

$$N_k = \frac{1}{2S_a} (a_k + b_k x + c_k y) \quad (2.6)$$

$$a_k = X_i Y_j - X_j Y_i, \quad b_k = Y_i - Y_j, \quad c_k = X_j - X_i,$$

Решение краевой задачи теории поля методом конечных элементов производится на основе вариационного исчисления. С вариационной точки зрения решение дифференциального уравнения в частных производных с заданными граничными условиями эквивалентно нахождению минимума энергетического функционала.

$$F = \int_s \left(\int_0^{B_x} \frac{1}{\mu} B_x dB_x + \int_0^{B_y} \frac{1}{\mu} B_y dB_y \right) ds - \int_s A J ds, \quad (2.6)$$

где $B_x = \frac{\partial A}{\partial y}$, $B_y = -\frac{\partial A}{\partial x}$ - составляющие вектора магнитной индукции поля, распределенного в области S по осям X и Y.

Записав условие минимума функционала, являющегося функцией значений A_i, A_j, A_k на каждом конечном элементе, получим систему алгебраических уравнений для определения значений векторного потенциала в узлах треугольников, которыми покрывается расчетная область.

$$\begin{aligned}\frac{\partial F^{(\alpha)}}{\partial A_i} &= \frac{1}{4\mu S_a} \left[(c_i^2 + b_i^2) A_i + (c_i c_j + b_i b_j) A_j + (c_i c_k + b_i b_k) A_k \right] - j \frac{S_\alpha}{2} = 0 \\ \frac{\partial F^{(\alpha)}}{\partial A_j} &= \frac{1}{4\mu S_a} \left[(c_i c_j + b_i b_j) A_i + (c_j^2 + b_j^2) A_j + (c_j c_k + b_j b_k) A_k \right] - j \frac{S_\alpha}{2} = 0, \quad (2.7) \\ \frac{\partial F^{(\alpha)}}{\partial A_k} &= \frac{1}{4\mu S_a} \left[(c_i c_k + b_i b_k) A_i + (c_j c_k + b_j b_k) A_j + (c_k^2 + b_k^2) A_k \right] - j \frac{S_\alpha}{2} = 0\end{aligned}$$

На основе полученных уравнений для каждого конечного элемента (треугольника) образуется система алгебраических уравнений, решение которой дает значения векторного магнитного потенциала A в вершинах треугольников.

2.1.3. Построение математической модели расчета

Для построения модели расчета воспользуемся осевой симметрией. Для анализа возьмем зеркальную половину системы. Как отмечалось выше, предварительный анализ показал, что с достаточной погрешностью расчета исследуемую область можно разбить на 60 элементов (рис. 2.4). Число узлов при этом составит 42.

Для упрощения построения расчётной матрицы нумерация узлов, начиная с нулевого номера, была принята таким образом, чтобы граничные узлы остались на внешнем контуре. В дальнейшем это упростило формирование глобальной матрицы. Обход узлов в элементе был задан против часовой стрелки. Нумерация элементов была принята в произвольном порядке. В качестве варьируемых параметров системы были приняты: высота магнита, ширина магнита, величина воздушного зазора, расстояние от боковой грани магнита до магнитопровода, толщина магнитопровода. В качестве изменяемых переменных были введены магнитная проницаемость

магнитопровода, остаточная индукция магнита, коэрцитивная сила магнита. В качестве константы была введена магнитная проницаемость воздуха.

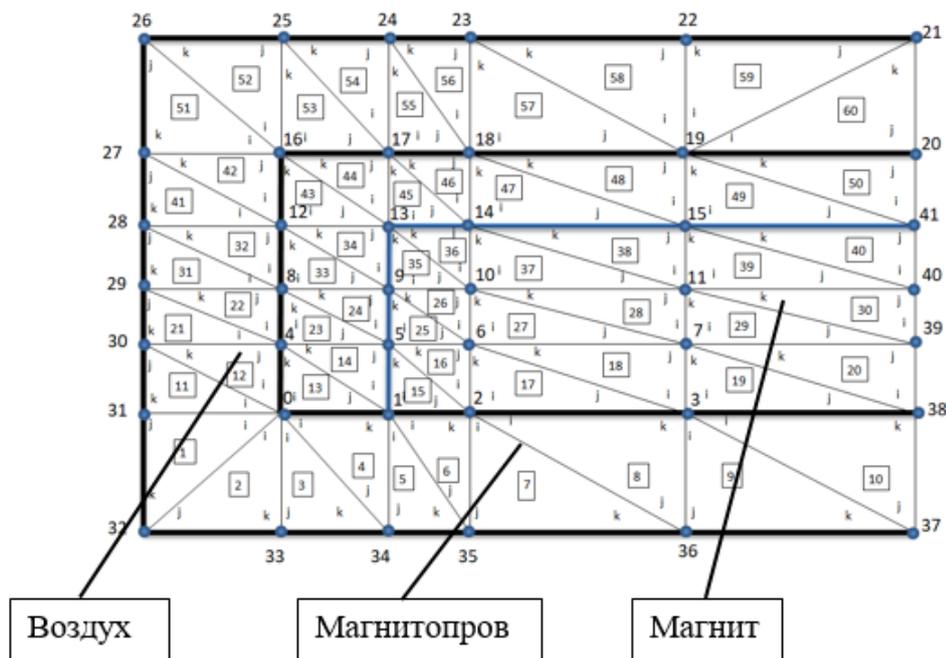


Рисунок. 2.4. Разбиение магнитной системы на конечные элементы

На первом этапе построения модели были определены координаты узлов через варьируемые параметры геометрии системы. Таким образом, при изменении размеров магнитной системы изменялись только размеры элементов, количество элементов и узлов при этом оставалось заданным (60 элементов, 42 узла). Далее были заданы размеры матрицы жесткости (20,20) и линейного вектора свободных членов (20), которые на начальном этапе были обнулены. Затем был составлен алгоритм для определения элементов локальной матрицы жесткости. По этому алгоритму были определены элементы всех локальных матриц жесткости. Элементы глобальной матрицы жесткости были получены путем сложения значений локальных элементов. Намагниченность постоянного магнита была учтена плотностью тока элементов 15, 25 и 35, которая рассчитывалась через коэрцитивную силу магнитного материала и высоту магнита. В общей сложности при формировании локальных матриц и глобальной матрицы необходимо было сформировать вручную 483 уравнения. Столь объемная задача оказалась не

очень сложной, поскольку линейные алгебраические уравнения достаточно просты и однотипны. Для решения системы уравнений был использован метод Гаусса, который в виде стандартной процедуры заложен в Mathcad и Delphi.

Фрагмент реализации методики в программе Mathcad представлен ниже. Показаны вычисления для наиболее характерного 15-го элемента, так как он содержит материал постоянного магнита.

Элемент 15

Магнитная проницаемость элемента:

$$\mu_i := \mu_{mag} = 1.236 \cdot 10^{-6}, \quad (2.8)$$

Нумерация узлов 15 элемента:

$$\mu_{yi} := 1; \quad \mu_{yj} := 2; \quad \mu_{yk} := 5. \quad (2.9)$$

Обнуление локальной матрицы:

$$aa := aa(\quad (2.9)$$

Координаты узлов элемента:

$$\begin{aligned} X_i &:= x_{\mu_{yi}} & Y_i &:= y_{\mu_{yi}} \\ X_j &:= x_{\mu_{yj}} & Y_j &:= y_{\mu_{yj}}, \\ X_k &:= x_{\mu_{yk}} & Y_i &:= y_{\mu_{yk}} \end{aligned} \quad (2.10)$$

Площадь элемента:

$$S = 0.5 \cdot \begin{vmatrix} 1 & X_i & Y_i \\ 1 & X_j & Y_j \\ 1 & X_k & Y_k \end{vmatrix}, \quad (2.11)$$

Коэффициенты для вычисления локальной матрицы жесткости:

$$\begin{aligned}
C_i &:= X_k - X_j & B_i &:= Y_j - Y_k \\
C_j &:= X_i - X_k & B_j &:= Y_k - Y_i, \\
C_k &:= X_j - X_i & B_k &:= Y_i - Y_j
\end{aligned} \tag{2.12}$$

Определение элементов локальной матрицы жесткости:

$$\begin{aligned}
aa_{nyi,nyi} &:= \frac{1}{4 \cdot \mu u \cdot S} (Ci^2 + Bi^2) \\
aa_{nyi,nyj} &:= \frac{1}{4 \cdot \mu u \cdot S} (Ci \cdot Cj + Bi \cdot Bj) \\
aa_{nyi,nyk} &:= \frac{1}{4 \cdot \mu u \cdot S} (Ci \cdot Ck + Bi \cdot Bj) \\
aa_{nyj,nyi} &:= \frac{1}{4 \cdot \mu u \cdot S} (Ci \cdot Cj + Bi \cdot Bj) \\
aa_{nyj,nyj} &:= \frac{1}{4 \cdot \mu u \cdot S} (Cj^2 + Bj^2) \\
aa_{nyj,nyk} &:= \frac{1}{4 \cdot \mu u \cdot S} (Cj \cdot Ck + Bj \cdot Bk) \\
aa_{nyk,nyj} &:= \frac{1}{4 \cdot \mu u \cdot S} (Ci \cdot Ck + Bi \cdot Bk) \\
aa_{nyk,nyk} &:= \frac{1}{4 \cdot \mu u \cdot S} (Cj \cdot Ck + Bj \cdot Bk) \\
aa_{nyk,nyk} &:= \frac{1}{4 \cdot \mu u \cdot S} (Ck^2 + Bk^2) \quad ,
\end{aligned} \tag{2.13}$$

Формирование вектора свободных членов:

$$b_{nyi} := \frac{Hc}{3}, \quad b_{nyj} := \frac{Hc}{3}, \quad b_{nyk} := \frac{Hc}{3}. \tag{2.14}$$

Сложение элементов локальной матрицы жесткости с элементами глобальной матрицы жесткости.

$$a := a + aa, \tag{2.15}$$

После формирования глобальной матрицы жесткости и глобального вектора свободных членов система уравнений составлена и может быть решена относительно магнитных потенциалов в узлах элементов.

$$A := a^{-1} \cdot b, \quad (2.16)$$

Через значения магнитных потенциалов в узлах элементов можно определить все характеристики магнитной системы.

Средняя индукция в воздушном зазоре:

$$B_{delta} := \frac{A_{17}}{0.5 \cdot bm}, \quad (2.17)$$

Средняя индукция на поверхности магнита:

$$B_{delta} := \frac{A_{13}}{0.5 \cdot bm}, \quad (2.18)$$

Средняя индукция в нейтральном сечении магнита:

$$B_{mag} := \frac{A_1}{0.5 \cdot bm}, \quad (2.19)$$

Магнитный поток:

$$F_{mag} := A_{13}. \quad (2.20)$$

Для проверки точности расчета разработанной методики она сравнивалась с решением задач копий в программе Ansys Electronics Desktop, которая осуществляет автоматическую разбивку области расчета на несколько тысяч элементов. Результаты одной из таких проверок приведены в приложении 2.

Погрешность по определению средней индукции в воздушном зазоре для различных магнитных систем составила 1.5 %, что является очень хорошим результатом для инженерных расчетов. Следует отметить, что время решения всех тестовых задач составило доли секунды, в отличие от

работы программы Ansys Electronics Desktop, которая занимала около 2 минут. Следует понимать, что при насыщении магнитной системы погрешность расчета будет повышаться, так как магнитная проницаемость элементов со стальными участками в модели задается постоянной, равной проницаемости стали на колене кривой намагничивания. Но магнитная система гидрогенератора слабо насыщена. Для нее важно учесть потоки рассеяния, что представленная модель делает достаточно точно.

Таким образом, поставленная задача разработки простой, но точной методики расчета магнитных систем с постоянными магнитами, которую можно использовать для оптимизации с большим циклом итераций, достигнута. Система из 483 линейных алгебраических уравнений, которые составляют основу математической модели расчета магнитной системы, не представляет сложность перебора в оптимизационных циклах для современной вычислительной техники.

Этот новый подход может быть использован для решения подобных задач из других сфер научной деятельности: гидродинамики, аэродинамики, теплодинамики, динамики напряжений.

2.2. Разработка математической модели расчета магнитной цепи вентильного генератора комбинированного возбуждения.

Особенность генератора комбинированного возбуждения заключается в конфигурации магнитной цепи. Физически смешать магнитные потоки обмотки возбуждения и постоянных магнитов невозможно. Постоянные магниты не пропускают через свой объем «чужой» магнитный поток. Поэтому магнитные потоки от обмотки возбуждения и от постоянных магнитов замыкаются по своим маршрутам. Результирующая ЭДС в обмотке якоря складывается от частей ЭДС активной части обмотки паза. ЭДС этих частей может складываться друг с другом, а может вычитаться в зависимости от направления магнитного потока от обмотки возбуждения. Такая сложная магнитная цепь требует разработки специальной модели расчета, которая

приведена ниже. На рис. 2.5. показана магнитная цепь генератора комбинированного возбуждения.

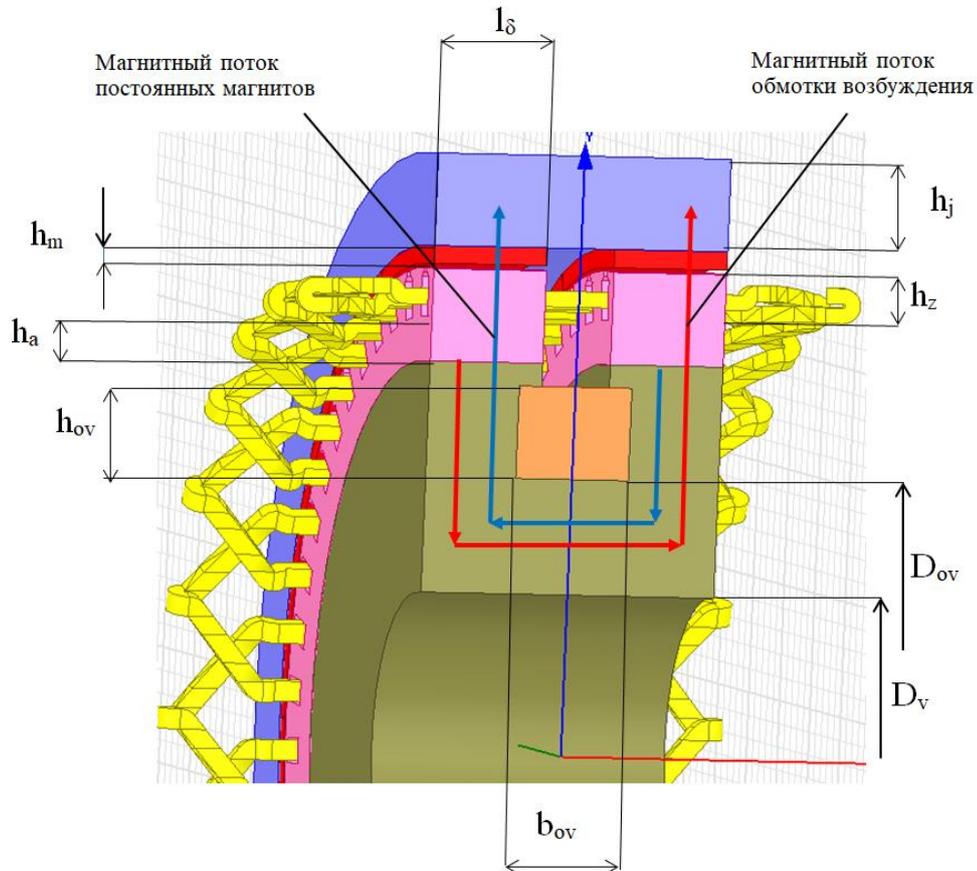


Рисунок. 2.5. Магнитная цепь генератора комбинированного возбуждения.

На рисунке изображен режим работы генератора, когда ЭДС от двух источников возбуждения складываются. Приведем модель расчета магнитной цепи генератора на основе метода схем замещения по участкам магнитной цепи. В стандартных участках расчет ведется по традиционной методике [7,13,14,75,95,159]. Особенность построения расчетной модели определяется специфическими участками магнитной цепи.

2.2.1. Воздушный зазор

Намагничивающая сила воздушного зазора (учитываем 2 воздушных зазора на пути магнитного потока) (A):

$$F_{\delta} = \frac{2B_{\delta}\delta}{\mu_0}. \quad (2.21)$$

2.2.2. Зубец обмотки якоря

Минимальная индукция в зубце (Тл):

$$B_{z\min} = \frac{B_{\delta}t_1}{k_c(t_1 - b_{\Pi})}, \quad (2.22)$$

где t_1 - зубцовое деление (м); b_{Π} - ширина прямоугольного паза;
 k_c – коэффициент заполнения пакета сталью.

Средняя индукция в зубце (Тл):

$$B_{zc} = \frac{B_{\delta}t_1}{k_c\left(\frac{D - h_z}{z} - b_{\Pi}\right)}, \quad (2.23)$$

где h_z - высота зубца паза якоря.

Максимальная индукция в зубце:

$$B_{zc} = \frac{B_{\delta}t_1}{k_c\left(\frac{\pi(D - zh_z)}{z} - b_{\Pi}\right)}, \quad (2.24)$$

Усредненная индукция в зубце по формуле Симпсона [95]:

$$B_{cp} = \frac{B_{z\min} + 4B_{zc} + B_{z\max}}{6}, \quad (2.25)$$

Намагничивающая сила зубца якорной обмотки (учитываем 2 зубца на пути магнитного потока) (А):

$$F_z = 2H(B_{cp})h_z, \quad (2.26)$$

где $H(B_{cp})(A/m)$ - напряженность в стали зубца от усредненной индукции.

2.2.3. Спинка якоря

Средняя индукция в спинке якоря:

$$B_{\alpha} = \frac{\alpha_{\delta} \tau B_{\delta}}{k_c \left(\frac{\pi (D - 2h_z - h_a)}{2p} - b_{\Pi} \right)}, \quad (2.27)$$

где α_{δ} -коэффициент полюсной дуги; τ (м)- полюсное деление; h_a (м)- высота спинки якоря; $2p$ -число полюсов.

Намагничивающая сила спинки якоря (учитываем 2 участка спинки на пути магнитного потока) (А):

$$F_a = 2H(B_a)h_a. \quad (2.28)$$

где $H(B_a)$ (А/м) - напряженность в спинке статора от усредненной индукции в этой части магнитопровода.

2.2.4. Торцевая часть магнитопровода якоря

Рассчитаем пессимистичную картину напряженности магнитного поля на этом участке, считая, что максимальная индукция в сечении этого участка будет создавать намагничивающую силу на протяжении всей цепи этого участка.

Минимальная площадь поперечного сечения торцевой части магнитопровода (м²):

$$S_{\text{mintorza}} = \pi (D - 2h_z - 2h_a - 2h_{kr} - 2h_{ov}) b_{\text{torza}}; \quad (2.28)$$

h_{kr} – высота кромки обмотки возбуждения (м); h_{ov} – высота обмотки возбуждения (м); b_{torza} – ширина торцевой части магнитопровода якоря (м).

Индукция в торцевой части магнитопровода якоря (м):

$$B_{\text{torzaancor}} = \frac{\alpha_{\delta} r B_{\delta} 2p}{S_{\text{mintorza}}}. \quad (2.29)$$

Намагничивающая сила торца магнитопровода якоря (учитываем 2 участка торца магнитопровода якоря на пути магнитного потока) (А):

$$F_{torzaancor} = H (B_{torzaancor} - 2h_z - 2h_a - 2h_{kr} - 2h_{ov}), \quad (2.30)$$

где $H(B_{torza})$ (А/м) – напряженность в торце магнитопровода от максимальной индукции в этой части магнитопровода.

2.2.5. Осевая часть магнитопровода якоря

В этой части магнитопровода поток от обмотки возбуждения направлен встречно потоку в обмотке якоря, когда результирующую ЭДС надо усилить, и направлен согласно, когда результирующую ЭДС надо ослабить. Рассчитаем пессимистичную картину, когда потоки идут согласно и складываются.

Индукция в осевой части магнитопровода:

$$B_{existancor} = \frac{\alpha_\delta r B_\delta 2p}{\frac{\pi}{4} (D_{ov}^2 - D_v^2)}. \quad (2.31)$$

Намагничивающая сила осевой части магнитопровода якоря (А):

$$F_{existancor} = H (B_{existancor}) (2L_\delta + \Delta l), \quad (2.32)$$

где Δl – расстояние между пакетами якоря (м); $H(B_{existpart})$ – напряженность в осевой части магнитопровода якоря от индукции в этой части магнитопровода

2.2.6. Постоянный магнит

Намагничивающая сила постоянного магнита рассчитывается по методике, приведенной в параграфе 2.1.

2.2.7. Вкладыш магнитопровода индуктора

Среднюю индукцию во вкладыше магнитопровода примем равной индукции в воздушном зазоре.

Намагничивающая сила вкладыша магнитопровода индуктора (учитываем 2 участка вкладыша магнитопровода индуктора на пути магнитного потока) (А):

$$F_{\text{mind}} = 2H(B_{\delta})h_m, \quad (2.32)$$

где h_m – высота магнита (м); $H(B_{\delta})$ - (А/м) – напряженность во вкладыше магнитопровода индуктора от индукции в этой части магнитопровода.

2.2.8. Осевая часть магнитопровода индуктора

В этой части магнитопровода поток от обмотки возбуждения направлен встречно потоку в обмотке якоря, когда результирующую ЭДС надо усилить и направлен согласно, когда результирующую ЭДС надо ослабить. Рассчитаем пессимистичную картину, когда потоки идут согласно и складываются.

Индукция в осевой части магнитопровода индуктора (Тл):

$$B_{\text{existind}} = \frac{\alpha_{\delta} r B_{\delta} 2p}{\frac{\pi^2}{4} \left((D + 2\delta + 2h_m + h_j)^2 - (D + 2\delta + 2h_m)^2 \right)}, \quad (2.33)$$

где h_j – высота спинки индуктора.

Намагничивающая сила осевой части магнитопровода (А):

$$F_{\text{existind}} = H(B_{\text{existind}})(2l_{\delta} + \Delta l), \quad (2.34)$$

$H(B_{\text{existind}})$ (А/м) – напряженность в осевой части магнитопровода индуктора от индукции в этой части магнитопровода.

2.2.9. Суммарная намагничивающая сила магнитной цепи генератора комбинированного возбуждения (А):

$$F_{\Sigma} = F_{\delta} + F_z + F_{\alpha} + F_{\text{atozaancor}} + F_{\text{existancor}} + F_{\text{mind}} + F_{\text{existind}}. \quad (2.35)$$

Намагничивающая сила обмотки якоря и намагничивающая сила постоянного магнита должны самостоятельно преодолеть эту суммарную намагничивающую силу магнитопровода генератора комбинированного возбуждения с учетом реакции якоря при нагрузке. Математическая модель расчета магнитной цепи представляет собой последовательность этих вычислений.

2.3. Разработка математической модели электромагнитного расчета вентильного генератора комбинированного возбуждения.

Под математической моделью расчета будем понимать совокупность уравнений и неравенств, описывающих основные электромагнитные процессы генератора. Уравнения связывают геометрические размеры и параметры применяемых материалов с показателями качества электрической машины. Математическая модель должна иметь входные параметры, которые задаются для расчетных уравнений, и выходные параметры, которые получаются по результатам расчета. Следует иметь в виду, что математическая модель должна разрабатываться с учетом ее последующего включения в большое число циклов оптимизации геометрических размеров, поэтому она должна быть максимально упрощена. В основу построения математической модели положим хорошо апробированный метод схем замещения [95].

Следует отметить, что точность математической модели во многом зависит от погрешности расчета параметров магнитного поля (индукции в воздушном зазоре, магнитного потока, коэффициента насыщения, коэффициента рассеяния). Разработанная методика расчета постоянного магнита позволяет решить эту задачу с высокой точностью. Математическая модель расчета магнитной системы по этой методике была заложена в модель электромагнитного расчета электродвигателя.

Входные параметры разделим на три независимые группы:

1. Константы. Это параметры, которые не меняются для данной проектной ситуации. Как правило, это исходные данные технического задания на проектирование (номинальная мощность, номинальное напряжение, номинальная частота вращения и т. д.).

2. Ограничения. Это параметры, которые нельзя нарушать. Ограничения на модель могут наложить технологические службы (минимальная и максимальная высота магнита, минимальная ширина зубца, минимальная высота спинки, минимальный воздушный зазор), условия эксплуатации (максимально допустимый нагрев обмотки по выбранному классу изоляции, максимально допустимый нагрев постоянного магнита по условиям размагничивания) или заданная точность расчета параметров.

3. Независимые переменные. Это параметры, которые могут варьироваться независимо друг от друга в допустимых пределах. Как правило, это геометрические размеры якоря и индуктора.

Выходными параметрами математической модели являются показатели, полученные по результатам расчета, которые определяют качество спроектированной машины. Как правило, это массогабаритные или энергетические характеристики. Их выбор определяется конкретной проектной ситуацией.

2.3.1. Входные параметры математической модели

В качестве входных параметров выделим следующие величины:

2.3.1.1. Константы

- номинальная выходная мощность P_{2n} (Вт);
- номинальная частота вращения n_n (об/мин);
- номинальное фазное напряжение U_n (В);
- число фаз m ;
- воздушный зазор δ (м);
- число пазов на полюс и фазу q ;
- коэффициент заполнения обмотки якоря медью $k_{\text{ЗМСП}}$;

- коэффициент формы поля k_B ;
- характеристики материала постоянного магнита
остаточная индукция B_r (Тл);
коэрцитивная сила H_c (А/м).

Часть констант задается техническим заданием заказчика, остальные параметры определяются практикой проектирования электрических машин этого типа.

2.3.1.2. Ограничения

Ограничения можно разделить на два типа: ограничения, определяемые точностью расчета параметров математической модели, и ограничения, обусловленные технологией изготовления и режимом работы:

- допустимая погрешность расчета коэффициента ЭДС в якоре \mathcal{E}_{kedon} ;
- допустимая погрешность расчета КПД $\mathcal{E}_{\eta don}$;
- минимальная высота постоянного магнита;
- максимально-допустимая температура обмотки якоря и обмотки возбуждения;
- максимальная плотность тока в обмотке якоря;
- максимальная индукция в зубце якоря;
- максимальная индукция в спинке якоря;
- максимальная индукция в спинке индуктора;
- максимальная индукция в торцевых частях магнитопровода якоря.

Эти ограничения зависят от применяемых материалов и технологических возможностей предприятия.

2.3.1.3. Независимые переменные

Габаритные размеры и энергетические параметры электрической машины во многом зависят от выбора электромагнитных нагрузок: линейной нагрузки якоря и индукции в воздушном зазоре. Традиционно эти параметры выбираются из практики проектирования серийных электрических машин в

зависимости от расчетной мощности [95]. В условиях, когда проектируется уникальный генератор и информация об этих параметрах отсутствует, имеет смысл включить эти величины в независимые переменные для оптимизационного цикла. Оптимальные значения этих параметров определяют ограничения, представленные выше.

Кроме этого, в качестве независимых переменных выступают размеры, которые однозначно определяют геометрию электродвигателя. Они тоже будут включены в процедуру оптимального перебора.

Таким образом, в качестве независимых переменных для математической модели следует выбрать следующие параметры:

- линейная нагрузка A_{lin} (А/м);
- индукция в воздушном зазоре B_δ (Тл);
- число пар полюсов p ;
- диаметр расточки якоря D_a (м);
- внутренний диаметр генератор D_a (м);
- ширина паза якоря (м);
- высота постоянного магнита (м).

Остальные размеры и параметры являются зависимыми друг от друга или от ограничений и определяются в процессе последовательного расчета в математической модели.

2.3.1.4. Выходные параметры математической модели

Выходные параметры математической модели должны представлять собой критерии, по которым осуществляется выбор оптимального варианта. Следует отметить, что в наиболее общей постановке генератор должен одновременно удовлетворять нескольким критериям. В качестве таких критериев могут выступать энергетические показатели (КПД, коэффициент мощности, удельная мощность), экономические показатели (себестоимость, технологичность), показатели надежности. Все они находятся в противоречивой зависимости друг от друга, то есть, улучшение одного

показателя достигается за счет ухудшения другого. Существуют методы решения многокритериальных задач, но практика показывает, что их целесообразно применять, когда изделие достигло определенной стадии развития и уже достаточно хорошо изучено. В нашем случае мы имеем инновационную разработку, по этой причине в дальнейшем будет рассмотрена однокритериальная оптимизация, то есть в качестве критерия будет выбираться только один параметр. Этот параметр каждый раз будет меняться в зависимости от конкретной проектной ситуации. Для обеспечения гибкости проектной системы математическая модель должна включать в себя по возможности наибольшее количество таких критериев оптимальности.

В разрабатываемую математическую модель включены следующие показатели качества, которые являются ее выходными параметрами:

- масса активных частей (масса меди + масса постоянных магнитов + масса железа магнитопровода) (кг);
- масса постоянных магнитов (кг);
- объем электрической машины, определенный по активным частям (куб.м).

Данные показатели качества подтвердили свою актуальность на практике.

2.4. Алгоритм математической модели расчета ВГКВ

За основу математической модели возьмем метод схем замещения [95]. При разработке модели учтем особенности магнитной цепи ВГКВ. Математическую модель расчета генератора представим в виде последовательных алгоритмических шагов.

1. Ввод исходных данных.

В качестве исходных данных являются перечисленные выше константы, ограничения и независимые переменные.

Задаемся предварительными значениями КПД ($\eta_{\text{пред}}$), коэффициента ЭДС ($k_{\text{спред}}$) и коэффициента мощности нагрузки $\cos(\varphi)$.

2. Определение номинальной величины фазного тока для обмотки, соединенной в звезду (А):

$$I_a = \frac{P_H}{\sqrt{3} \cdot U \cdot f_n \cdot \eta \cdot \cos(\varphi)}, \quad (2.36)$$

где P_H – номинальная мощность; U_{fH} – номинальное фазное напряжение; η – предварительное значение КПД.

3. Расчетная (электромагнитная) мощность (Вт):

$$P_{pac} = \frac{P_H k_e}{\eta \cdot \cos(\varphi)}. \quad (2.37)$$

4. На этом шаге в зависимости от проектной ситуации:

- если задан диаметр расточки якоря, то рассчитывается активная длина пакета якоря (м):

$$L_\delta = \frac{60 P_{pac}}{\pi^2 \alpha_\delta k_b k_{об} A B_\delta D^2 n_{ном}}, \quad (2.38)$$

где α_δ – коэффициент полюсной дуги; k_b – коэффициент формы поля; $k_{об}$ – обмоточный коэффициент; A – линейная нагрузка (А/м) (задается как независимая переменная); B_δ – индукция в воздушном зазоре (Тл) (задается как независимая переменная); D – диаметр расточки якоря (м) (задается как независимая переменная); $n_{ном}$ – номинальная частота вращения (об/мин);

- если задана активная длина пакета якоря, то рассчитывается диаметр расточки якоря (м):

$$D = \sqrt{\frac{60 P_{pac}}{\pi^2 \alpha_\delta k_b k_{об} A B_\delta L_\delta n_{ном}}}, \quad (2.39)$$

- если заданы диаметр расточки и длина пакета якоря, то рассчитывается электромагнитная мощность в этих габаритах (Вт):

$$P_{рас} = \frac{\pi^2}{60} \alpha_{\delta} k_b k_{об} A B_{\delta} D^2 L_{\delta} n_{ном}. \quad (2.40)$$

5. Полюсное деление (м):

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}, \quad (2.41)$$

где p – где число пар полюсов задается как независимая переменная.

6. Число зубцов:

$$z_1 = 2p q m. \quad (2.42)$$

7. Зубцовое деление (м):

$$t_1 = \frac{\pi D}{z_1}, \quad (2.43)$$

8. Высота пазово – зубцовой зоны (м) (формула учитывает 120 – градусную двухполупериодную коммутацию):

$$h_z = \frac{A_m}{\left(1 - \frac{B_{\delta}}{B_{zmax} k_{ст}}\right) (m-1) (k_{зм} j_m 10^6)},$$

(2.44)

где B_{zmax} – максимально допустимая индукция в зубце (Тл); $k_{ст}$ – коэффициент заполнения пакета сталью; $k_{зм}$ – коэффициент заполнения паза медью; j_m – плотность тока в обмотке якоря (А/мм²).

9. Ширина трапецеидального зубца в минимальном сечении (м):

$$b_{zmin} = \frac{t_1 B_{\delta}}{B_{zmax} k_{ст}}, \quad (2.45)$$

10. Ширина прямоугольного паза (м):

$$b_{п1} = t_1 - b_{z\min}, \quad (2.46)$$

11. Высота спинки якоря (м):

$$h_a = \frac{\alpha_\delta \tau B_\delta}{B_{ha\max} k_{ст}}, \quad (2.47)$$

где $B_{ha\max}$ – максимально допустимая индукция в зубце (Тл).

12. Число эффективных проводников в пазе:

$$u_\pi = \frac{A\pi Dm}{I_a z_1 (m-1)}. \quad (2.48)$$

13. Число витков в фазе обмотки якоря:

$$W_f = \frac{pqu_\pi}{\alpha}. \quad (2.49)$$

14. Площадь голы меди в пазу якоря (м²):

$$S_{Cu} = b_{п1} h_z k_{з\text{м}}. \quad (2.50)$$

15. Сечение эффективного проводника обмотки якоря (м²):

$$q_a = \frac{S_{Cu}}{u_\pi}. \quad (2.51)$$

16. Предварительно задается высота магнита h_m , высота окна обмотки возбуждения h_{ov} , ширина окна обмотки возбуждения b_{ov} (м).

17. Минимальная площадь поперечного сечения торцевой части магнитопровода (м²):

$$S_{\text{mintonza}} = \frac{\alpha_\delta \tau B_\delta 2p}{B_{\text{maxtorza}}}, \quad (2.52)$$

где $B_{maxtorza}$ – максимально допустимая индукция в минимальном сечении торца якоря (Тл).

18. Ширина торца якоря(м):

$$b_{torza} = \frac{S_{min torza}}{\pi(D - 2h_z - 2h_a - 2h_{k\tau} - 2h_{ov})}. \quad (2.53)$$

19. Площадь поперечного сечения осевой части якоря. Площадь поперечного сечения осевой части якоря определяется из режима, когда потоки постоянного магнита и обмотки возбуждения идут согласно и складываются (режим ослабления результирующей ЭДС) (m^2):

$$S_{existancor} = \frac{\alpha_\delta \tau B_\delta 2p}{B_{maxexistancor}}, \quad (2.54)$$

где $B_{maxexistancor}$ – максимально допустимая индукция в сечении осевой части якоря (Тл).

20. Внутренний диаметр генератора(м):

$$D_v = \sqrt{(D - 2h_z - 2h_{k\tau} - 2h_{ov})^2 - \frac{4S_{existancor}}{\pi}}. \quad (2.55)$$

21. Площадь поперечного сечения спинки индуктора S_j (м). Площадь спинки индуктора определяется из режима, когда потоки постоянного магнита и обмотки возбуждения идут согласно и складываются (режим ослабления результирующей ЭДС):

$$S_j = \frac{\alpha_\delta \tau B_\delta 2p}{B_{jmax}}, \quad (2.56)$$

где B_{jmax} – максимально допустимая индукция в спинке индуктора (Тл).

22. Высота спинки индуктора (м):

$$h_j = \frac{\left(\sqrt{\frac{4S_j}{\pi} + (D + 2\delta + 2h_m)^2} - (D + 2\delta + 2h_m)\right)}{2}. \quad (2.57)$$

23. Расчет магнитной цепи.

Магнитная цепь рассчитывается по методике, представленной в параграфе 2.2 по заданной индукции в воздушном зазоре.

По результатам расчета магнитной цепи определяется суммарная намагничивающая сила для проведения рабочего потока без реакции якоря.

24. Расчет постоянного магнита с учетом суммарной намагничивающей силы магнитной цепи и реакции якоря под нагрузкой.

В результате расчета определяется высота магнита, обеспечивающего эти параметры.

25. Сечение провода обмотки возбуждения (м²).

Учитывая ранее разработанную схему регулятора напряжения генератора [36,38], сечение обмотки возбуждения будем рассчитывать на половину приложенного напряжения. На данном этапе пренебрежём размагничивающим действием реакции якоря при нагрузке:

$$q_{ov} = \frac{F_{\Sigma} \rho_t l_{strov}}{0.5 \cdot U_H}, \quad (2.58)$$

где ρ_t – удельное сопротивление меди в нагретом состоянии (Ом*м); l_{strov} – средняя длина витка цилиндрической обмотки возбуждения (м); U_H – номинальное выпрямленное напряжение.

26. Число витков обмотки возбуждения:

$$W_{ov} = \frac{h_{ov} b_{ov} k_{змов}}{q_{ov}}. \quad (2.59)$$

На этом этапе геометрия и обмоточные данные, определяющие энергетические параметры генератора, определены.

27. Проверка расчетной индукции в воздушном зазоре заданной индукции в начале расчета. Если расчетная индукция близка к заданной, расчет переходит к пункту 28. При несоответствии индукции в заданных пределах уточняется высота магнита и расчет повторяется, начиная с пункта 17 алгоритма.

28. Сопротивление обмотки возбуждения (Ом):

$$r_{ov} = p_t \frac{l_{srov} W_{ov}}{q_{ov}}. \quad (2.60)$$

29. Ток обмотки возбуждения (А):

$$I_{ov} = \frac{0.5U_n}{r_{ov}}. \quad (2.61)$$

30. Плотность тока в обмотке возбуждения (А/мм²):

$$i_{ov} = \frac{I_{ov}}{q_{ov} 10^{-6}}. \quad (2.52)$$

31. Проверяется соответствие плотности тока в обмотке возбуждения допустимым пределам. Если плотность тока не превышает допустимую, расчет переходит к пункту 32. Если плотность тока превышает эти пределы, изменяются размеры окна обмотки возбуждения h_{ov} и b_{ov} и расчет повторяется с пункта 17 алгоритма.

32. Плотность тока в обмотке якоря (А/мм²):

$$j_a = \frac{I_a}{q_a 10^{-6}}. \quad (2.63)$$

33. Активное сопротивление фазы (Ом):

$$r_a = \rho_t \frac{L_{cp} W_f}{q_a}. \quad (2.64)$$

где L_{cp} – средняя длина обмотки якоря; ρ_t – удельное сопротивление меди при рабочей температуре.

34. Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря, рассчитанное по методике [95] (Ом):

$$x_\sigma = 0.158 \frac{f}{100} \left(\frac{W_f}{100} \right)^2 \frac{L_\delta}{pq} (\lambda_{\pi} + \lambda_{\pi} + \lambda_{\pi}), \quad (2.65)$$

где $\lambda_{\pi}, \lambda_{\pi}, \lambda_{\pi}$ – удельные проводимости пазового, дифференциального и лобового рассеяния.

35. Сопротивление реакции якоря по продольной и поперечной осям с учетом насыщения, рассчитанные по методике [95] (ом):

$$x_{ad} = 4mf \frac{\mu_0 \tau L_\delta}{\pi k_\delta k_{\mu d} \delta} \frac{W_f^2 k_{ob}^2}{p} k_{ad}; \quad (2.66)$$

$$x_{ad} = 4mf \frac{\mu_0 \tau L_\delta}{\pi k_\delta k_{\mu d} \delta} \frac{W_f^2 k_{ob}^2}{p} k_{aq},$$

где $k_{\mu d}, k_{\mu q}$ – коэффициенты насыщения магнитной цепи якоря по продольной и поперечной осям; k_{ad}, k_{aq} – коэффициенты приведения по продольной и поперечной осям.

36. Угол сдвига фаз между вектором ЭДС возбуждения и током якоря:

$$\psi = \arctg \left(\frac{U_f \sin \varphi - I_\sigma x_\sigma - I_\sigma x_{sd}}{U_f \sin \varphi - I_\sigma r \sigma} \right). \quad (2.67)$$

37. ЭДС от постоянного магнита (В):

$$E_f = \frac{U_f \cos \varphi + I_a r_a}{\cos \psi}. \quad (2.68)$$

38. Результирующая ЭДС в обмотке якоря при номинальной нагрузке (В):

$$E_\delta = \sqrt{(E_f - I_a x_{ad} \cos \psi)^2 + (I_a x_{aq} \sin \psi)^2}. \quad (2.69)$$

39. Коэффициент ЭДС якоря:

$$k_e = \frac{E_\delta}{U}. \quad (2.70)$$

40. Определение погрешности расчета коэффициента ЭДС якоря:

$$\varepsilon_{ke} = \frac{|k_e - k_{\text{перед}}|}{k_e}. \quad (2.71)$$

41. Сравнение погрешности расчета коэффициента ЭДС якоря с допустимой величиной:

$$\varepsilon_{ke} \leq \varepsilon_{\text{кедон}}. \quad (2.72)$$

Если условие выполняется, расчет переходит к пункту 42. В противном случае расчет повторяется с пункта 4 с новым предварительным коэффициентом ЭДС якоря.

$$k_e = k_{\text{перед}}. \quad (2.73)$$

42. Электрические потери в обмотке якоря для 120- градусной коммутации (Вт):

$$P_{el} = I_a^2 r_a (m-1). \quad (2.74)$$

43. Электрические потери в обмотке возбуждения (Вт):

$$P_{ov} = I_{ov}^2 \cdot r_{ov} . \quad (2.75)$$

44. Магнитные потери в стали зубцов и спинке статора определяются по традиционной методике [95] (Вт):

$$P_{ст} = p_{уд} \left(\frac{1.0}{50} \right) \left(\frac{f}{50} \right)^{1.4} (m_z B_z^2 + m_{ha} B_{ha}^2), \quad (2.76)$$

где $p_{уд} \left(\frac{1.0}{50} \right)$ – удельные потери в стали; f – частота перемагничивания в стали; m_z, m_{ha} – масса зубца и спинки якоря; B_z, B_{ha} – средняя индукция в зубцах и спинке статора.

45.. Добавочные потери (для упрощенной оптимизационной модели включают в себя потери от высших гармоник, поверхностные магнитные потери в полюсных наконечниках, вентиляционные потери, механические потери в подшипниках) (Вт):

$$P_{доб} = 0.003 \cdot P_n . \quad (2.77)$$

46. Подводимая к валу мощность генератора (Вт):

$$P_1 = M_n \frac{2\pi n_n}{60}, \quad (2.78)$$

где M_n – номинальный механический момент на валу генератора (Нм); n_n – номинальная частота вращения генератора (об/мин).

47. Полезная мощность на валу (Вт):

$$P_2 = P_1 - P_{эл} - P_{ov} - P_{ст} - P_{доб} . \quad (2.79)$$

48. Коэффициент полезного действия:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} . \quad (2.80)$$

49. Определение погрешности расчета КПД:

$$\varepsilon_{\eta} = \frac{|\eta - \eta_{пред}|}{\eta}. \quad (2.81)$$

50. Сравнение погрешности расчета КПД с допустимой величиной:

$$\varepsilon_{\eta} \leq \varepsilon_{\eta доп}. \quad (2.82)$$

Если условие выполняется, расчет переходит к пункту 51. В противном случае расчет повторяется с пункта 4 с новым предварительным КПД.

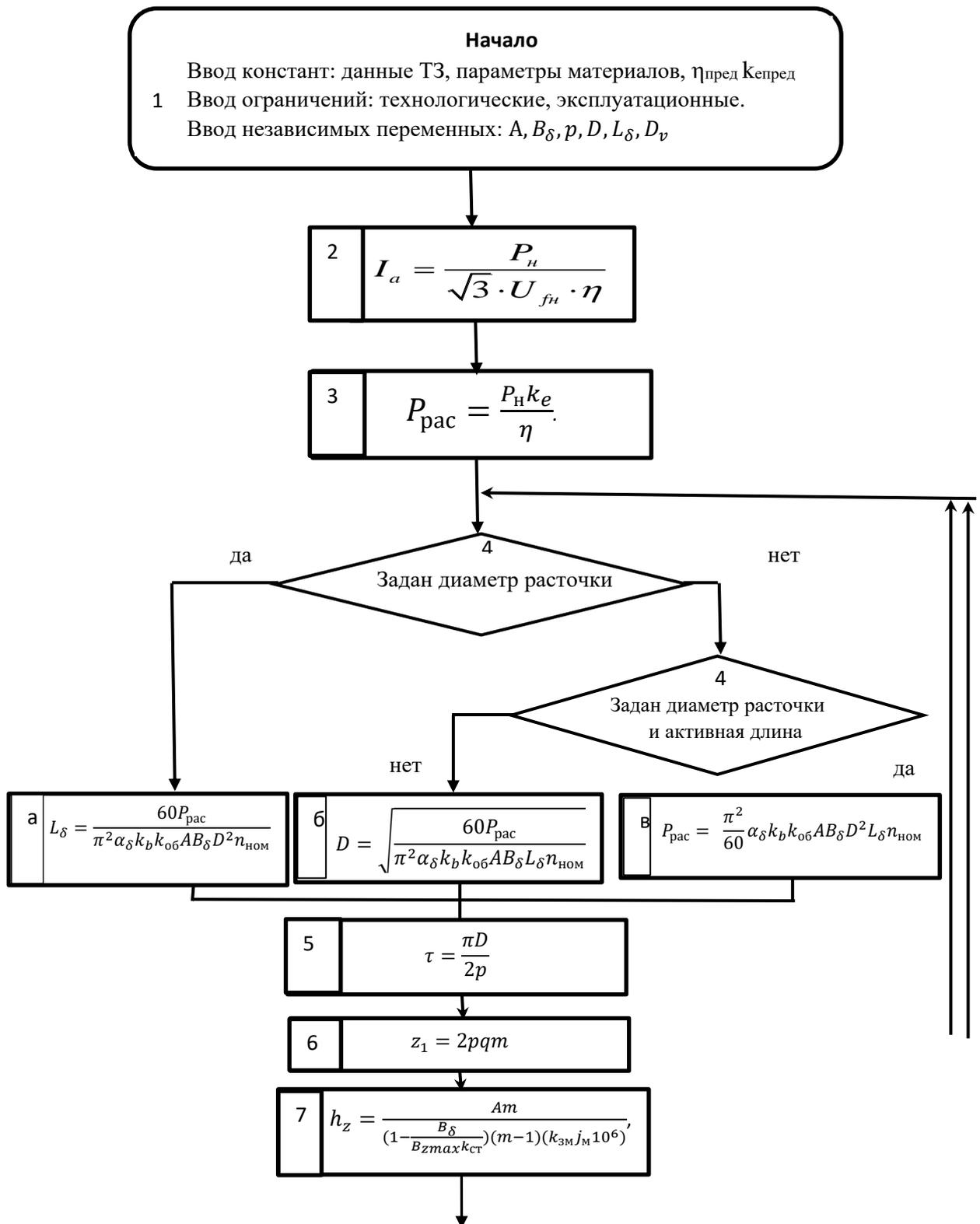
$$\eta_{пред} = \eta. \quad (2.83)$$

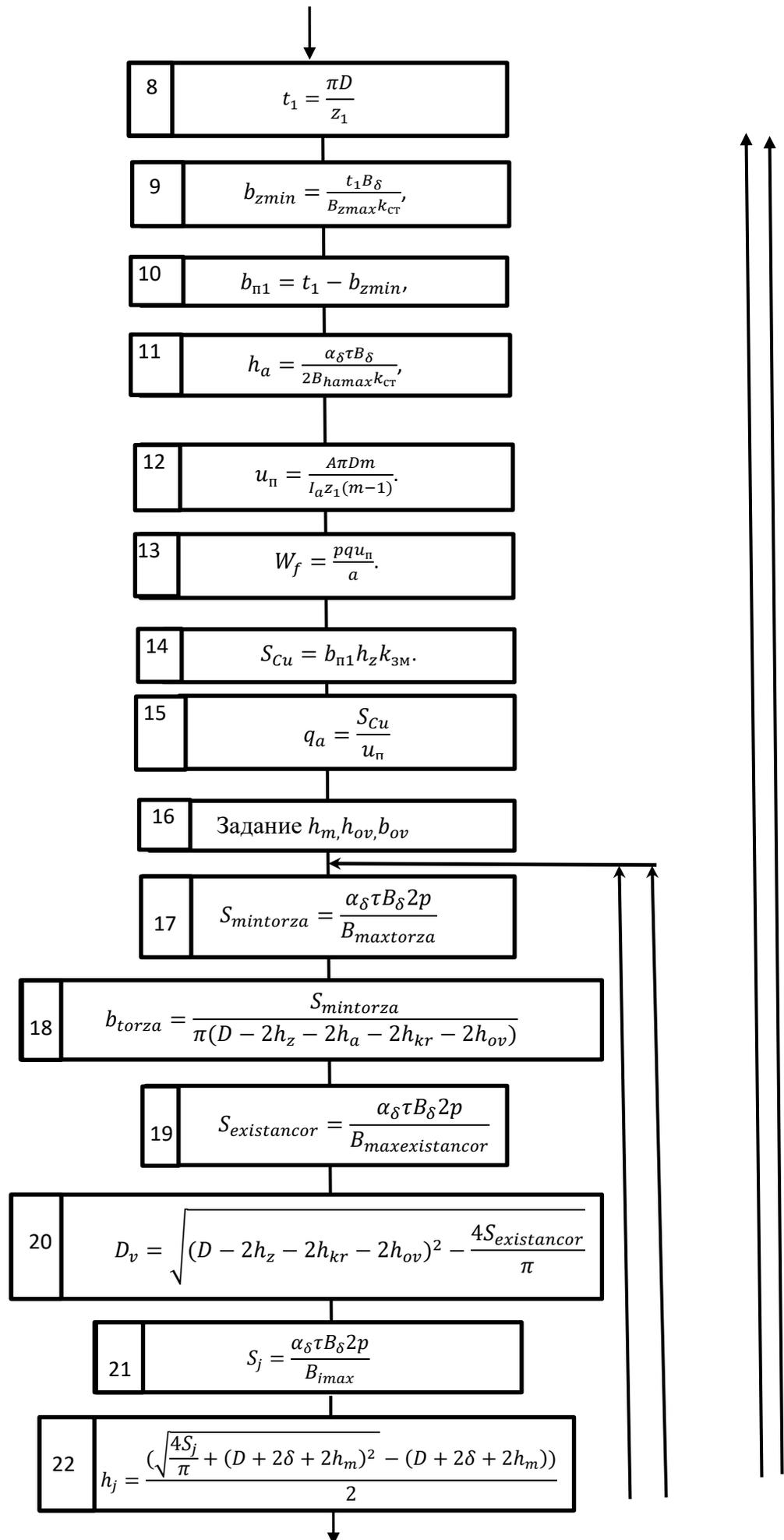
51. Определение массы и объема активных частей (меди, железа, постоянного магнита) (кг).

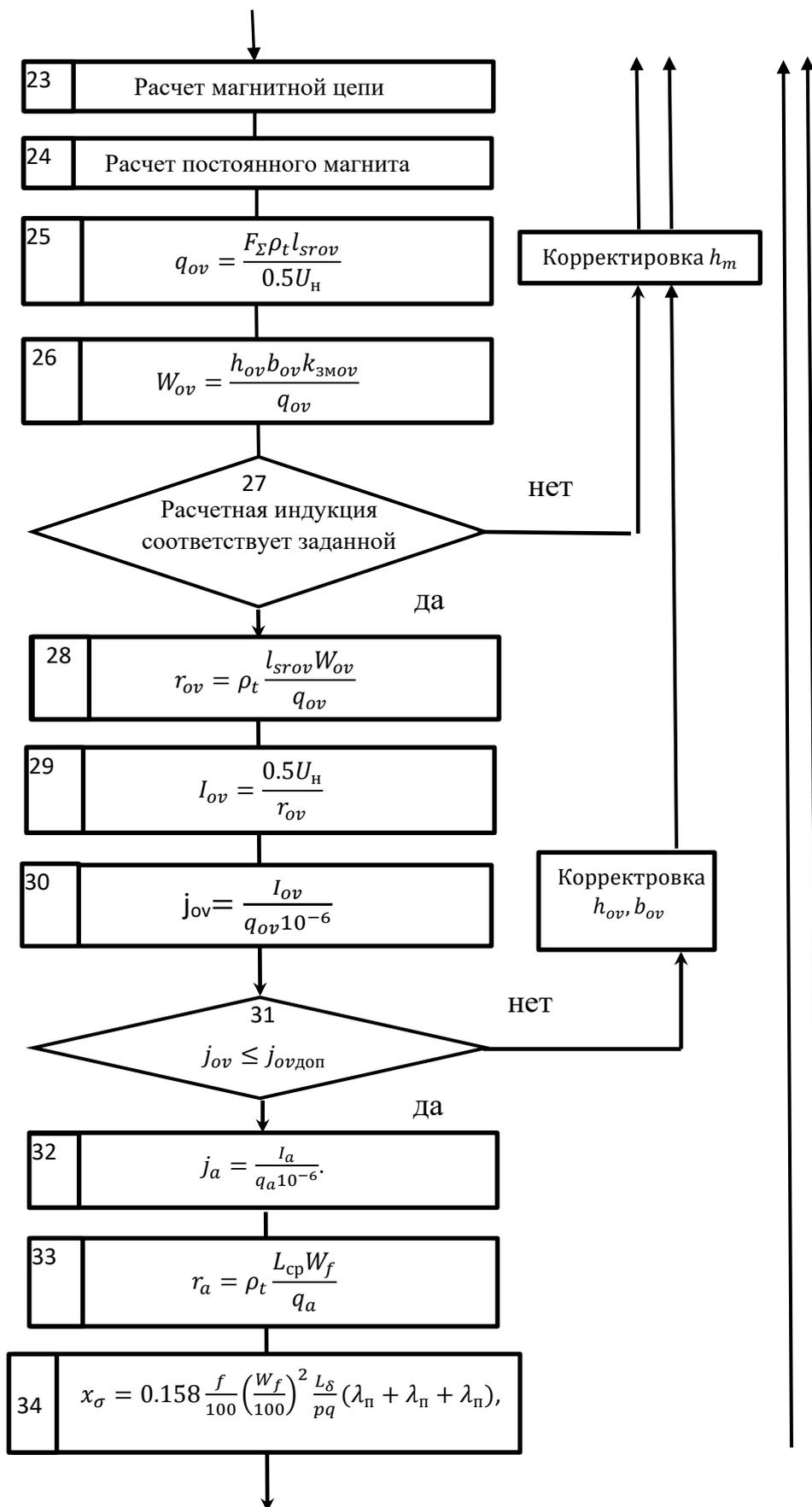
52. Проверка ограничений. При нарушении ограничений к целевой функции прибавляется штрафная функция. Размер штрафа определяется величиной нарушения ограничения.

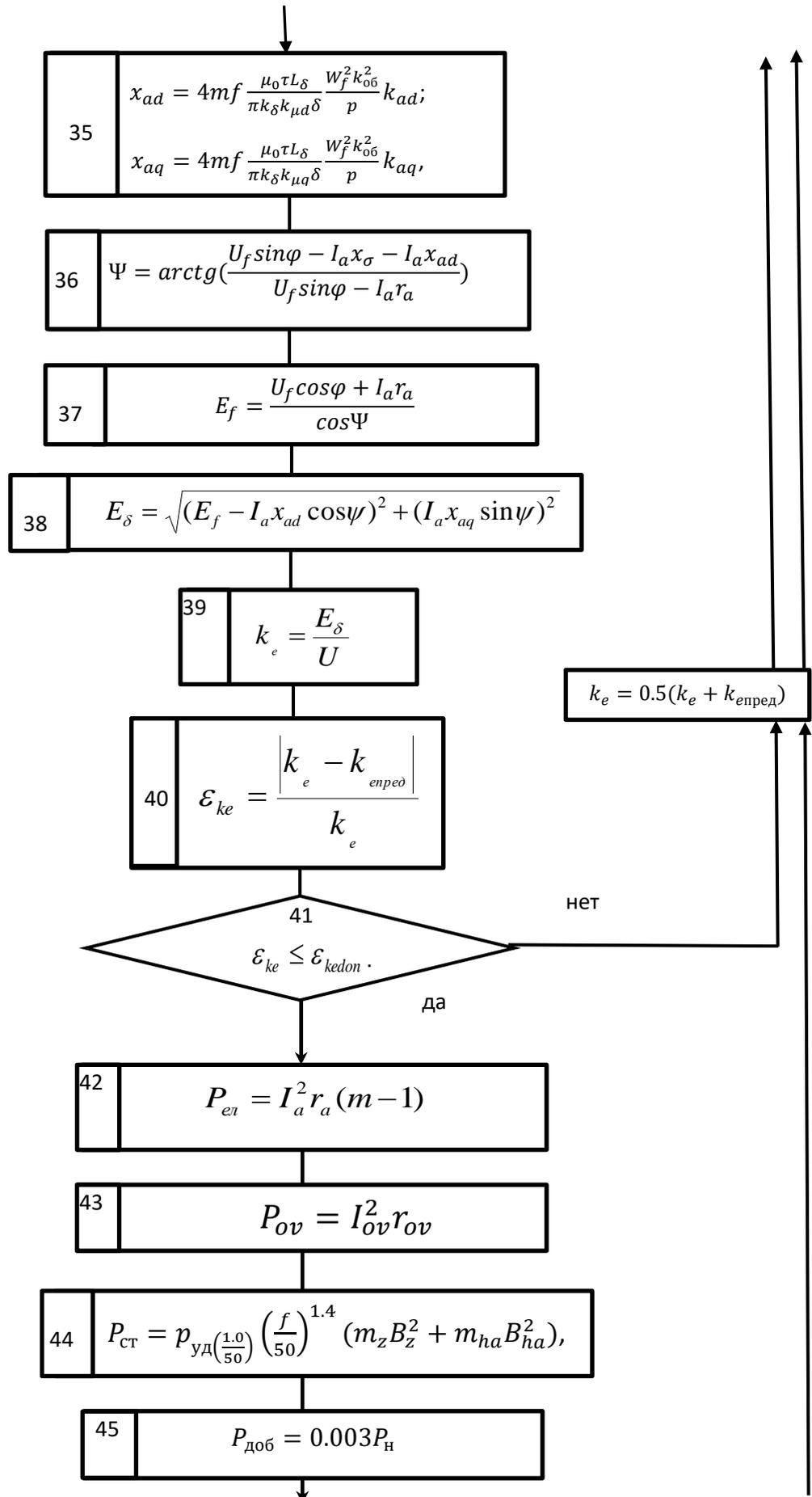
2.5. Блок-схема алгоритма расчета ВГКВ

Блок-схема данного алгоритма, дающая более наглядное представление о математической модели расчета, показана на рис. 2.6.









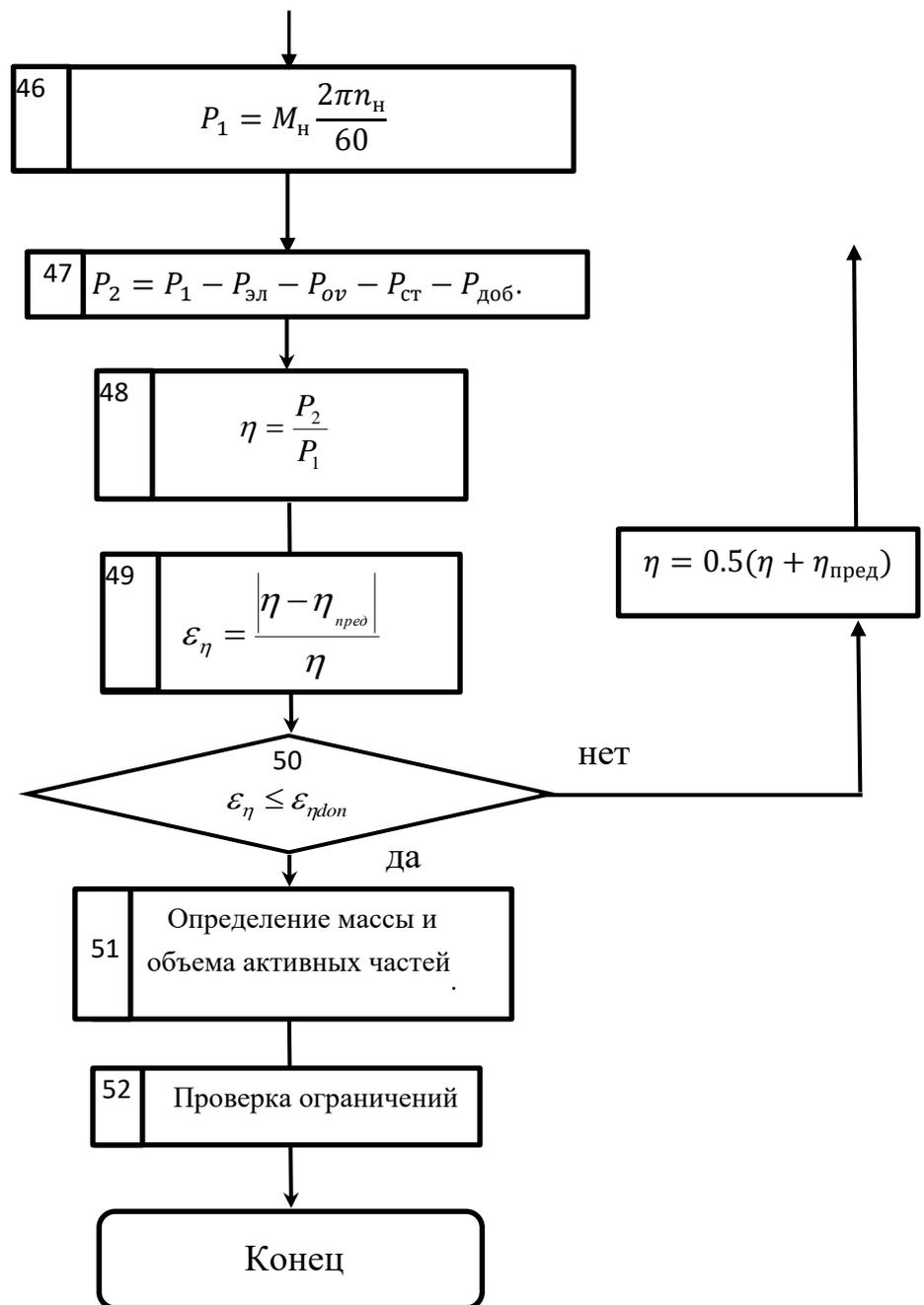


Рисунок 2.6. Блок-схема алгоритма электромагнитного расчета ВГКВ.

Математическая модель по приведенному алгоритму реализована в программной среде Delphi и включена в программный комплекс многоуровневой оптимизации ВГКВ, описанный в главе 3.

Приведенные аналитические зависимости содержат все основные взаимосвязи между геометрией и характеристиками.

Выводы по главе 2

1. Разработана методика расчета постоянного магнита, учитывающая все особенности магнитных систем вентильных электродвигателей: рабочий поток, поток рассеяния боковых граней, среднее насыщение магнитной цепи. Данная методика построена на основе метода конечных элементов, но содержит ограниченное наперед заданное количество уравнений, что позволяет включить расчетную математическую модель в большое число оптимизационных циклов. Для ненасыщенных магнитных цепей точность расчета основных параметров не превышает 2 %. Расчетная модель параметризованная и может рассчитывать магниты любых габаритов. На основе данного подхода разработана инженерная методика расчета постоянного магнита.

2. Разработана математическая модель расчета ВГКВ, представленная в виде алгоритма и блок-схемы. В математической модели определены основные аналитические зависимости между электромагнитными величинами, константы, технологические и эксплуатационные ограничения, независимые переменные. Формализованы показатели качества.

3. Математическая модель реализована в программной среде Delphi и является основой для разработки системы оптимального проектирования ВГКВ.

3. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВГКВ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПРОЕКТНЫХ СИТУАЦИЙ

Вводные замечания.

Для того, чтобы оптимальная система проектирования была эффективной, необходимо определить ее структуру. При этом следует учитывать тенденции и направления развития современных прикладных программных средств. Существующий уровень компьютерных технологий и программного обеспечения определил одно из этих перспективных направлений. Это сквозные технологии оптимального проектирования. В основе этих технологий лежит принцип сокращения технологических связей при реализации проекта от научно-исследовательских работ до производства опытного образца и разработки серийного производства. Это резко сокращает объем инженерных расчетов, документацию в печатном виде, количество циклов моделирования и время разработки, улучшается качество проектных работ.

Необходимо понимать сложность разработки такой системы в полном объеме. Создание системы сквозного проектирования является перспективой развития, но уже на начальном этапе основные принципы построения общей структуры должны быть приняты во внимание.

Определим основные требования к системе автоматизированного проектирования вентиляльных электрических машин, ориентированные на сквозные технологии.

3.1. Требования к математической модели

Одно из требований технологи сквозного проектирования – это универсальность, то есть возможность решать широкий круг инженерных задач. Требование универсальности заставляет включить в математическую модель по возможности наибольшее количество конструктивных исполнений. При этом необходимо иметь возможность выбора режима

работы, типа коммутации, формы и материала постоянных магнитов и обмоточного провода.

Разработанная в главе 2 математическая модель расчета ВГКВ удовлетворяет этим требованиям.

Расширение количества расчетных вариантов для системы проектирования назовем «развитием по горизонтали» [46-48].

3.2. Требования к системе оптимизации

Следующим требованием системы оптимального проектирования, ориентированной на сквозную технологию, является гибкость, то есть возможность осуществлять для одной и той же конструкции различных уровней оптимизации. Рассмотрим это требование более подробно. Как правило, независимые переменные - это размеры, которые однозначно определяют геометрию изделия. Если при поиске оптимума изменяются все независимые переменные, то решается самая сложная задача полной габаритной оптимизации. Но достаточно часто возникают проектные ситуации, для которых некоторые размеры или группа размеров должны быть фиксированными. Например, заданы наружный или внутренний диаметр при встраивании изделия в ограниченный объем, заданы габариты и так далее. При этих проектных ситуациях реализуются оптимизации более низкого уровня.

Возможность реализации различных уровней оптимизации для одной и той же конструкции назовем «развитием по вертикали» [46-48].

3.3. Требование совместимости с существующими программными системами

Система проектирования, ориентированная на сквозную технологию, должна реализовывать комплексный подход при анализе и синтезе вентильных машин. На рынке программных средств существуют отработанные профессиональные комплексы, реализующие эти возможности.

Необходимо просто встроить их в систему проектирования. На практике хорошо зарекомендовали себя следующие программы:

- программный комплекс Ansys, реализующий анализ электромагнитных и тепловых полей по методу конечных элементов;
- графическая среда для трехмерного твердотельного моделирования Solidworks;
- программный комплекс моделирования электронных схем Ansys Citrix.

Эти программные пакеты можно включить в систему проектирования в виде готовых отработанных процедур.

Следует отметить, что реализация названных требований не закрывает все проблемы, связанные с проектированием вентиляльных машин. Поэтому система проектирования должна быть открытой и позволять достраивать ее структуру и постоянно ее совершенствовать.

3.4. Выбор тип оптимизации

Определим требования к самой системе оптимизации. Под оптимизацией следует понимать процесс выбора наилучшего варианта. Критериями оптимальности являются показатели качества этого варианта. Как правило, в расчетной модели существует несколько критериев оптимальности и, в наиболее общем случае, возникает необходимость решения многокритериальной задачи. Следует отметить, что решение многокритериальной задачи является достаточно сложным. Это связано с тем, что критерии оптимальности находятся в противоречивых отношениях. Улучшение одного критерия ведет к ухудшению других. Так увеличение КПД приводит к увеличению массы и объема изделия, повышение качества выходного напряжения к усложнению электроники, уменьшение стоимости к снижению надежности. Опыт оптимального проектирования в электромеханике показывает, что проблема многокритериальной оптимизации возникает на зрелом этапе разработки технического устройства

с его широким внедрением в массовое производство. Примером может служить разработка серии асинхронных двигателей 4А.

Существующие методы многокритериальной оптимизации содержат большую долю субъективности при выборе критерия. В процессе разработки технических устройств доля субъективизма уменьшается, заменяется практическим опытом, и методы многокритериальной оптимизации начинают эффективно работать. Но на начальной стадии развития технического изделия они менее эффективны при большой трудоемкости их разработки.

В настоящее время приводы на базе ВГКВ находятся на стадии развития, когда достаточно эффективными для них является решение задачи однокритериальной оптимизации. Задача решения многокритериальной оптимизации составляет для них перспективу развития.

Сформулируем задачу однокритериальной оптимизации ВГКВ в классической постановке [66,97,125]: **для заданных параметров (конкретного исполнения, материалов, исходных данных технического задания), при заданных ограничениях, необходимо, делая перебор независимых переменных по определенному алгоритму, определить геометрию, которая обеспечивала бы экстремальное значение выбранного критерия.** Выбор критерия оптимальности определяется конкретной проектной ситуацией. Блок-схема задачи однокритериальной оптимизации представлена на рис.3.1.

В качестве констант в программе фигурируют данные технического задания и, в зависимости от уровня оптимизации, фиксированные геометрические размеры.

В качестве ограничений выступают параметры, определяющие точность расчета, требования технологии изготовления и требования по условиям эксплуатации.

К технологическим ограничениям ВГКВ следует отнести:

– минимальную и максимальную высоту и ширину постоянного магнита;

– минимальную и максимальную толщину зубца статора;

– минимальное и максимальное сечение обмоточного провода.

В качестве эксплуатационных ограничений следует принять:

– допустимую плотность тока. Этот параметр опосредованно определяет температуру нагрева якорной обмотки.

– КПД. Этот параметр в систему ограничений включен по следующим причинам. При выборе этого показателя в качестве критерия оптимальности проектная система будет стремиться получить его максимум, уменьшая потери. Масса активных материалов в процессе оптимального выбора при этом будет возрастать. Общая масса и габариты будут увеличиваться существенным образом при увеличении КПД на доли процента. Поэтому величину КПД следует ограничить на уровне величин, определенных эксплуатационной практикой. Оптимизационный цикл будет остановлен на этом ограничении, что не позволит существенно увеличить массогабаритные показатели. Разработчик может менять это ограничение в ту или иную сторону, оценивая по габаритам и массе целесообразность повышения или понижения КПД.



Рис.3.1. Блок-схема задачи однокритериальной оптимизации

В качестве критериев оптимальности приняты показатели качества, получившие наибольшее распространение на практике:

- минимальная масса активных материалов;
- минимальный объем магнитной системы;
- минимальная масса постоянных магнитов;
- минимальный вес якорной обмотки.

Данная постановка задачи оптимального проектирования легла в основу построения оптимизационной системы.

3.5. Выбор метода оптимизации

Существует много алгоритмов оптимального проектирования, которые составляют раздел математики – нелинейное программирование. Достаточно подробно эти методы применительно к электромашиностроению описаны в литературе [66].

Большое количество методов оптимизации говорит о том, что не существует одного наиболее эффективного метода, и для каждой математической модели необходимо делать свой выбор, учитывая ее специфику.

Функцией цели является выбранный показатель качества. В зависимости от проектной ситуации он может быть функцией одной или нескольких переменных. Выбор метода перебора независимых переменных зависит от вида функции цели. Как правило, целевая функция имеет монотонный характер [42,43]. Но при этом следует отметить, что особенностью математической модели ВГКВ является наличие дискретно изменяющегося параметра в независимых переменных. Это число пар полюсов. При этом экстремум целевой функции, как правило, находится на границе. Как известно [66], градиентные методы при нахождении экстремума на границе не работают. Это исключило применение градиентных методов, основанных на вычислении производных для определения шага при движении к экстремуму.

Анализ целевых функций показал, что для ВГКВ задачу оптимизации можно ограничить поиском локального экстремума, который является единственным, не усложняя задачу поиском глобального экстремума из нескольких локальных. Это позволило исключить стохастические методы перебора независимых переменных, ориентируясь на детерминированные методы.

На кафедре теоретических основ электротехники ЮУрГУ в течение ряда лет достаточно успешно применяется метод, сочетающий в себе детерминированный метод покоординатного спуска (Гаусса-Зейделя) при движении к экстремуму с методом однопараметрической оптимизации Фибоначчи, при выборе длины шага поиска [44]. Этот метод можно использовать при переборе непрерывных и дискретных параметров, что очень удобно для оптимизации электрических машин. Этот метод был принят для реализации блока-оптимизатора в оптимальной модели, но при этом следует отметить, что поиски по выбору наиболее приемлемого метода по количеству оптимизационных циклов следует продолжать. Эти научные работы представляют собой отдельное исследование.

3.5.1. Определение уровней оптимизации

Как было отмечено выше, проектная система должна обладать достаточной гибкостью, чтобы иметь возможность реализовывать различные проектные ситуации.

Если изделие разрабатывается для новой системы, то, как правило, оно не имеет габаритных ограничений. То есть можно варьировать всеми размерами, включая наружный диаметр, внутренний диаметр, наружную длину для определения оптимального варианта. В этом случае речь идет о полной габаритной оптимизации.

Оптимизации более низкого уровня возникают, как правило, при модернизации изделия в процессе производства. Следует учитывать тот факт, что при освоении производства в изделие уже вложены значительные

средства при изготовлении технологической оснастки, штампов, литейных форм, тестового оборудования. Модернизация изделия может привести к изменению этих приспособлений и, в конечном счете, значительному увеличению себестоимости и цены самой электрической машины. Производитель в данной ситуации проявляет здоровый консерватизм, изменяя не все изделие в целом, а отдельные его части. Например, производитель хочет оставить неизменной магнитную систему с постоянными магнитами, партия которых уже закуплена, и оснастка под которые изготовлена. Но при этом он без существенных затрат может изменить параметры якоря, его обмоточные данные, так как их изготовление связано с программируемым намоточным станком. При этом система оптимизации должна зафиксировать независимые переменные, которые определяют геометрию индуктора, и изменять в процессе оптимизации только геометрические размеры якоря.

Может возникнуть другая ситуация. Закуплена большая партия обмоточного провода по выгодной для производителя цене. Необходимо промышленное освоение этого материала. Но при этом поставками постоянных магнитов можно варьировать. Изготовитель желает в этих условиях получить изделие с максимально эффективными показателями качества. Система оптимизации без изменения ее структуры должна решить эту частную задачу. При этом часть независимых переменных, определяющих геометрию якоря, должна быть зафиксирована, а остальные независимые переменные должны быть включены в процесс оптимального перебора.

Таким образом, уровень оптимизации определяется конкретной проектной ситуацией. Рассмотрим возможные уровни габаритной оптимизации, определенные практикой проектирования вентильных машин [40,45,51].

3.5.2. Полная габаритная оптимизация

На этом уровне оптимизации варьируются все независимые переменные.

В качестве констант в этом случае выступают следующие параметры:

- данные технического задания (номинальная мощность, номинальное напряжение, номинальная частота вращения);
- число фаз;
- рабочая температура обмотки;
- параметры постоянного магнита (остаточная индукция, коэрцитивная сила);
- параметры обмоточного провода (удельное электрическое сопротивление при температуре 20 С°);
- форма обмоточного провода (круглая, прямоугольная);
- технологическая величина воздушного зазора.

В качестве ограничений следует принять следующие величины:

- ограничения, заложенные собственно в математическую модель (допустимая погрешность расчета коэффициента насыщения магнитной цепи $\varepsilon_{k\mu\delta on}$, допустимая погрешность расчета коэффициента ЭДС в якоре $\varepsilon_{k\mu\delta on}$, допустимая погрешность расчета КПД $\varepsilon_{k\mu\delta on}$);
- технологические ограничения (минимальные и максимальные размеры магнита, минимальная ширина зубца, минимальная толщина спинки якоря, минимальные и максимальные размеры обмоточного провода);
- эксплуатационные ограничения (максимально допустимая плотность тока, требуемое значение КПД).

В качестве независимых переменных для этого уровня следует принять все переменные, указанные при описании математических моделей в гл.3:

- линейная нагрузка A_{lin} (А/м);
- индукция в воздушном зазоре B_{δ} (Тл);
- число пар полюсов p .

- диаметр расточки якоря D_a (м);
- внутренний диаметр генератора D_a (м);

Уровень полной габаритной оптимизации имеет свои критерии оптимальности. Наиболее типичными критериями в этом случае могут быть следующие показатели качества:

- минимальная масса активных материалов (масса магнитов, обмоточного провода, дисков магнитопровода);
- минимальный объем активной части ВГКВ;
- минимальная масса постоянных магнитов.

При выборе разных критериев получаются варианты с разной геометрией и характеристиками. Выбор наилучшего варианта остается за разработчиком. Но при этом разработчик получает большой объем информации от системы по всем вариантам полной габаритной оптимизации, что во многом облегчает выбор, делает его более обоснованным и объективным.

3.5.3. Габаритная оптимизация при фиксированном числе пар полюсов

Габаритная оптимизация при фиксированном числе пар полюсов необходима в ситуации, когда необходимо ограничить частоту перемагничивания в стали. Ограничения для этого уровня аналогичны полной габаритной оптимизации.

В качестве независимых переменных для этого уровня следует принять только 4 переменных:

- линейная нагрузка A_{lin} (А/м);
- индукция в воздушном зазоре B_δ (Тл);
- число пар полюсов p ;
- диаметр расточки якоря D_a (м);
- внутренний диаметр генератора D_{in} (м);

Число пар полюсов p для этого уровня является фиксированным параметром.

Критериями оптимальности для этой проектной ситуации служат показатели качества полной габаритной оптимизации, а именно: минимальная масса активных материалов, минимальный объем активной части, минимальная масса магнитов.

3.5.4. Габаритная оптимизация при фиксированном наружном диаметре

Габаритная оптимизация при фиксированном наружном диаметре достаточно часто встречается на этапе НИР. Эта проектная ситуация возникает для вновь разрабатываемых изделий при ограничении внешнего габарита, определяемого разработчиком привода. В этих условиях основной задачей разработчика является получение мощности при минимальной активной длине, обеспечивающей заданную мощность.

3.5.5. Габаритная оптимизация при фиксированном внутреннем диаметре

Ограничения для этого уровня аналогичны полной габаритной оптимизации.

В качестве независимых переменных для этого уровня следует принять только 4 переменных:

- линейная нагрузка A_{lin} (А/м);
- индукция в воздушном зазоре B_{δ} (Тл);
- число пар полюсов p ;
- диаметр расточки якоря D_a (м).

Критериями оптимальности для этой проектной ситуации служат показатели качества полной габаритной оптимизации при условии получения заданной мощности, а именно: минимальная масса активных материалов, минимальный объем активной части, минимальная масса магнитов.

3.5.6. Габаритная оптимизация при фиксированной наружной длине

Проектная ситуация при фиксированной наружной длине возникает при ограничении осевого габарита.

Критериями оптимальности для этой проектной ситуации служат показатели качества полной габаритной оптимизации при условии получения заданной мощности, а именно: минимальная масса активных материалов, минимальный объем активной части, минимальная масса магнитов.

3.5.7. Габаритная оптимизация при фиксированном наружном и внутреннем диаметрах

Данный уровень оптимизации возникает в проектных ситуациях с более жестким ограничением габаритов, по сравнению с ситуациями, рассмотренными выше. В систему ограничений добавляется наружный и внутренний диаметры.

В качестве независимых переменных выбираются следующие параметры:

- линейная нагрузка A_{lin} (А/м);
- индукция в воздушном зазоре B_{δ} (Тл);
- число пар полюсов p .

В качестве критерия оптимальности выбирается

- минимальная масса активных материалов (масса магнитов, обмоточного провода, дисков магнитопровода);
- минимальный объем активной части ВГКВ;
- минимальная масса постоянных магнитов.

3.5.8. Оптимизация при фиксированном наружном, внутреннем диаметрах и наружной длине (в заданных габаритах)

Оптимизация в заданных габаритах – наиболее часто встречающаяся проектная ситуация на этапе НИОКР. Она возникает при замене старых, морально устаревших устройств новыми, более совершенными,

содержащими материалы с улучшенными свойствами и сделанными по современным технологиям.

По аналогии с предыдущим уровнем в качестве независимых переменных выбираются параметры:

- высота постоянного магнита h_m (м);
- высота активного слоя (слоя меди) h_a (м);
- число пар полюсов p .

Критерий оптимальности для данного уровня меняется. Основным показателем качества становится максимальная мощность, которую можно получить в заданных габаритах в длительном режиме при допустимом уровне нагрева якорной обмотки.

3.5.9. Оптимизация при заданных размерах постоянного магнита.

Практика показывает, что данный уровень оптимизации характерен для очень большого количества проектов. Как правило, производитель ВМАП закупает постоянные магниты большими партиями с целью экономии на оптовых поставках. Часто неиспользованные в производстве магниты хранятся в заделе большими партиями на складах. У производителя возникает желание использовать эти заделы при разработке новых изделий. Кроме этого, производитель постоянных магнитов часто выпускает их в виде номенклатурного ряда с нормированными размерами. Эти размеры он указывает в каталогах на свою продукцию. Такие нормированные магниты стоят на порядок дешевле, чем магниты, изготовленные по специальному заказу. Следует отметить, что заданные фиксированные размеры магнита могут значительно отличаться от оптимальных. Поэтому результаты данного уровня оптимизации целесообразно сравнить с полной габаритной оптимизацией. Такой анализ поможет сделать правильный с экономической точки зрения выбор: использовать серийные магниты или заказать специальные магниты с оптимальной геометрией.

3.5.10. Поверочный расчет

Поверочный расчет гармонично вписывается в систему оптимизации, как уровень, на котором отсутствуют независимые переменные. На этом уровне все размеры, однозначно определяющие конструкцию, заданы. Проектная система не генерирует конструктивные изменения, а только проводит анализ конкретной заданной конструкции, рассчитывая основные параметры и характеристики.

Кроме подробного анализа, этот уровень имеет еще одно положительное свойство. Он позволяет опытному разработчику самостоятельно варьировать переменные для нахождения оптимального варианта, когда реальная проектная ситуация несколько отличается от тех, которые предусмотрены системой оптимизации. При этом проектная система становится еще более гибкой.

Как было отмечено выше, существующие проектные системы реализуют один уровень оптимизации для одной конкретной конструкции.

Практика эксплуатации проектной системы показала, что поле проектных ситуаций покрывает любое техническое задание реального производства. Кроме этого, она позволяет проводить сравнительный анализ проекта, выполненного по конкретному техническому заданию с ограничениями, с проектом, рассчитанным по полной габаритной оптимизации без ограничений. Это важно для принятия правильного с технической и экономической точки зрения решения.

На основе данной концепции однокритериальной многоуровневой оптимизации с применением языка программирования высокого уровня Delphi была разработана система оптимального проектирования ВГКВ для различных проектных ситуаций. Интерфейс программы синтеза показан на рис. 3.2.

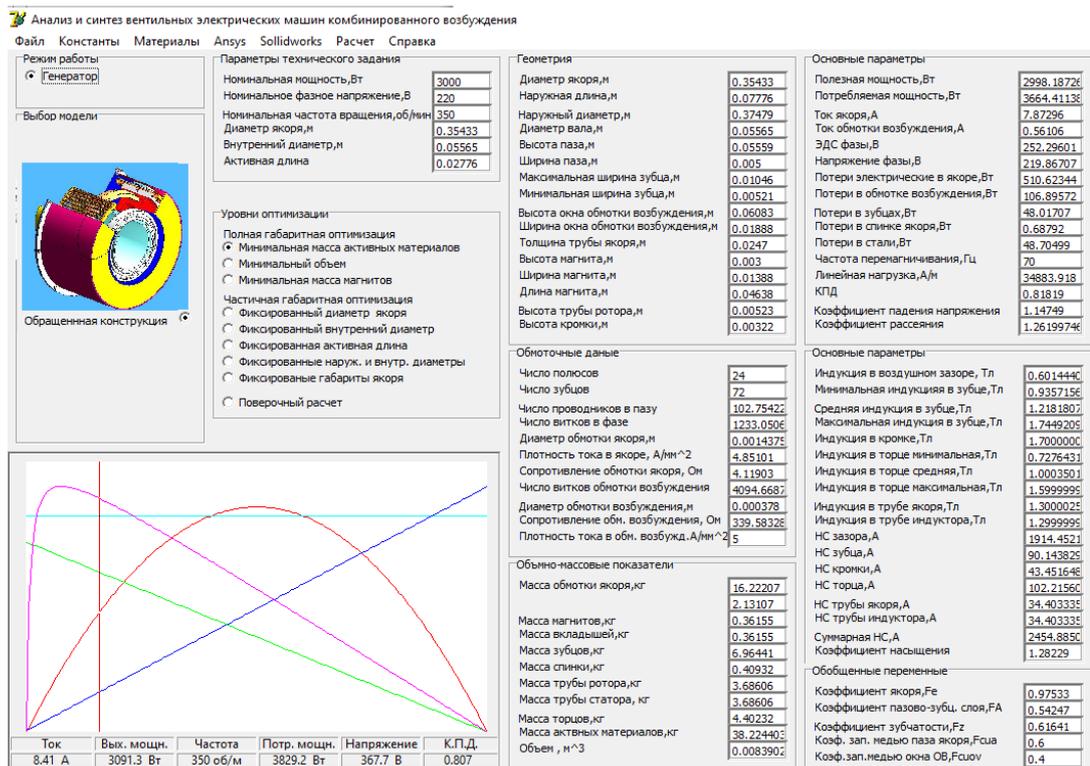


Рисунок. 3.2. Интерфейс системы однокритериальной многоуровневой оптимизации ВГКВ

Выводы по главе 3

1. Проведен анализ требований к методам оптимального проектирования электромеханических систем. На основе анализа принято решение о реализации однокритериальной оптимизации. Отмечено, что критерии оптимальности могут меняться в зависимости от проектной ситуации.

2. Выбран метод оптимизации ВГКВ, сочетающий в себе метод покоординатного спуска (Гаусса-Зейделя) при движении к оптимуму с методом Фибоначчи при определении шага.

3. Определено понятие уровней оптимизации. Формализованы 8 уровней оптимизации геометрии ВГКВ. Для каждого уровня определена система констант, ограничений, независимых переменных и критериев оптимальности.

4. На основе проведенного анализа разработана система оптимизации ВГКВ, реализующая многоуровневую однокритериальную оптимизацию для различных конструктивных исполнений. С учетом выбора различных критериев система позволяет реализовать до 12 проектных ситуаций, закрывая практически все потребности реального проектирования ВГКВ данной конструкции.

4. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СОСТОЯНИЯ ВГКВ

Вводные замечания

После проведения оптимизационных расчетов возникает объективная необходимость в проведении подробного анализа спроектированного генератора. Это связано с тем, что расчетные модели, которые включены в оптимизационный цикл, максимально упрощены из-за экономии времени работы компьютера. Они рассчитывают минимальное количество параметров, не содержат процедур детального расчета электромагнитного поля и поля температур. Анализ теплового состояния очень важен для ВГКВ, так как недопустимый перегрев может привести к размагничиванию постоянных магнитов.

Задача разработчиков таких проектных систем во многом облегчается за счет того, что в настоящее время существует большое количество программных продуктов для анализа электромагнитного, теплового состояния электромеханических систем, компьютерного моделирования электронных схем.

Данные проектные системы выполнены как самостоятельные программы анализа. Их можно использовать обособленно друг от друга и от предложенной системы оптимизации. Но разрозненное их использование затрудняет подготовку исходных данных и во многом снижает их эффективность. Кроме того, отсутствует обратная связь между результатами анализа и синтеза. Большинство перечисленных выше систем имеют встроенные языки программирования, которые позволяют включить их в виде готовых законченных модулей в систему автоматизированного проектирования ВГКВ как структуру, предназначенную для анализа всех физических процессов и дальнейшего инженерного проектирования. Результаты анализа можно использовать для корректировки постановки

задачи синтеза (например, уточнить оптимальное значение полюсной дуги, коэффициента рассеяния).

Правильный выбор САПР – надёжное условие эффективного проектирования. Основными критериями выбора при этом являются: распространённость САПР, цена САПР, её сопровождения и модификации, широта охвата задач проектирования, удобство работы САПР и её «дружественность», наличие широкой библиотечной поддержки стандартных решений, возможность и простота стыковки с другими САПР, возможность коллективной работы. Большое количество предлагаемых программ с одной стороны затрудняет этот выбор, с другой стороны говорит о том, что он не принципиален, так как практически любая программа из предложенных списков может справиться с задачей анализа ВГКВ.

Из сложившейся практики по разработке конкретных проектов для разработки системы анализа электромагнитного состояния была выбрана САД система Ansys Electronics Desktop, предназначенная для полевого расчета электромеханических преобразователей, САД система Ansys Icerak, предназначенная для решения термодинамической задачи.

Немаловажным фактором при выборе программных средств послужило наличие на них лицензий, которые имеет Южно-Уральский государственный университет. Это позволило проводить научные исследования в юридически правовом поле.

4.1. Электромагнитный анализ ВГКВ с помощью программного комплекса Ansys Electronics Desktop

Проектная система подразумевает взаимосвязь всех своих функциональных частей, соответственно, между подсистемой синтеза оптимальной геометрии и анализа электромагнитного состояния должна быть тесная взаимообратная связь. Ansys Electronics Desktop позволяет осуществить эту связь через встроенную в программу скрипты. Данная связь

позволяет оперативно обмениваться данными и проводить анализ различных вариантов после оптимизационных расчетов.

Ansys Electronics Desktop имеет в своей базе ряд хорошо отработанных типовых конструкций электрических машин для анализа. Анализ этих конструкций максимально упрощен. Достаточно заполнить табличные формы с информацией о размерах и используемых материалах, и программа проведет подробный анализ в трех режимах: RМхрт (на основе метода схем замещения), 2D Maxwell Design (на основе метода конечных элементов для двухмерной задачи), 3D Maxwell Design (на основе метода конечных элементов для трехмерной задачи).

Предлагаемая конструкция ВГКВ является уникальной и не входит в базу типовых конструкций Ansys Electronics Desktop. Кроме этого, геометрия генератора не имеет плоской симметрии, поэтому для анализа ВГКВ необходимо создавать 3D модель с использованием встроенного в систему инструментария.

В основе технологии Solid modeling, используемой в Maxwell, лежит специальный интегрированный в программу графический редактор, позволяющий создавать модели с использованием вложенных в программу примитивов.

Как было отмечено, геометрия генератора не имеет плоской симметрии, поэтому для анализа необходимо создать трехмерную модель. Для автоматизации построения модели она была параметризирована. Это означает, что для разработки модели были определены размеры, которые полностью определяют ее геометрию, параметры постоянного магнита и обмоточные данные. Для построения этой модели достаточно в опции Design table задать этим параметрам требуемые значения, и модель в автоматическом режиме будет построена для анализа. Эту процедуру в программе выполняют скрипты. В них записывается информация, полученная по результатам оптимизации, и далее по этой информации

команды скриптов выстраивают модель. Результаты этой процедуры представлены на рис. 4.1.

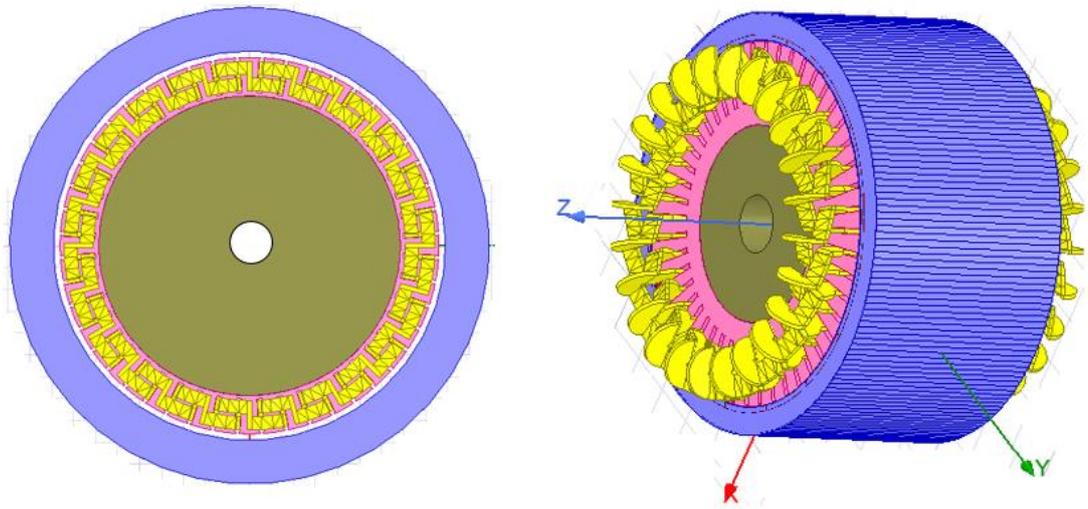


Рисунок. 4.1. Результаты создания трехмерной модели

Для упрощения расчета и сокращения объема вычислений была использована осевая симметрия генератора, которая позволила определить параметры одного полюсного деления. Полные характеристики определялись умножением результатов на количество составляющих частей.

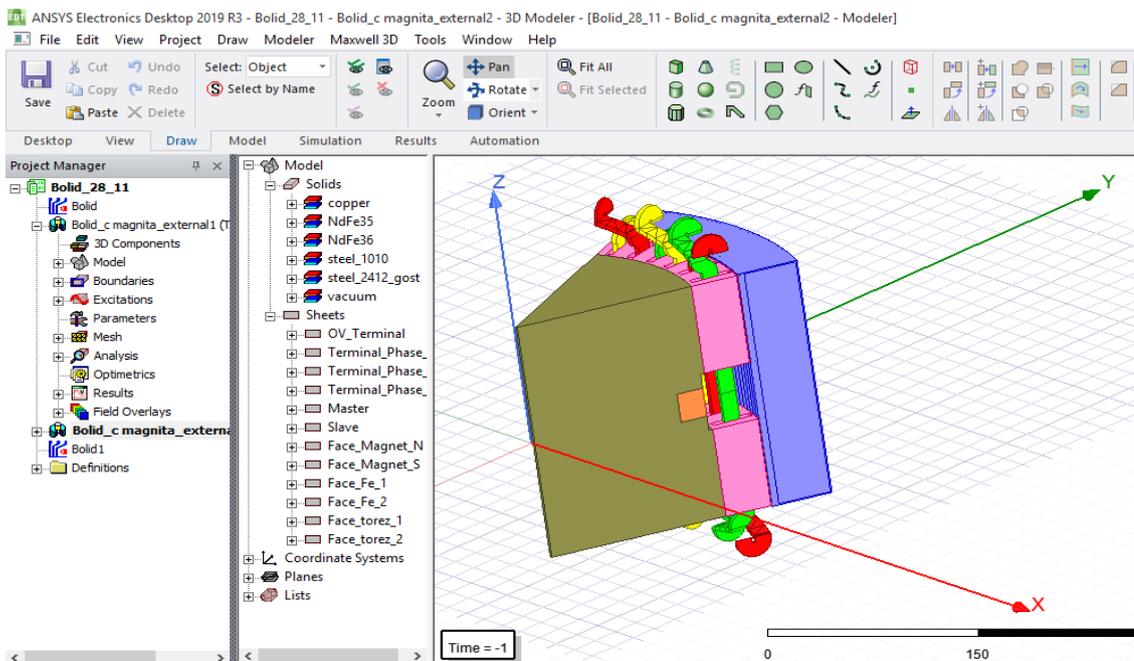


Рисунок. 4.2. – Модель генератор в Ansys Electronics Desktop

Для решения задачи программа разбивает модель на большое количество конечных элементов. Для каждого элемента формируется система уравнений для локальной матрицы. Глобальная матрица формируется из локальных матриц для решения полевой задачи.

Для анализа электромагнитного состояния был использован режим Transient, который позволяет проводить анализ динамических характеристик с учетом взаимного перемещения статора и ротора. Результаты расчета магнитного поля для генератора 3 кВт, 220 В, 350 об/мин приведены на рис.4.3.

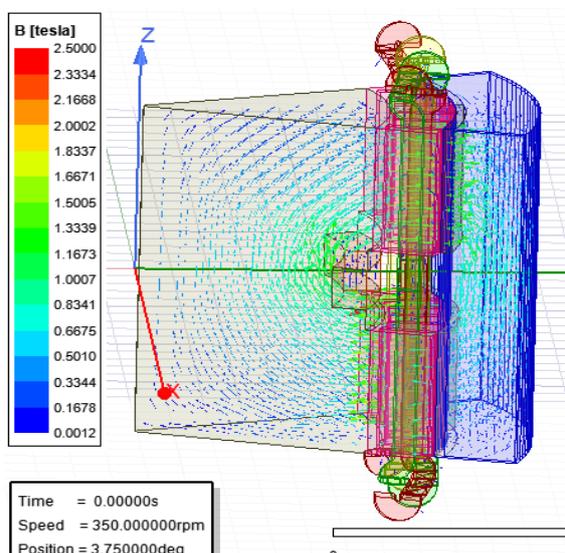


Рисунок.4.3. Результаты расчета магнитного поля

Картина распределения индукции магнитопровода показывает, что магнитная система имеет допустимое насыщение основных участков магнитной цепи.

4.2. Применение имитатора электронных Maxwell Circuit для анализа динамических характеристик.

Основным преимуществом предлагаемого генератора является возможность регулирования суммарного магнитного потока от двух источников возбуждения: постоянных магнитов и обмотки возбуждения. Это

позволяет использовать слаботочную электронику для стабилизации выходного выпрямленного напряжения.

Таким образом, основными функциональными частями электронной системы управления генератором будут выпрямитель и регулятор напряжения, управляемый обмоткой возбуждения. В качестве выпрямителя в схеме применен диодный мост, выполненный по схеме Ларионова. Функциональная схема системы управления приведена на рис. 4.4.

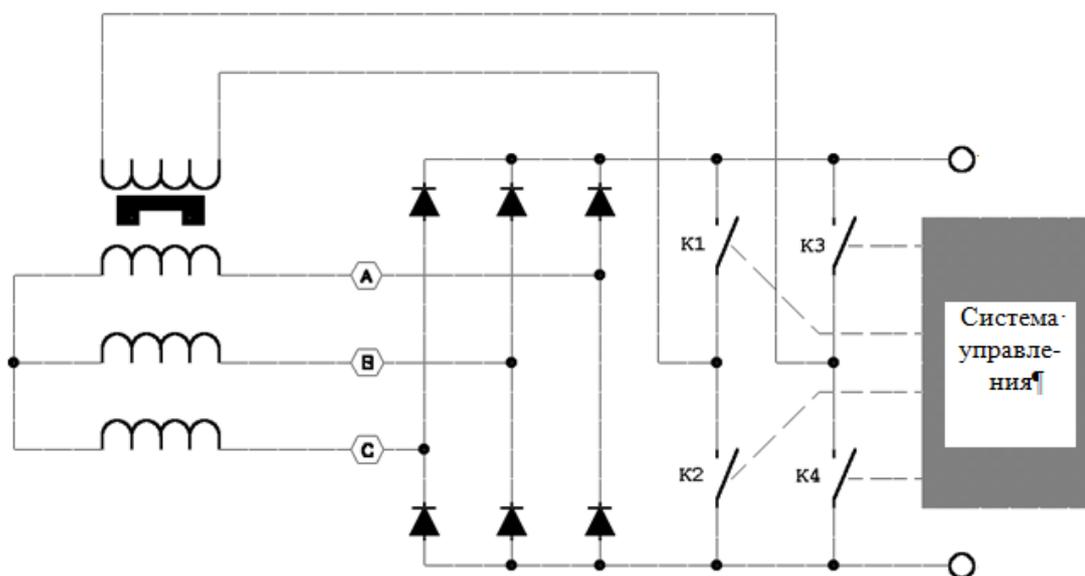


Рисунок. 4.4. Функциональная схема системы управления генератором

Ansys Electronics Desktop позволяет учитывать влияние электронной системы управления на работу электрической машины. Принципиальная схема строится с использованием программы имитатора электронных схем Maxwell Circuit, которая является приложением программы. На рис. 4.5. показан трехфазный выпрямитель и регулятор напряжения, который управляет обмоткой возбуждения для стабилизации выходного напряжения генератора. Обмотка возбуждения включена в мостовую схему. Плечами моста являются ключи, порог срабатывания которых определяется диапазоном стабилизации напряжения. При превышении требуемого выходного напряжения в регуляторе открываются ключи, которые

подключают обмотку возбуждения на подавление ЭДС от постоянных магнитов. При недостаточном напряжении происходит обратный процесс: подключается пара ключей, которые включают обмотку возбуждения на добавление ЭДС к напряжению, которое генерируют постоянные магниты.

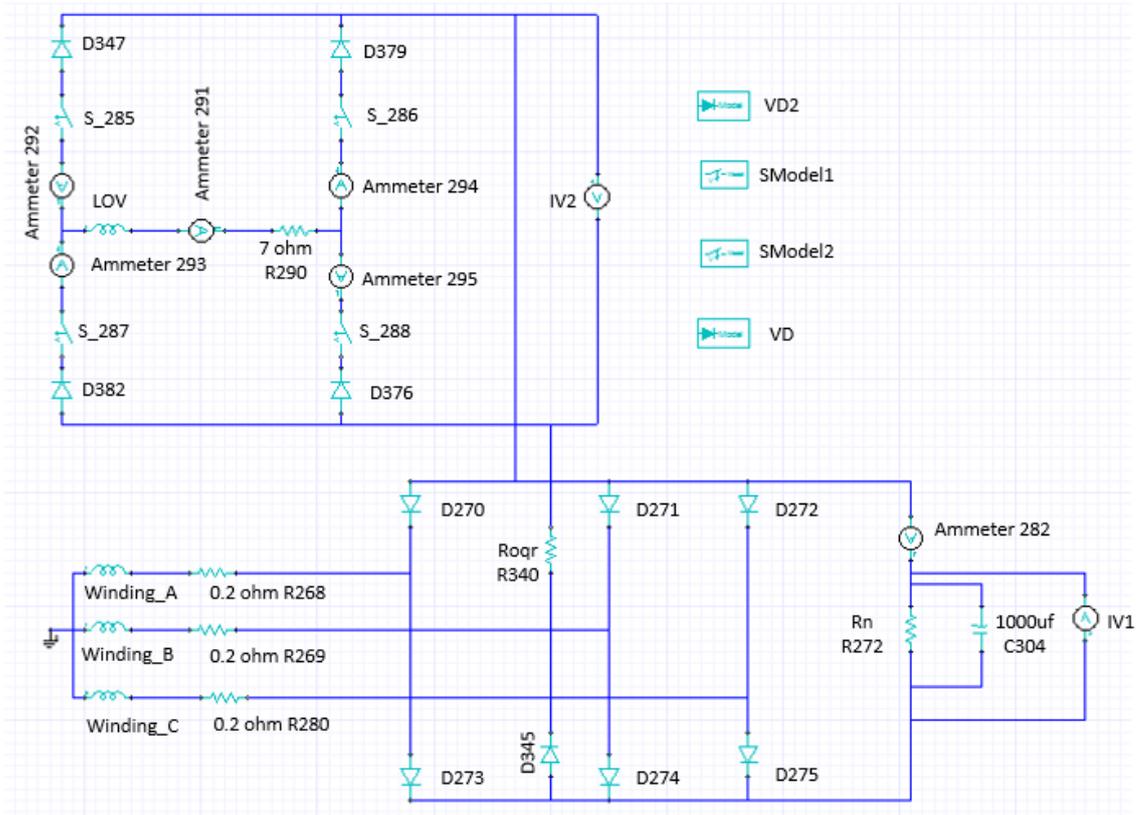


Рисунок. 4.5. Электронная схема системы управления

Цифровая модель опробована при разработке макетного образца гидрогенератора 3 кВт.

На рис.4.6 – 4.11 представлены основные характеристики разработанной трехмерной модели генератора: потокосцепление обмоток, фазные токи, ЭДС вращения, результирующее выпрямленное напряжение, кривая электромагнитного момента при номинальной нагрузке, кривая значения мгновенной электромагнитной мощности.

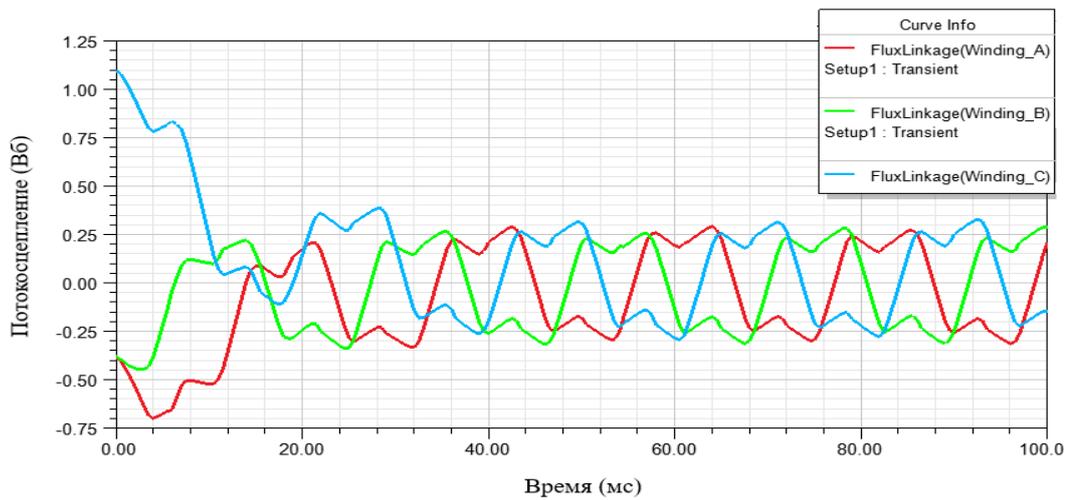


Рисунок. 4.6. Зависимости потокоцепления основного магнитного потока с фазами якорной обмотки

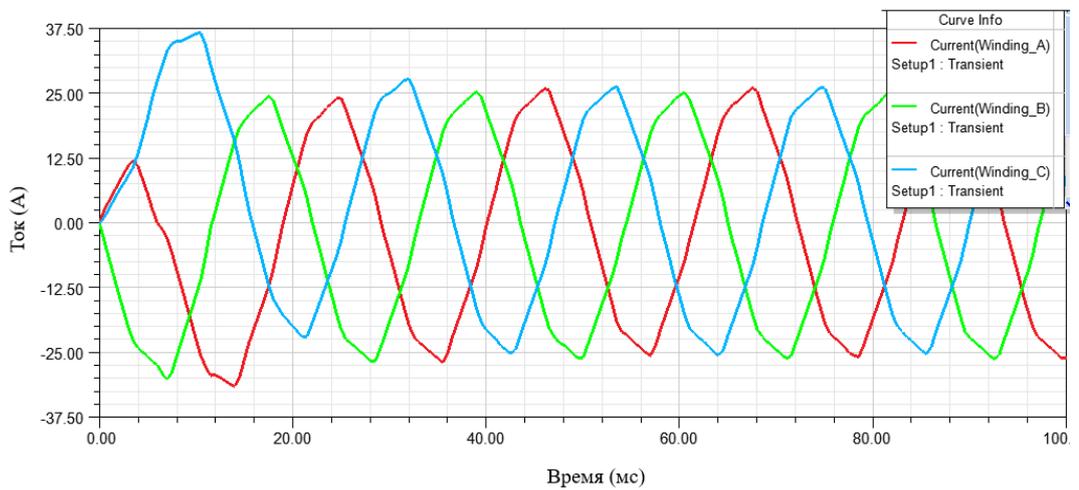


Рисунок.4.7. Зависимости фазных токов

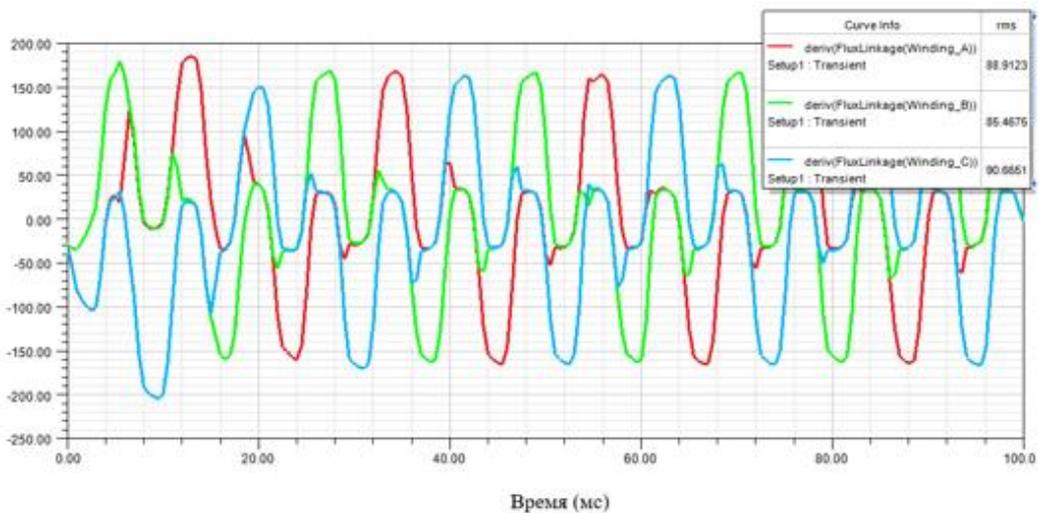


Рисунок.4.8. Зависимости ЭДС вращения, наводимые в фазах якорной обмотки от основного магнитного потока.

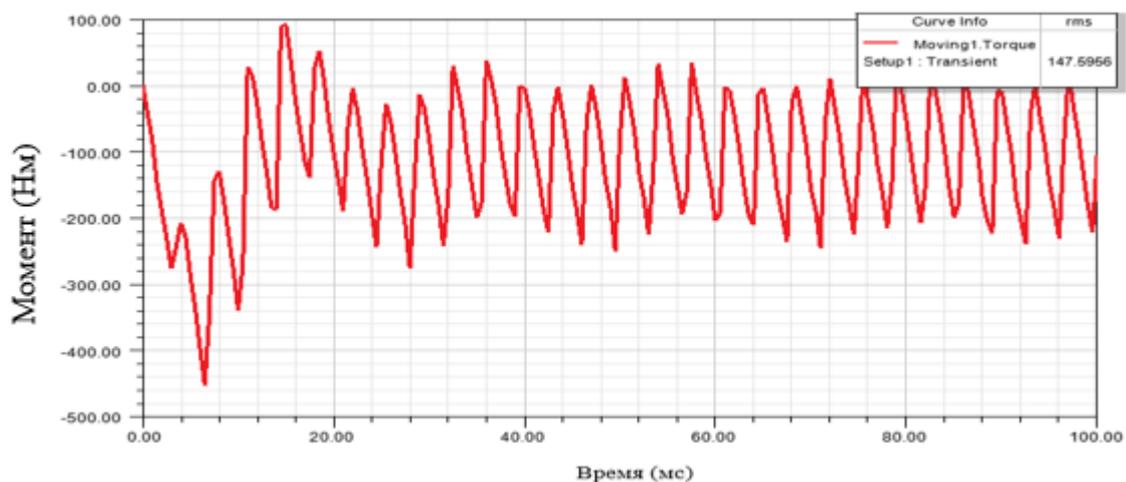


Рисунок. 4.9. Кривая крутящего момента при номинальной нагрузке

Расчетное значение выпрямленного напряжения (рис.4.10) показывает, что обмотка возбуждения достаточно эффективно стабилизирует напряжение в заданном диапазоне.

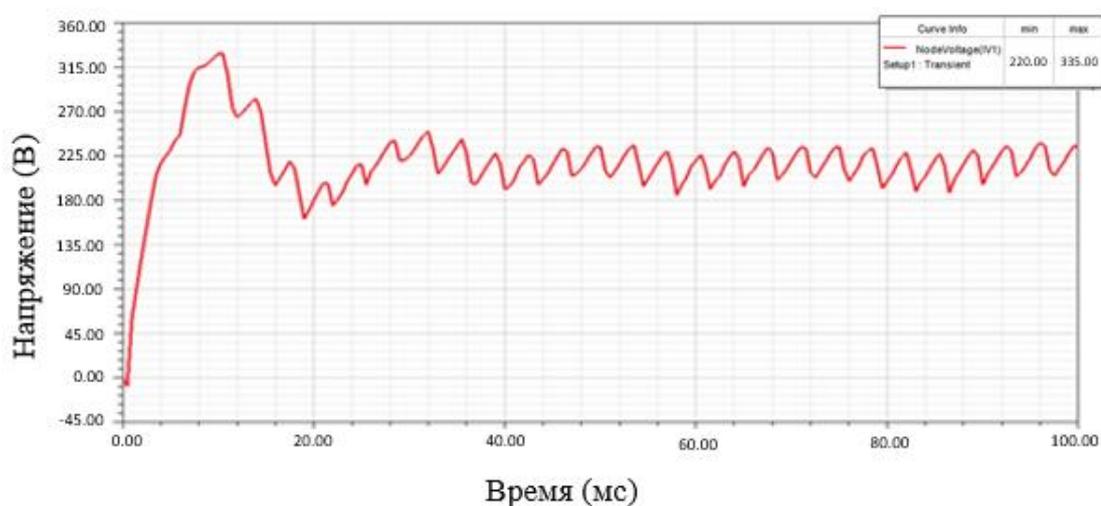


Рисунок. 4.10. Зависимости выпрямленного напряжения от времени

На рис. 4.11 показана кривая мгновенного значения выходной мощности. Среднее значение мощности при этом составляет 3 кВт, что подтверждает соответствие генератора одному из основных параметров: выходной мощности.

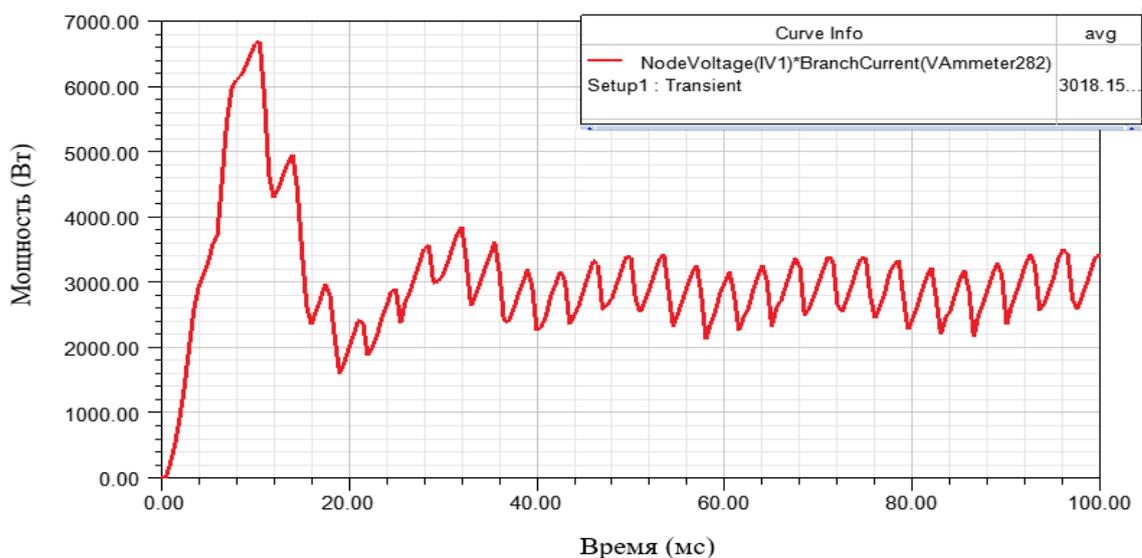


Рисунок. 4.11. Кривая мгновений мощности под нагрузкой

Расчетные кривые основных характеристик достаточно близки к осциллограммам реальных макетных образцов. Это говорит о том, что созданная цифровая модель практически является цифровым двойником реальной электрической машины и может быть использована для системы анализа при проектировании генераторов данного типа [184–193].

4.3. Анализ теплового состояния гидрогенератора

Тепловой анализ генератора очень важен, потому что изоляция обмоток и постоянные магниты имеют температурные пределы, которые определяют срок службы машины и ее надежность [95].

Основными источниками тепла в генераторе с постоянными магнитами являются: потери в меди (электрические) и потери в стали (магнитные). Наиболее значительными из них являются потери в меди. Это потери в якорной обмотке переменного тока и потери в обмотке возбуждения, питающейся от источника постоянного тока.

В конструкции с внешним ротором статор размещается внутри генератора, что затрудняет отвод тепла от внутренней части машины.

Уменьшение потерь в меди может быть достигнуто путем увеличения поперечного сечения проводников в обмотке статора и обмотки возбуждения, и тем самым, уменьшением активного сопротивления.

Известно, что электрические потери, в соответствии с законом Джоуля-Ленца, пропорциональны квадрату тока и активному сопротивлению.

Потери в стали сильно зависят от конструкции магнитопровода генератора, насыщения магнитной цепи и частоты изменения магнитного потока. Наибольшие магнитные потери можно обнаружить в зубцах статора машины, поскольку на этих участках плотность магнитного потока максимальна.

Следует отметить, что тепловой анализ представляет собой сложную техническую задачу. Проведем его в два этапа.

На первом этапе сделаем анализ теплового состояния на основе метода тепловых схем замещения [95]. Это достаточно распространённый метод, который дает хорошие результаты для определения усредненных температур. Но он не позволяет определить локальные перегревы, которые могут повлиять на тепловое нарушение изоляции и размагничивание постоянных магнитов.

На втором этапе сделаем более точный расчет и определим поле температур с учетом местного нагрева отдельных частей. Для этого воспользуемся методом конечных элементов, который реализует программа Ansys Iсерак [17–27].

4.3.1. Анализ теплового состояния генератора на основе метода эквивалентных тепловых схем замещения

На рис.4.12. представлен эскиз генератора и направление тепловых потоков от электрических и магнитных потерь.

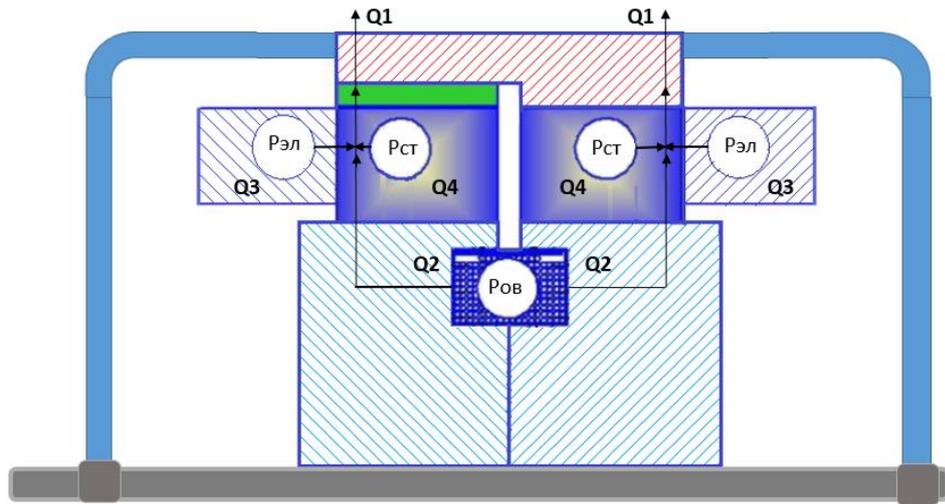


Рисунок. 4.12. Схема передачи электрических и магнитных потерь в генераторе комбинированного возбуждения.

На основе данного эскиза можно составить тепловую схему замещения генератора, представленную на рис. 4.13.

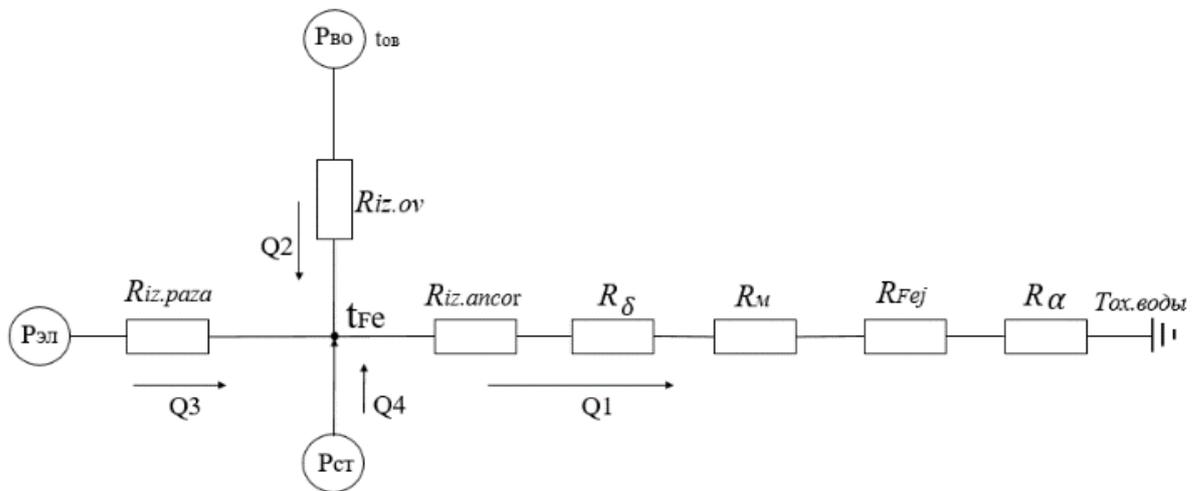


Рисунок. 4.13. Тепловая схема замещения генератор комбинированного возбуждения.

Определим тепловые сопротивления схемы замещения.

Тепловое сопротивление потоку, идущему через стенки пазов якоря в зубцовую зону и спинку статора:

$$R_{izpasa} = \frac{\Delta_{izpaz}}{\lambda_{iz} \cdot S_{izpaz}}. \quad (4.1)$$

где Δ_{izpaz} – толщина изоляции паза; S_{izpaz} – площадь изоляции всех пазов; λ_{iz} – теплопроводность изоляции.

Тепловое сопротивление потоку, проходящему через стенки катушки обмотки возбуждения в железо статора:

$$R_{izpov} = \frac{\Delta_{izpov}}{\lambda_{iz} \cdot S_{izpov}}. \quad (4.2)$$

где Δ_{izov} – толщина изоляции обмотки возбуждения; S_{izov} – площадь изоляции обмотки возбуждения;

Тепловое сопротивление движению потока в стали статора:

$$R_{izancor} = \frac{\Delta_{zyb}}{\lambda_{Fe} \cdot S_{Feancor}}. \quad (4.3)$$

где h_{zyb} – высота зубца; $S_{Feancor}$ – площадь сечения для теплового потока при его движении в железе якоря; λ_{Fe} – теплопроводность стали.

Тепловое сопротивление воздушного зазора

$$R_{\delta} = \frac{\delta}{\lambda_{\delta} \cdot S_{\delta}}. \quad (4.4)$$

где δ – величина воздушного зазора; S_{δ} – площадь воздушного зазора; λ_{δ} – теплопроводность воздуха.

Тепловое сопротивление движению потока в магните:

$$R_m = \frac{h_m}{\lambda_{Fe} \cdot S_m}. \quad (4.5)$$

где h_m – высота магнита; S_m – площадь сечения для теплового потока при его движении в магните.

$$R_{Fej} = \frac{h_j}{\lambda_{Fe} \cdot S_{Fej}}. \quad (4.6)$$

где h_j – высота спинки индуктора; S_{Fej} – площадь сечения для теплового потока при его движении в индукторе.

Тепловое сопротивление сходу тепла с внешней поверхности генератора:

$$R_\alpha = \frac{1}{\alpha \cdot S_{gen}}. \quad (4.7)$$

где α – коэффициент схода тепла с внешней поверхности генератора; S_{gen} – площадь внешней поверхности генератора.

Для тепловой схемы замещения можно составить следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} P_{эл} + P_{ов} + P_{см} &= Q1 \\ t_{об} - t_{Fe} &= P_{эл} \times R_{из.наза} \\ t_{ов} - t_{Fe} &= P_{ов} \times R_{из.наза} \\ t_{Fe} - t_{ох.воды} &= Q \times (R_{Fe} + R_{\lambda cx}). \end{aligned} \quad (4.8)$$

Для решения тепловой задачи с использованием метода эквивалентных тепловых схем замещения была разработана модель в программной среде Matlab (рис.4.14).

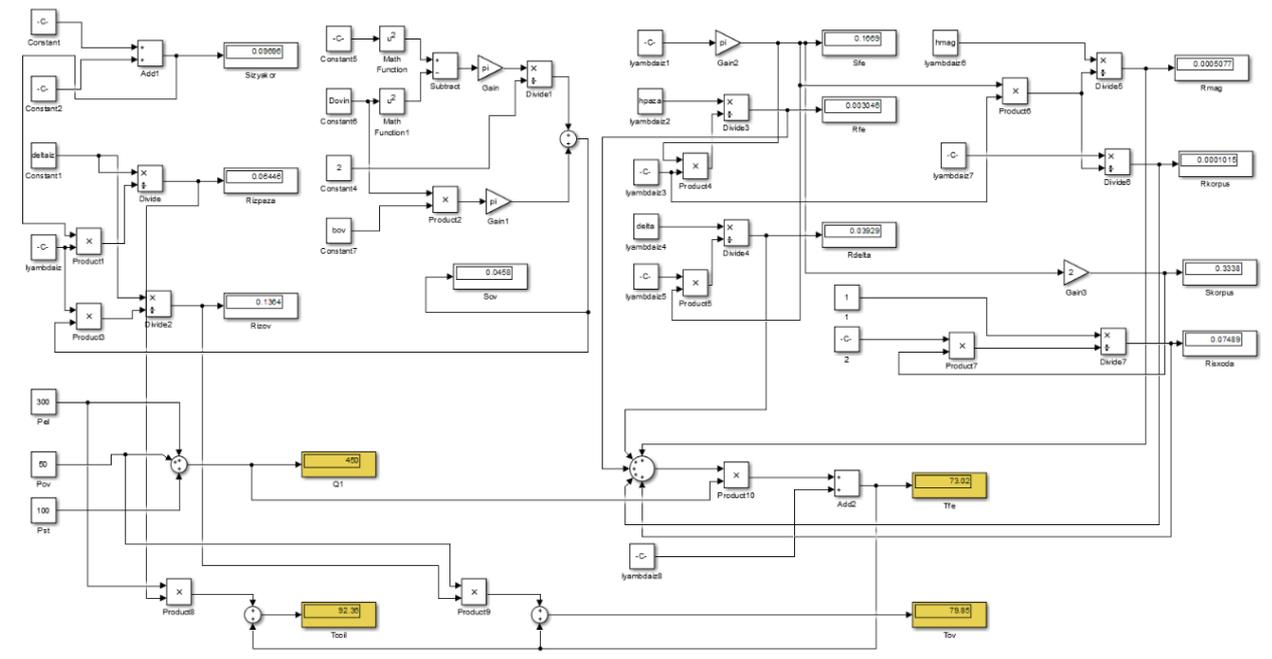


Рисунок. 4.14. Тепловая модель генератора в программе Matlab

Данную тепловую модель можно использовать для определения средних температур генератора при различных токовых нагрузках в зависимости от режима работы.

4.3.2. Анализ теплового состояния генератора на основе метода конечных элементов

Расчет теплового состояния на основе метода конечных элементов является трудоемким, но более точным методом [190,191]. Реализуем этот метод по следующей расчетной схеме. Первоначально выполним расчет электромагнитного состояния генератора в программе Ansys Electronics Desktop. По результатам этого расчета более точно определим потери в стали, в меди обмотки якоря и меди обмотки возбуждения. Далее передадим данные в программную оболочку Workbench. Она является связующим звеном с программой теплового расчета. На следующем этапе передадим данные непосредственно в программу расчета теплового поля Iserack.

Таким образом, мы решаем связанные магнитодинамическую и термодинамическую задачи.

Данная расчетная схема представлена на рис. 4.15.



Рисунок 4.15. Схема теплового расчета

В программе Icespak производится окончательная настройка тепловой задачи:

- уточняются материалы с учетом их термодинамических свойств;
- задаются размеры области, в которой осуществляется теплообмен;
- задается скорость охлаждающего агента и характер его движения (ламинарное, турбулентное);
- настраивается расчетная сетка.

Тепловой расчет осуществляется итерационным способом, в процессе которого уточняется сетка разбиения на конечные элементы и определяется сходимость вычислительного процесса (рис.4.16).

В результате расчета определяется температура в каждом элементе, на которые разбита модель генератора. Таким образом, мы можем рассчитать поле температур в отличие от интегральной температуры, которая определяется методом тепловых схем замещения. Распределение температуры для 3D модели, содержащей ротор, статор, катушки и магниты, показано на рис. 4.16.

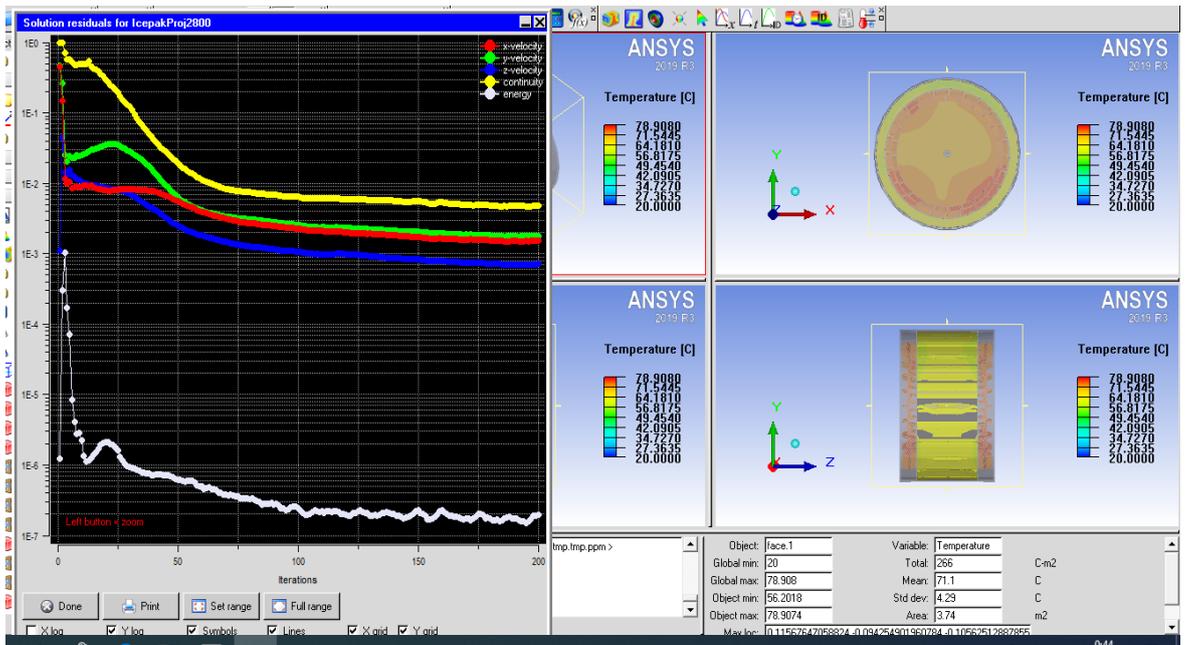


Рисунок. 4.16. График сходимости теплового процесса.

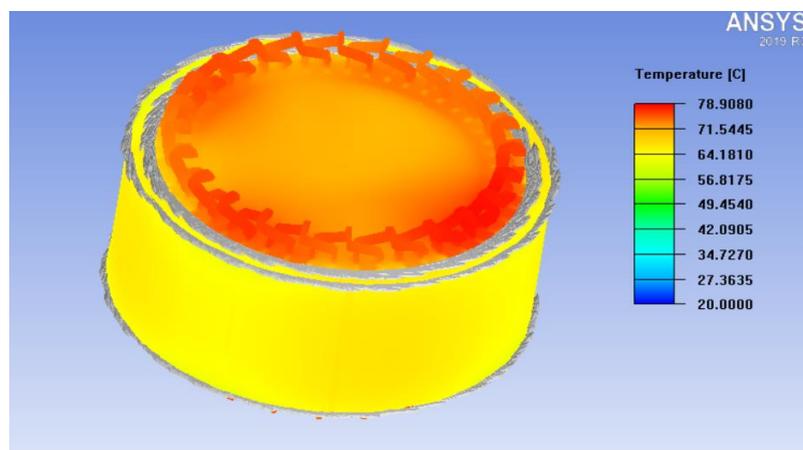
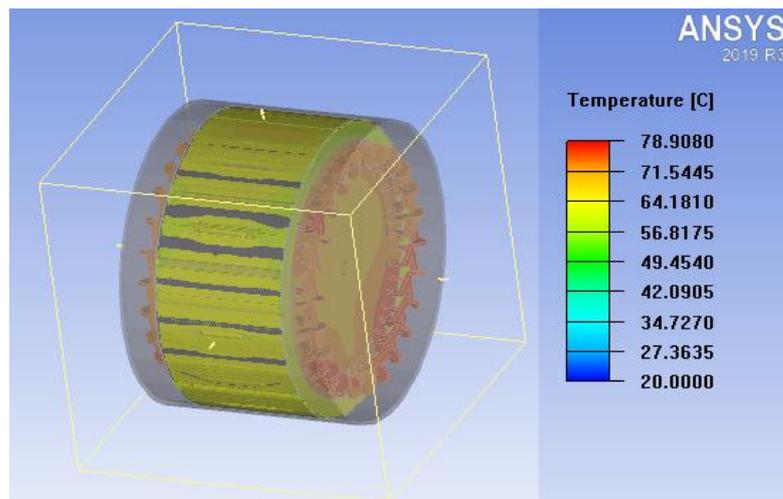


Рисунок. 4.17. Поле температур в объеме генератора

Наиболее нагретыми частями в генераторе комбинированного возбуждения является обмотка якоря и обмотка возбуждения.

Проведенные расчеты для конкретных проектов показали, что температуры, рассчитанные двумя разными методами, достаточно близки, при этом метод тепловых схем замещения дает более пессимистическую картину по нагреву для обмотки якоря. Это можно объяснить тем, что в схеме замещения не учитывается сход тепла с лобовых частей обмотки.

Выводы по главе 4

1. В данной главе разработана подсистема анализа проектной системы. Подсистема анализа включает в себя оценку электромагнитного состояния и оценку теплового состояния гидрогенератора. В основу подсистемы анализа положены разработанные и проверенные на практике САД программы, реализующие метод конечных элементов. Подсистема анализа связана с подсистемой синтеза общей оболочкой и входит в общую проектную систему по созданию гидрогенераторов данного типа.

2. Анализ магнитного состояния реализован в программной среде Ansys Electronics Desktop. Данные для анализа передаются из подсистемы синтеза, которая на предыдущем шаге определила оптимальную геометрию магнитной цепи и обмоточные данные. Подсистема в автоматическом режиме создает трехмерную твердотельную модель для оценки электромагнитного состояния. При этом учитывается осевая симметрия и условия периодичности. Модель параметризована, при этом она легко перестраивается в случае корректировки геометрии по результатам оптимизации на предыдущем шаге. Модель содержит имитатор электронной системы управления, в которую входит трехфазный выпрямитель, выполненный по схеме Ларионова и регулятор напряжения по слаботочной цепи возбуждения. Модель электромагнитного анализа является цифровым двойником опытного образца с электронной системой управления.

3. Анализ теплового состояния реализован в два этапа. На первом этапе используется метод тепловых схем замещения, на основании которого определяются усреднённые температуры нагрева частей гидрогенератора, в которых выделяются электрические и магнитные потери. На втором этапе применена САД система Ansys Icerak, реализующая метод конечных элементов. Для построения тепловой модели второго этапа решается связанная электромагнитная и тепловая задача. Первоначально осуществляется электромагнитный расчет в САД системе Insys Electronick Desktop. Далее через оболочку Ansys Workbench геометрия, информация о материалах для тепловой задачи и более точно рассчитанные потери передаются в программу Ansys Icerak. В результате рассчитывается поле температур с учетом локальных перегревов. Модель параметризована и легко перестраивается при корректировке геометрии по результатам оптимизации.

5. РАЗРАБОТКА ПРОЕКТНОЙ СИСТЕМЫ ПО СОЗДАНИЮ ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ КОМБИНИРОВАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Вводные замечания

Основное назначение разрабатываемой проектной системы заключается в гибком проектировании мини – ГЭС для конкретного места реки с учетом параметров водяного потока. Такое гибкое проектирование позволяет по максимуму эффективно использовать водные ресурсы данного места реки, в отличие от проектного подхода, при котором проектируется ряд мини – ГЭС с различными параметрами по мощности и частоте вращения, и конкретная мини – ГЭС выбирается из этого ряда. Современное гибкое производство адаптировано под эту ситуацию и позволяет производить штучную продукцию под конкретный заказ.

Соответственно проектная система должна включать в себя расчет энергетических параметров реки, далее определение основных характеристик мини–ГЭС и их количества, затем синтез оптимальной геометрии гидрогенератора, далее анализ его электромагнитного состояния с учетом работы электронной системы управления, анализ теплового состояния, и на заключительном этапе разработку конструкции мини – ГЭС на основе создания трехмерных моделей с созданием комплекта конструкторской и ремонтно-эксплуатационной документации.

5.1. Оценка энергетического потенциала реки

С учетом того, что проектируемая мини – ГЭС построена по принципу не плотинного типа, а по принципу полностью погруженной в воду станции, энергетический потенциал реки следует рассчитывать по кинетической энергии водяного потока в данном месте. Тогда мощность водяного потока можно определить по формуле:

$$P_r = \frac{\rho_v h_r b_r V_r^3}{2}, \quad (5.1)$$

где ρ_v – удельная плотность воды (кг/м³); h_r – средняя глубина реки (м); b_r – ширина реки в выбранном месте (м); V_r – средняя скорость водяного потока (м/с).

Следует учитывать, что для водопогружной мини – ГЭС мы можем использовать только часть водяного потока. Остальная часть обойдет водозаборные устройства стороной.

Оценим эти потери коэффициентом использования водяного потока реки:

$$k_r = \frac{Q_{gen}}{Q_{total}}, \quad (5.2)$$

где Q_{ges} – расход водяного потока, проходящего через мини – ГЭС (м³/с); Q_{total} – расход водяного потока реки в выбранном месте (м³/с).

Лопатки турбины могут использовать только часть механической энергии водяного потока. Полное использование этой энергии означало бы, что водяной поток должен остановиться и приобрести нулевую скорость, что не реально. Теоретически для лопаток турбины КПД не может превышать 0.5.

Для оценки энергии водяного потока, который дойдет до генератора после лопаток, примем КПД турбины $\eta_{tur} = 0.25$. Следует признать, что это весьма пессимистическая оценка, но она дает нам запас и покрывает погрешность расчета.

Далее, механическая энергия, пришедшая на вал генератора, теряется за счет электрических и магнитных потерь η_{gen} .

Последняя ступень потерь происходит в электронной системе управления и силовых ключах выпрямителя η_{sys} .

Потерями в проводах при передаче электроэнергии при расстояниях, на которые рассчитана мини – ГЭС, можно пренебречь.

По теории с точки зрения эффективности преобразования электроэнергии и улучшения массоэнергетических показателей, следует увеличивать единичную мощность гидрогенератора, но как было отмечено выше, одним из требований, предъявляемых к мини – ГЭС, являются требования не нарушения экологии окружающей среды и эстетики. С этой точки зрения генераторы полностью погружаются в воду и их должно быть несколько по сечению реки, соединенных в параллель n_{gen} .

Таким образом, единичная мощность мини – ГЭС P_{gen} определится по формуле:

$$P_{gen} = \frac{P_r k_r \eta_{tur} \eta_{gen} \eta_{sys}}{n_{gen}} \quad (5.3)$$

Как видно из формулы, мощность генератора определяется энергетическими возможностями реки в данном месте.

На основании этой оценки можно определить наилучшее место для построения мини – ГЭС на данной реке.

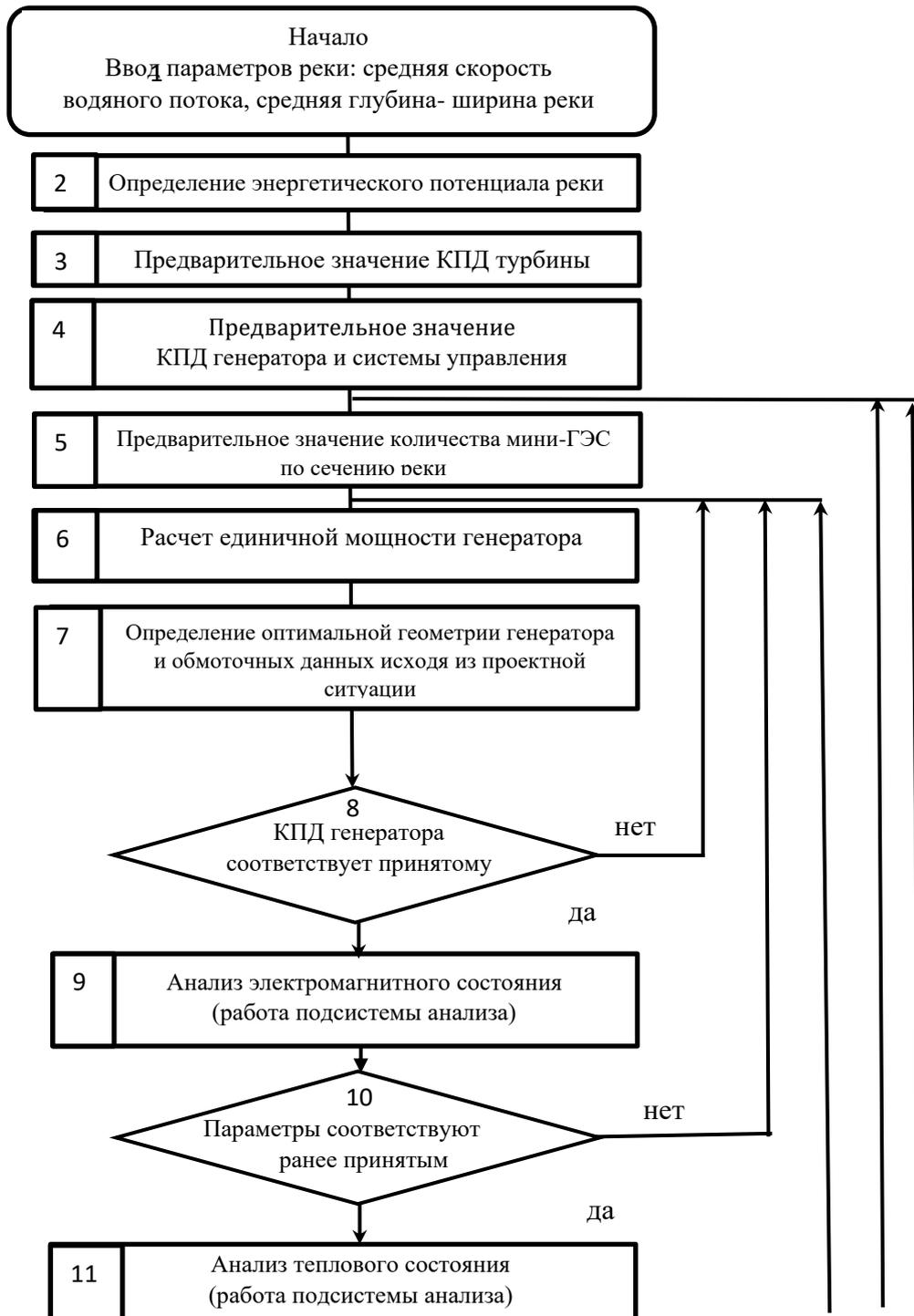
5.2. Структурная схема проектной системы по созданию гидрогенератора

Исходя из приведенной выше оценки, для проектной системы можно представить следующую структурную блок – схему (рис.5.2.1.).

Проектирование начинается с оценки энергетического потенциала того места реки, где планируется установка группы мини – ГЭС. Далее необходимо, предварительно задавшись коэффициентами использования водяного потока, КПД турбины, генератора, системы управления и количества мини – ГЭС в блоке, определить единичную мощность генератора. Этой информации вполне достаточно, чтобы подключить к расчету оптимальное проектирование геометрии генератора. Начинает работать подсистема синтеза. После оптимизационных расчетов проверяется необходимость корректировки геометрии за счет изменения КПД генератора,

который влияет на определение геометрии. При необходимости расчет повторяется с блока 6 алгоритма.

Далее начинает работать подсистема анализа. Первоначально производится анализ электромагнитного состояния генератора. Расчёты корректируются с блока 6, если полученные при анализе параметры существенно расходятся.



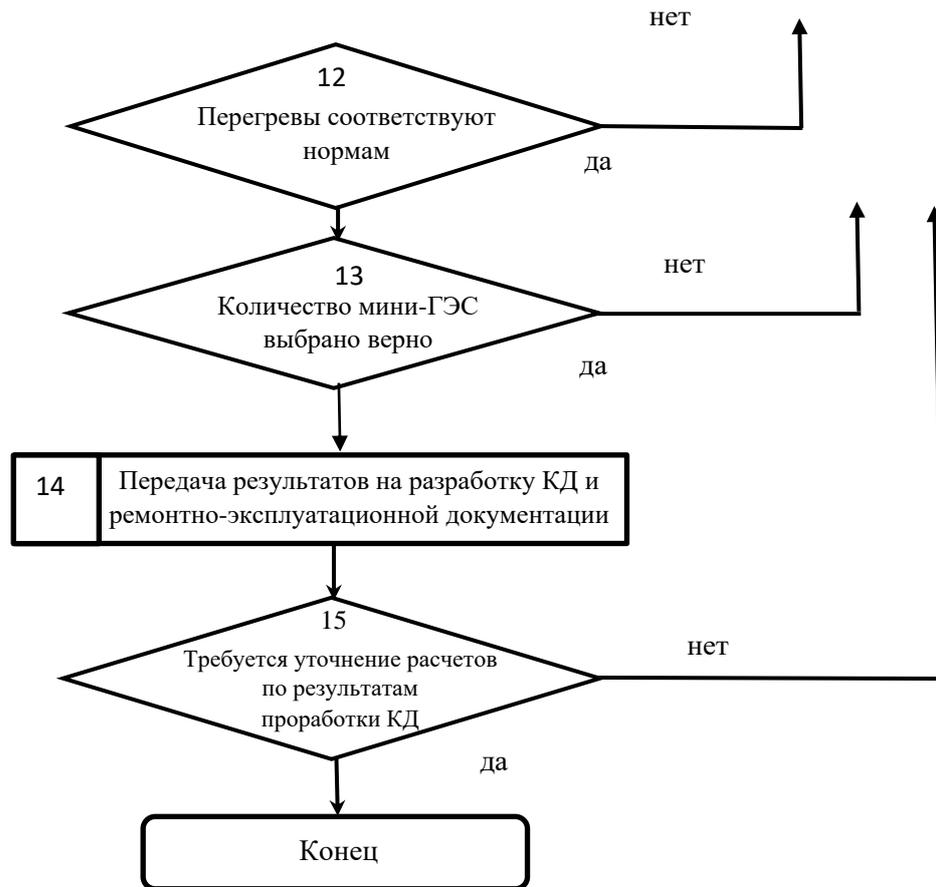


Рисунок 5.2.1. Структурная блок – схема проектной

Расчёты корректируются с блока 6, если полученные при анализе параметры существенно расходятся с предварительно принятыми.

Далее система переходит к анализу теплового состояния генератора. Это заключительный этап анализа. Если расчеты показывают недопустимый перегрев активных частей генератора, то система возвращается к блоку шесть алгоритма и происходит циклическая корректировка всех ранее проделанных шагов.

Перед тем, как передать результаты проекта конструкторскому отделу на окончательное проектирование, еще раз уточняется количество мини – ГЭС в блоке.

На этапе конструкторской проработки создается полный комплект конструкторской и технологической документации для изготовления

опытного образца. Если технологические службы потребовали изменения размеров, которые непосредственно влияют на выходные характеристики (величина воздушного зазора, ширина зубца пакета статора, высота спинки якоря, высота и ширина магнита и т.д.), необходимо вернуть проектную систему к блоку 5 алгоритма и повторить пройденные циклы заново.

На рис. 5.2.2 показана оболочка проектной системы, которая реализует задачи анализа и синтеза по проектированию гидрогенераторов комбинированного возбуждения.

Оболочка создана по представленному алгоритму. Она позволяет для генератора единичной мощности рассчитать оптимальную геометрию. При этом, оптимизации может быть проведена с определенного уровня, который определяется техническим заданием. Возможна полная габаритная оптимизация, оптимизация при фиксированных диаметрах якоря, внутреннего диаметра, активной длины, при заданных габаритах якоря.

Программа реализует электромагнитный анализ в CAD системе Ansys Electronics Desktop и тепловой анализ в CAD системе Ansys Icepak и Matlab.

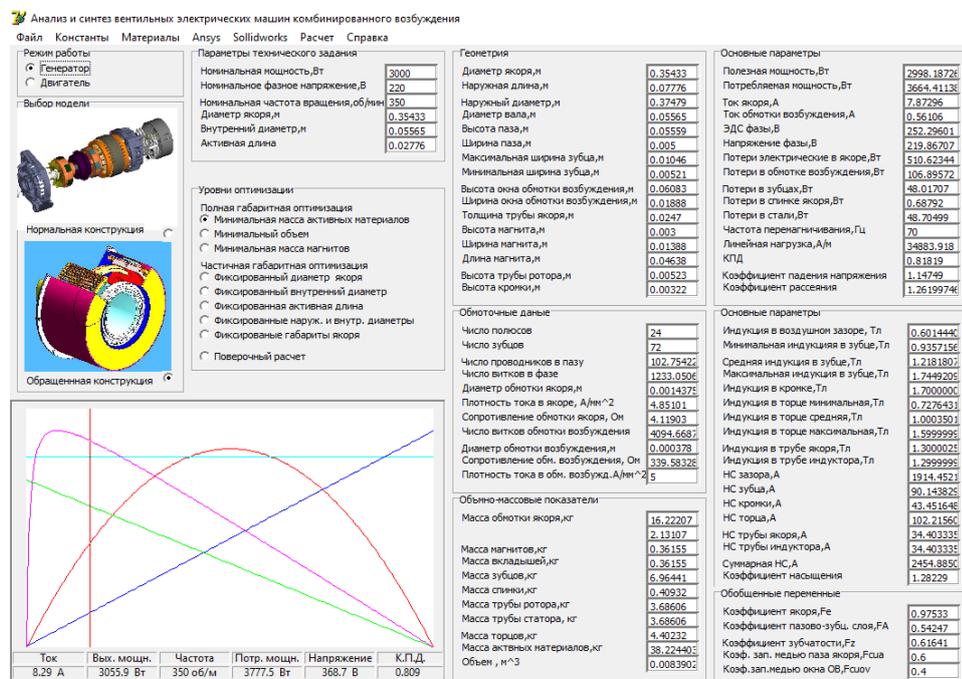


Рисунок 5.2.2. Интерфейс проектной системы по проектированию генератора комбинированного возбуждения

Данная оболочка связывает в единый комплекс задачи синтеза и анализа. В процессе проектирования происходит взаимная передача данных из одной подсистемы в другую, что оперативно позволяет осуществлять циклы проектирования.

Разработанная проектная система опробована на конкретных проектах.

5.3. Использование проектной системы для разработки мини-ГЭС для реки Искандердарья (Таджикистан)

Проверим работоспособность разработанной системы на конкретном проекте. Разработаем каскад водопогружных мини – ГЭС для реки Искандердарья (Таджикистан).

Искандердарья берёт начало из озера Искандеркуль в его северо-восточной части, на высоте около 2200 м (рис.5.3.1.). Река течёт в общем северо – восточном направлении (на небольших участках в верховье – к востоку и к северу). Ниже истока русло проходит между скальными массивами. На берегах реки стоят населённые пункты Нарвад, Дижик, Хайронбед [201].

Длина Искандердарьи составляет 20 км, площадь бассейна – 950 км². Питание реки снеговое и ледниковое. Среднемноголетний расход воды на выходе из озера Искандеркуль равен 19 м³/с. Ширина реки в верхнем течении – 2.7 м, нижнем течении – 5 м; глубина в верхнем течении – 1,8 м, в нижнем течении – 1,0 м, дно каменистое [201].

Для установки каскада мини-ГЭС выбираем русло реки шириной 5 м и средней глубиной 1 м. При расходе воды 19 м³/с скорость движения водяного потока составит 3.8 м/с.

Полная мощность реки в выбранном сечении составит (Вт):

$$P_r = \frac{\rho_v \cdot h_r \cdot b_r \cdot V_r^3}{2} = \frac{1000 \cdot 1,0 \cdot 5,0 \cdot 3,8^3}{2} = 137180 \text{ Вт} . \quad (5.4)$$

Примем для расчета номинальной мощности гидрогенератора следующие расчетные параметры:

- коэффициент использования водяного потока реки $k_r = 0.5$;
- КПД турбины гидрогенератора $\eta_{tur} = 0.25$;
- КПД вентильного генератора комбинированного возбуждения $\eta_{gen} = 0.8$;
- КПД выпрямительного блока и системы управления $\eta_{sys} = 0.9$.



Рисунок. 5.3.1. Река Икандердаря Таджикистан.

Следует отметить, что выбранные параметры носят несколько пессимистический характер, чтобы иметь некоторый запас для параметров опытного образца.

Исходя из реальной ширины реки, разместим в выбранном сечении 4 водопогружных гидрогенератора.

Оценим мощность единичного гидрогенератора (Вт):

$$P_{gen} = \frac{P_r \cdot k_r \cdot \eta_{tur} \cdot \eta_{gen} \cdot \eta_{sys}}{n_{gen}} = \frac{137180 \cdot 0,5 \cdot 0,25 \cdot 0,8 \cdot 0,9}{4} = 3087 \text{ Вт} . \quad (5.5)$$

Предварительные гидравлические расчеты позволили определить частоту вращения гидрогенератора. Она составила 350 об/мин.

Таким образом, будем проектировать гидрогенератор на мощность 3 кВт, 220 В фазного напряжения и заданной частотой вращения.

Весь каскад будет включать в себя 4 гидрогенератора, мощность которого составит 12 кВт. С учетом накопителя электроэнергии данной мощности вполне достаточно для питания небольшого туристического комплекса, находящейся на берегу озера Искандеркуль.

Исходя из условия, что гидроэнергокомплекс должен быть полностью погружен в воду, чтобы быть незаметным и не нарушать эстетику данного горного места, для оптимизации геометрии выберем уровень с ограничением внешнего диаметра якоря. Поскольку в выбранном месте глубина составляет 1 м, то наружный диаметр колеса гидрогенератора не должен превышать данный размер. Ряд предварительных расчетов показали, что с учетом обращенной конструкции диаметр якоря должен составить при этом 354 мм. Оптимизацию проведем для критерия минимальной суммарной массы активных материалов (меди, железа и постоянных магнитов). Настройка оптимизации на данный режим показана на рис. 5.3.2.

Результаты расчета оптимальной геометрии генератора представлены на рис. 5.3.3.

Расчетные рабочие характеристики генератора представлены на рис. 5.3.4.

Поскольку подсистема синтеза подтвердила, что рассчитанный генератор будет иметь заданные номинальные параметры и предварительно заданный КПД генератора практически совпал с расчетным, то можно перейти к подсистеме анализа электромагнитного состояния генератора.

Анализ и синтез вентильных электрических машин комбинированного возбуждения

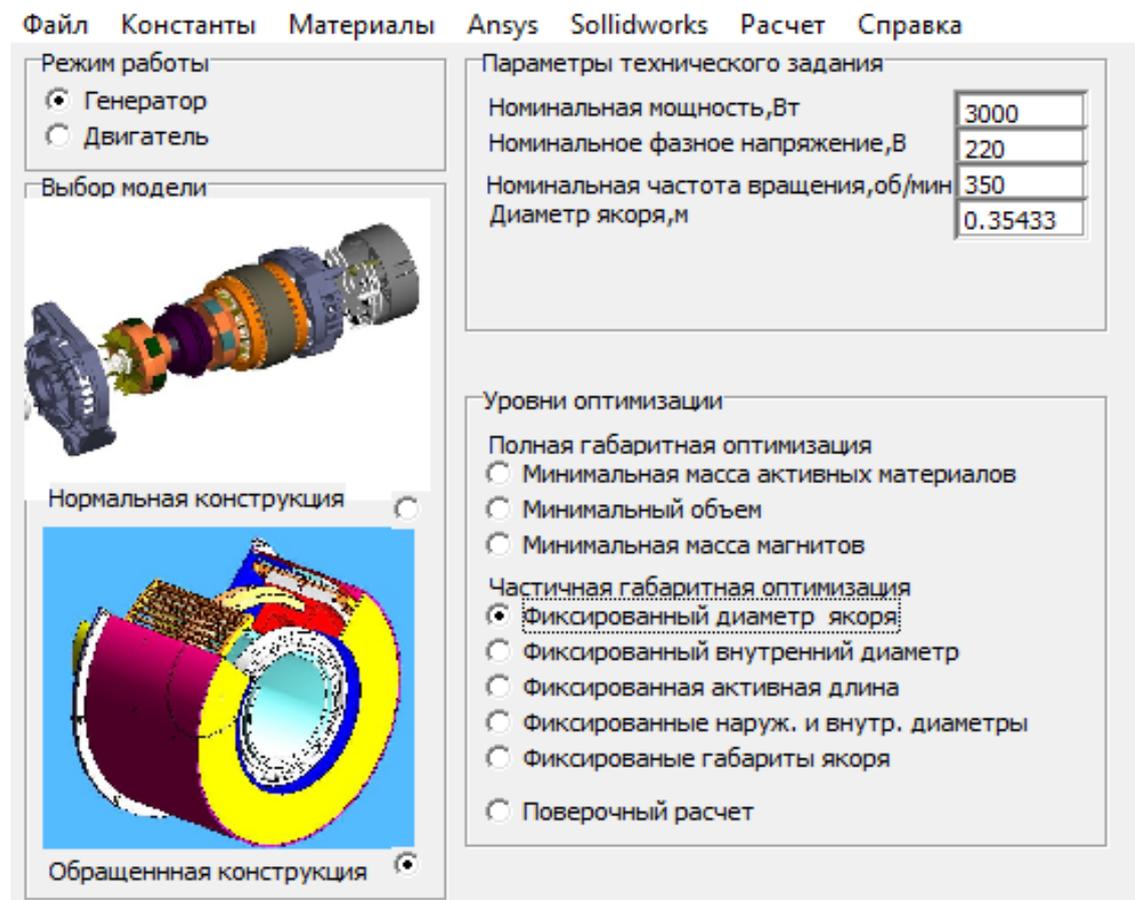


Рисунок. 5.3.2. Настройка проектной системы на оптимизацию при фиксированном диаметре якоря.

При нажатии опции Ansys формируется скрипт, который передает геометрию, обмоточные данные и токовые нагрузки в CAD систему Ansys Electronics Desktop. Данные записываются в параметры системы Project Variables. Следующий заранее подготовленный скрипт на основе этой информации создает трехмерную твердотельную модель и подготавливает ее для расчета, формируя граничные условия с учетом периодичности и токовые нагрузки.

Геометрия		Основные параметры	
Диаметр якоря,м	0.35433	Полезная мощность,Вт	2998.18726
Наружная длина,м	0.07776	Потребляемая мощность,Вт	3664.41138
Наружный диаметр,м	0.37479	Ток якоря,А	7.87296
Диаметр вала,м	0.05565	Ток обмотки возбуждения,А	0.56106
Высота паза,м	0.05559	ЭДС фазы,В	252.29601
Ширина паза,м	0.005	Напряжение фазы,В	219.86707
Максимальная ширина зубца,м	0.01046	Потери электрические в якоре,Вт	510.62344
Минимальная ширина зубца,м	0.00521	Потери в обмотке возбуждения,Вт	106.89572
Высота окна обмотки возбуждения,м	0.06083	Потери в зубцах,Вт	48.01707
Ширина окна обмотки возбуждения,м	0.01888	Потери в спинке якоря,Вт	0.68792
Толщина трубы якоря,м	0.0247	Потери в стали,Вт	48.70499
Высота магнита,м	0.003	Частота перемагничивания,Гц	70
Ширина магнита,м	0.01388	Линейная нагрузка,А/м	34883.918
Длина магнита,м	0.04638	КПД	0.81819
Высота трубы ротора,м	0.00523	Коэффициент падения напряжения	1.14749
Высота кромок,м	0.00322	Коэффициент рассеяния	1.26199746
Обмоточные данные		Основные параметры	
Число полюсов	24	Индукция в воздушном зазоре, Тл	0.6014440
Число зубцов	72	Минимальная индукция в зубце,Тл	0.9357156
Число проводников в пазу	102.75422	Средняя индукция в зубце,Тл	1.2181807
Число витков в фазе	1233.05066	Максимальная индукция в зубце,Тл	1.7449209
Диаметр обмотки якоря,м	0.0014375	Индукция в кромке,Тл	1.7000000
Плотность тока в якоре, А/мм ²	4.85101	Индукция в торце минимальная,Тл	0.7276431
Сопротивление обмотки якоря, Ом	4.11903	Индукция в торце средняя,Тл	1.0003501
Число витков обмотки возбуждения	4094.6687	Индукция в торце максимальная,Тл	1.5999999
Диаметр обмотки возбуждения,м	0.000378	Индукция в трубе якоря,Тл	1.3000025
Сопротивление обм. возбуждения, Ом	339.58328	Индукция в трубе индуктора,Тл	1.2999999
Плотность тока в обм. возбужд.А/мм ²	5	НС зазора,А	1914.4521
Объемно-массовые показатели		НС зубца,А	90.143829
Масса обмотки якоря,кг	16.22207	НС кромок,А	43.451648
Масса магнитов,кг	2.13107	НС торца,А	102.21560
Масса вкладышей,кг	0.36155	НС трубы якоря,А	34.403335
Масса зубцов,кг	0.36155	НС трубы индуктора,А	34.403335
Масса спинки,кг	0.40932	Суммарная НС,А	2454.8850
Масса трубы ротора,кг	3.68606	Коэффициент насыщения	1.28229
Масса трубы статора,кг	3.68606	Обобщенные переменные	
Масса торцов,кг	4.40232	Коэффициент якоря,Fe	0.97533
Масса активных материалов,кг	38.224403	Коэффициент пазово-зубц. слоя,FA	0.54247
Объем, м ³	0.0083902	Коэффициент зубчатости,Fz	0.61641
		Коэф. зап. медью паза якоря,Fcuа	0.6
		Коэф. зап. медью окна ОВ,Fcuov	0.4

Рисунок. 5.3.3. Результаты расчета режима оптимизации при фиксированном диаметре якоря и минимуме расхода активных материалов.

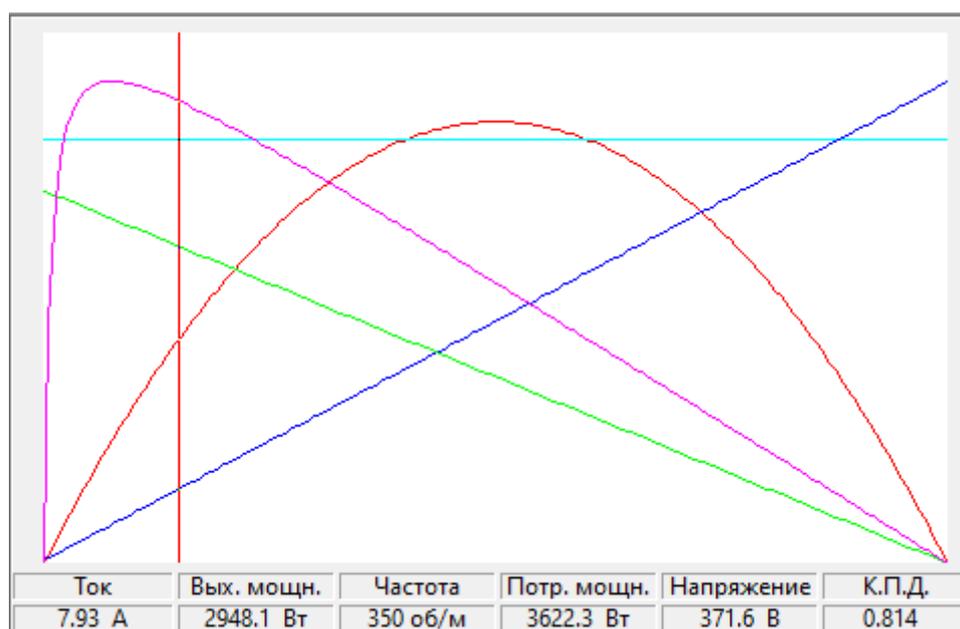


Рисунок. 5.3.4. Расчетные характеристики генератора

Фрагменты этого анализа представлены на рис. 5.3.5.

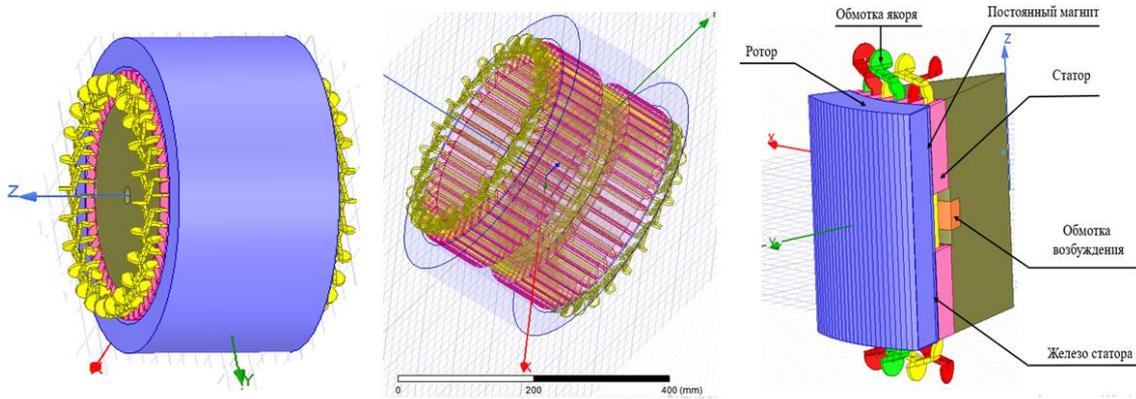


Рисунок. 5.3.5. Результаты формирования трехмерной твердотельной модели по командам скрипта.

Далее происходит расчет магнитного поля с учетом заданных токовых нагрузок.

Результаты этого анализа представлены на рис. 5.3.6.

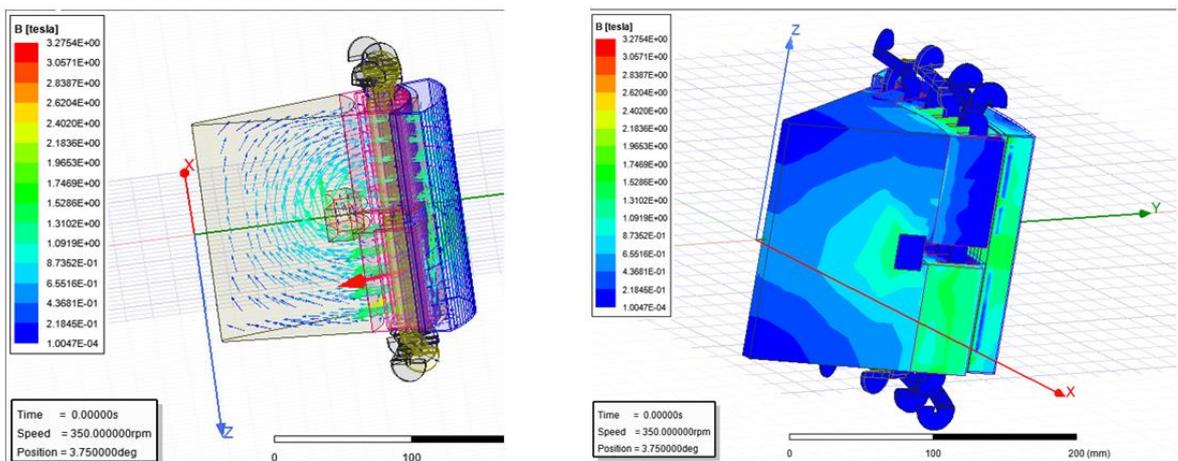


Рисунок. 5.3.6. Результаты расчета магнитного поля.

На следующем этапе к модели автоматически подключается заранее сформированный имитатор выпрямительного блока, собранный по схеме Ларионова, и имитатор регулятора напряжения, которые подробно описаны в главе 4.

Происходит анализ цифрового двойника генератора с системой управления. На рис.5.3.7 видно, что генератор выполняет свою основную функцию и выдает в сеть среднюю мощность 3 кВт.

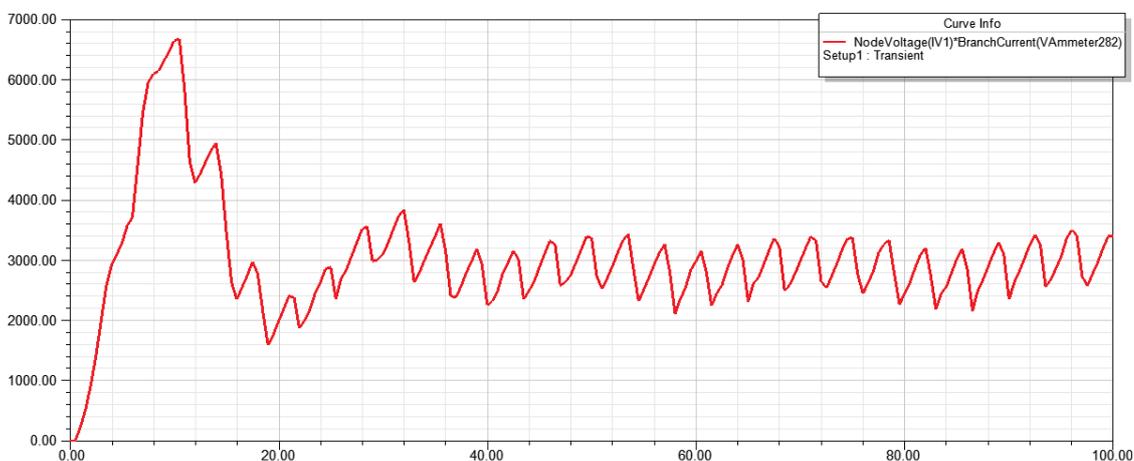


Рисунок. 5.3.7. Расчетная выходная мощность генератора

Данные результаты позволяют перейти к заключительному этапу – анализу установившихся перегревов при номинальной нагрузке.

Расчетные потери генератора составили:

- электрические потери в обмотке якоря 302.4 Вт;
- электрические потери в обмотке возбуждения 48.9Вт;
- магнитные потери 98,7 Вт.

Расчет температур активных частей показал следующие результаты:

- температура в железе статора 75 °С;
- температура в обмотке якоря 78,9 °С;
- температура в обмотку возбуждения 74,7 °С,

что вполне приемлемо для выбранного класса изоляции F (155 С°).

Для исключения опасности местных перегревов проведем более подробный анализ теплового состояния в САД системе Ansys Icerak. Трехмерная модель и рассчитанные поэлементно электрические и магнитные потери передаются из программы Ansys Electronics Desktop через оболочку Ansys Workbench в программу Ansys Icerak. Работа этой части подсистемы

анализа подробно описана в главе 4. Результаты расчета теплового поля генератора представлены на рис. 5.3.8.

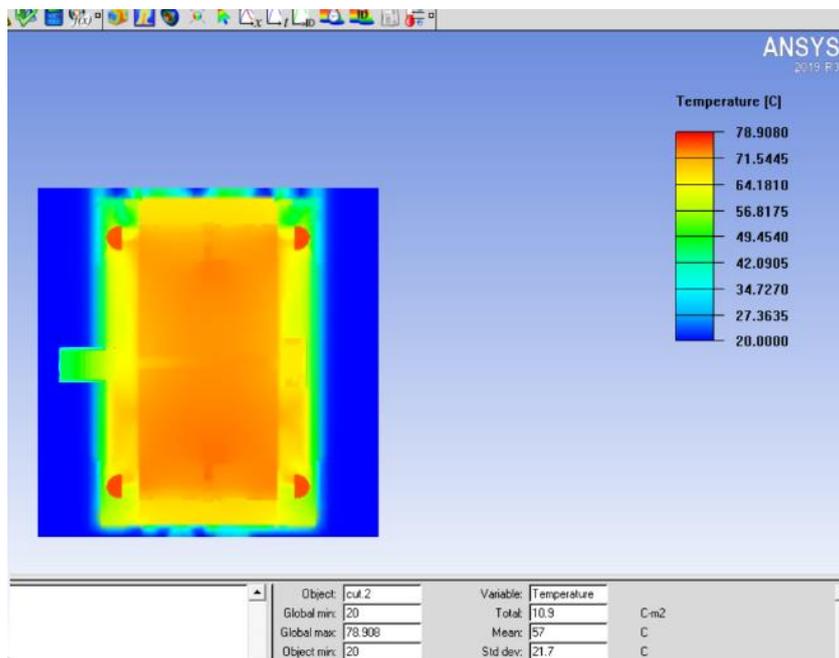


Рисунок. 5.3.8. Расчетное поле температур в сечении генератора

Расчеты подтверждают отсутствие локальных перегревов генератора.

Таким образом, спроектированный генератор удовлетворяет всем номинальным параметрам и эксплуатационным требованиям. Далее можно приступить к конструкторской проработке рассчитанного генератора.

5.4. Разработка конструкции гидрогенератора в CAD системе Solidworks

Как было отмечено, генератор представляет собой электрическую машину, которая полностью погружена в воду. Особенность конструкции таких машин заключается в том, что в них очень сложно обеспечить герметичность. При выделении тепловых потерь внутреннее пространство нагревается и среда, находящаяся внутри электрической машины через уплотнения, вытесняется в воду. При остывании во внутреннем объеме создается разрежение, и вода всасывается через уплотнение вала. В результате нескольких таких циклов внутренняя полость генератора

становится заполненной водой, которая вызывает коррозию и разрушение магнитопровода.

Единственным эффективным способом борьбы с этим эффектом является заполнение внутреннего объема маслом с низкой вязкостью, которое обладает гидрофобным свойством и не позволяет воде проникнуть во внутрь. Для выхода масла из объема при расширении от нагрева должны быть предусмотрены специальные компенсаторы объема. Один из возможных вариантов конструкции компенсатора объема представлен на рис. 5.4.1.

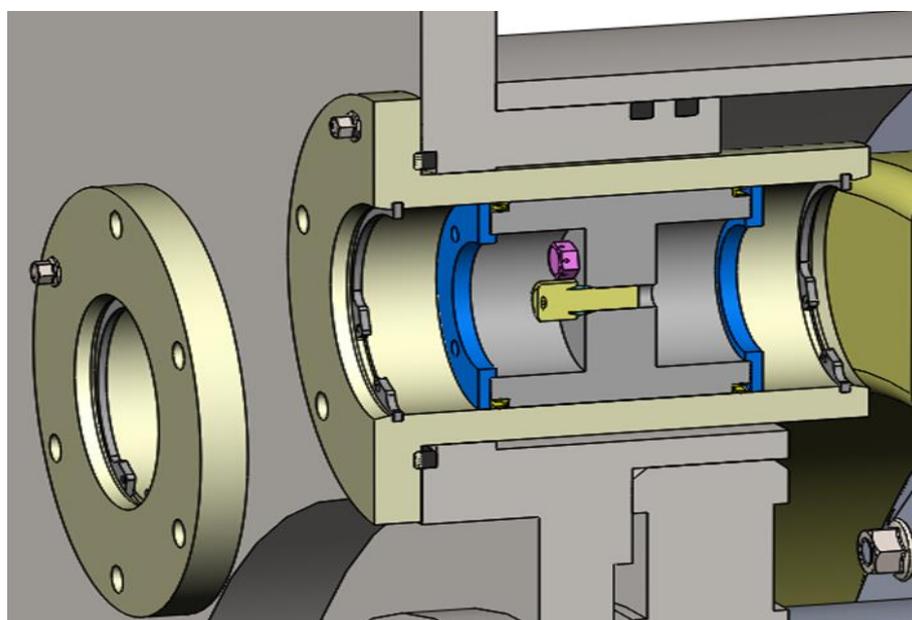


Рисунок. 5.4.1. Конструкции компенсатора объема

Низкая частота вращения ротора генератора позволяет применить такое техническое решение

Для удобства компоновки генератор имеет обращенную конструкцию, то есть статор расположен внутри, а ротор снаружи. При такой компоновке наиболее целесообразно применить консольную опору.

При обращенной конструкции токоподвод генератора можно осуществить через неподвижный вал. Для упрощения конструкции выводов, целесообразно выпрямитель и регулятор встроить во внутрь генератора в

торцевом пространстве статора под лобовыми частями. При этом понадобится для накопителя вывести только один провод. Вторым потенциалом для цепи будет заземление.

Генератор должен иметь уплотнение выходного вала.

Форма генератора должна быть обтекаемой для уменьшения гидравлических потерь от завихрения водяного потока.

Конструкция лопастей генератора должна представлять собой осевую турбину, которая хорошо работает при больших расходах и малых напорах водяного потока.

Для отработки конструктивных решений было принято решение разработать конструкцию рассчитанного выше генератора 3 кВт.

Фрагменты спроектированной в программе Solidworks трехмерной модели представлены на рис.5.4.1-5.4.6.

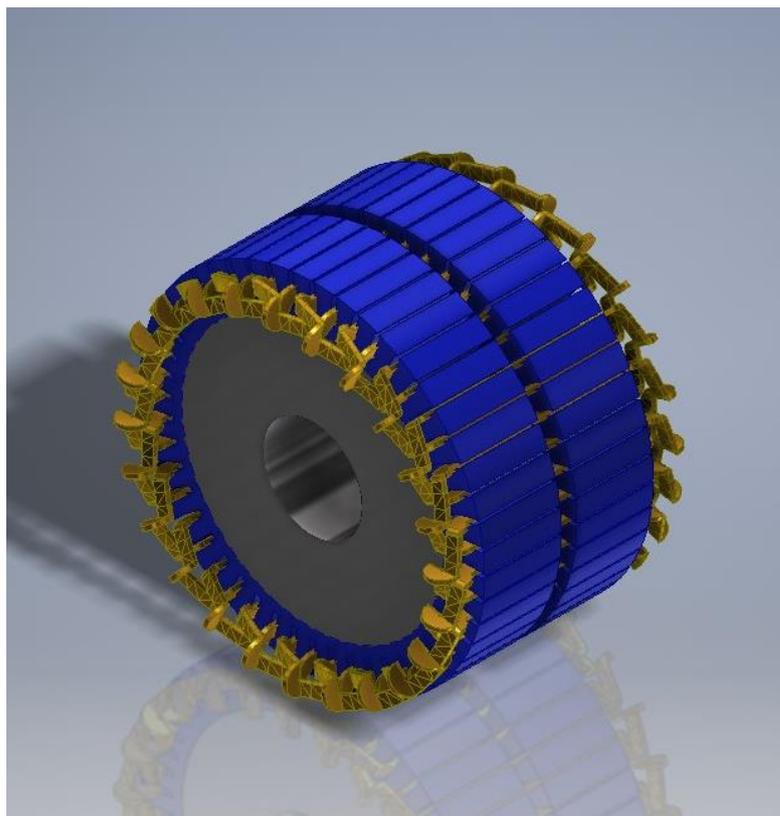


Рисунок. 5.4.2. Якорь с трехфазной обмоткой и обмоткой возбуждения в сборе

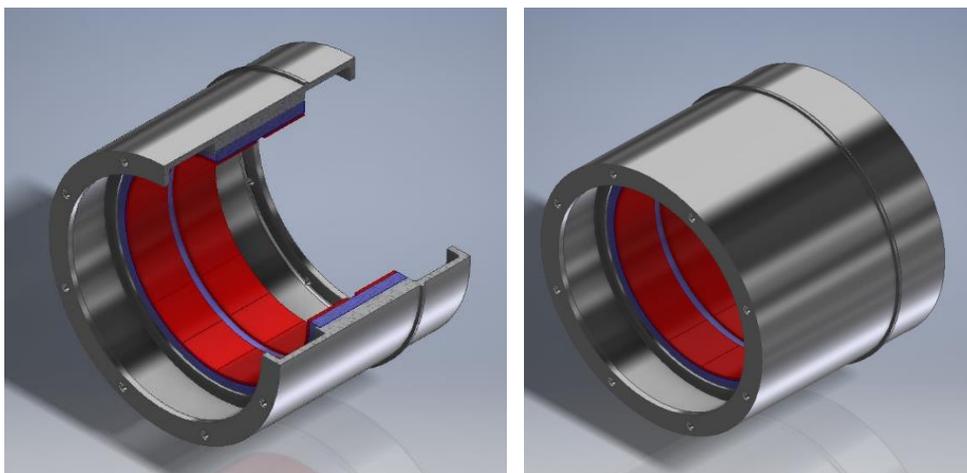


Рисунок. 5.4.2. Ротор с постоянными магнитами в сборе

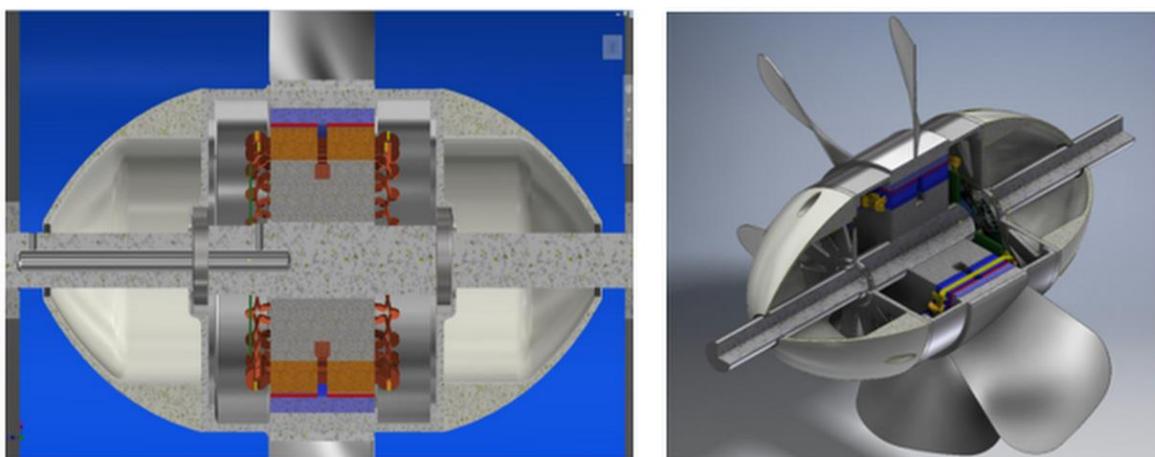


Рисунок. 5.4.3. Генератор в сборе

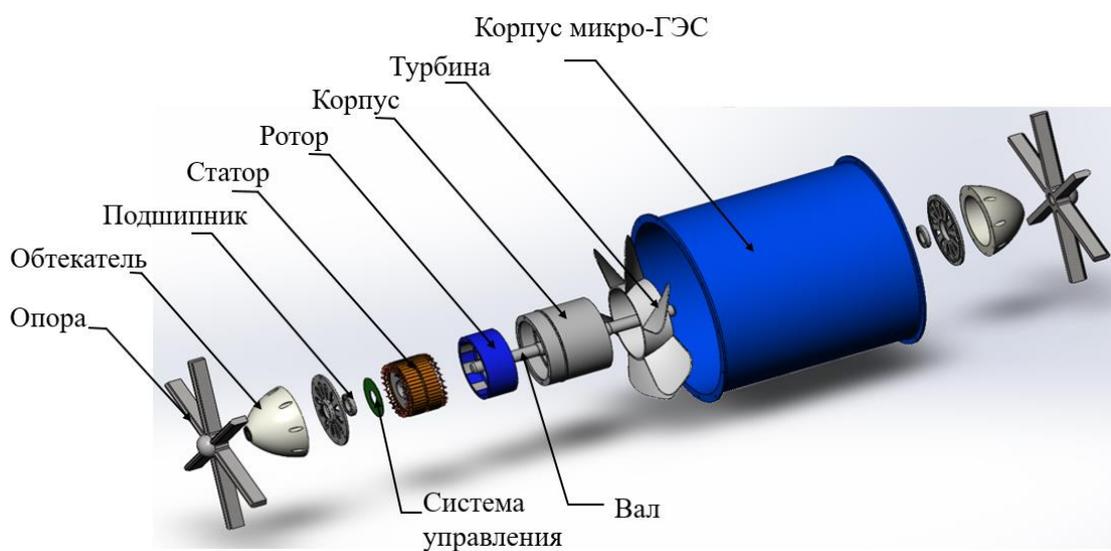


Рисунок. 5.4.4. Разборка генератора комбинированного возбуждения

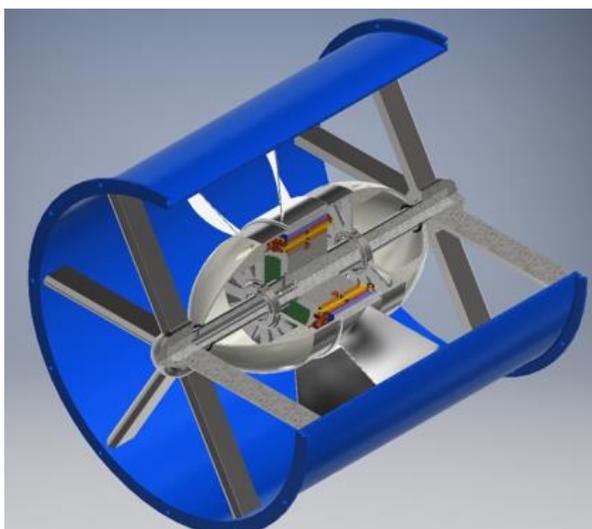


Рисунок. 5.4.5. Разрез микро-ГЭС

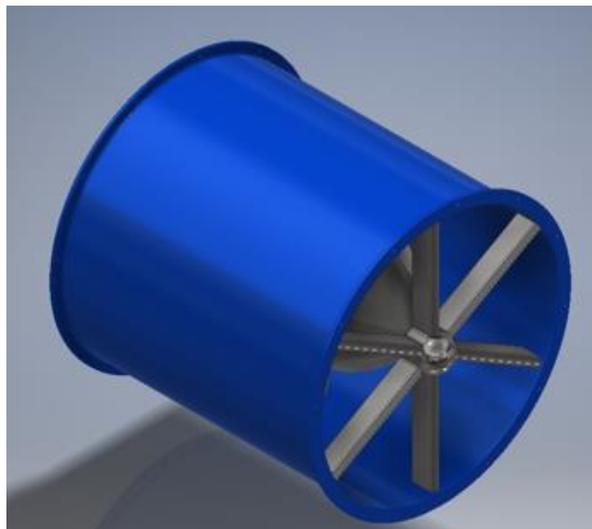


Рисунок. 5.4.6. Микро-ГЭС в сборе

Для проверки собираемости и отработки вопросов по технологичности конструкции была изготовлена масштабная пластмассовая конструкция модели гидрогенератора с использованием технологии 3D принтера (рис.5.4.7).

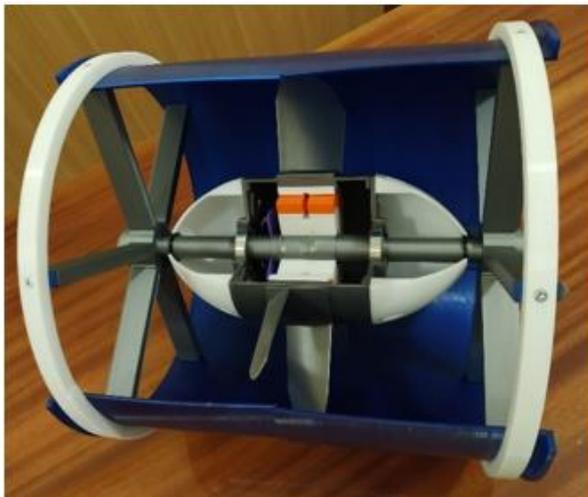


Рисунок. 5.4.7. Фотографии масштабной модели двигателя, изготовленной по технологии 3D принтера

В настоящее время планируется изготовление опытного образца гидрогенератора 3 кВт. Фрагменты основных деталей генератора изображены на рис. 5.4.8.



Рисунок. 5.4.8. Основные детали и сборочные узлы гидрогенератора 3 кВт.

На данном образце будут проведены натурные испытания мини-ГЭС.

Выводы по главе 5

1. Приведена методика оценки энергетического потенциала реки и определения единичной мощности гидрогенератора. Методика рассчитана под проточный водопогружной гидрогенератор. Методика учитывает эффективность использования водяного потока реки, потери энергии в лопастях турбины, генераторе и системе управления. Конструктивно предлагается мини-ГЭС строить из нескольких гидрогенераторов, расположенных по поперечному сечению реки.

2. Приведена структурная схема всей проектной системы, которая включает в себя предварительный анализ потенциала реки и определение единичной мощности генератора, подсистему синтеза оптимальной геометрии, подсистему анализа электромагнитного и теплового состояния. Следует отметить гибкость проектной системы, которая позволяет разработать мини-ГЭС практически для любой проектной ситуации. Основу

гибкости системы составляет многоуровневая однокритериальная оптимизация.

3. Показана работоспособность и эффективность работы проектной системы при разработке конкретной мини-ГЭС для реки Искандердарья (Таджикистан). С помощью системы определена оптимальная геометрия, основные параметры и характеристики мини – ГЭС, состоящей из 4 гидрогенераторов 3 кВт, 220 В, 350 об/мин.

4. Результаты работы проектной системы легли в основу разработки опытного образца гидрогенератора 3 кВт, 220 В, 350 об/мин. Создана трехмерная твердотельная модель гидрогенератора, по которой сделан комплект конструкторской документации и изготовлены основные сборочные единицы.

Для проверки собираемости и отработки конструктивных решений изготовлена масштабная пластмассовая модель по технологии 3D принтера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе содержатся научно доказанные теоретические положения оптимального проектирования мини-ГЭС, использующие энергетический потенциал малых и средних рек. Основная концепция проведенной научной работы заключается в том, что для эффективного использования малых и средних водных ресурсов необходимо идти не по пути разработки ряда гидрогенераторов, отличающихся по мощности, а проектировать гидрогенераторы для конкретной реки и конкретного места установки мини – ГЭС. Для этой цели была разработана система проектирования таких гидроэлектростанций. В результате расширена существующая теоретическая база по проектированию специальных гидрогенераторов. Решенная техническая задача позволяет внести значительный вклад в развитие отечественного электромашиностроения, играющего важную роль в экономике страны.

На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований автором получены следующие основные результаты:

1. На основании обзора водных ресурсов РФ и ближнего зарубежья в качестве основного конструктивного варианта выбрана мини – ГЭС, которая использует энергию свободного течения воды. Данный выбор обусловлен в основном требованиями экологии и эстетики для места расположения станции. Мини – ГЭС состоит из генератора переменного тока, встроенного в него выпрямителя, преобразующего переменный ток в постоянный, накопителя электроэнергии в виде аккумуляторной батареи, инвертора, преобразующего постоянный ток в стандартный переменный. В качестве электрической машины выбран генератор комбинированного возбуждения уникальной конструкции, на которую имеется патент РФ. Выбор типа генератора определяется возможностью регулирования выходного напряжения по цепи возбуждения, что во многом упрощает систему автоматизированного управления мини-ГЭС. Для обеспечения

гидроизоляции водопогружного генератора принято решение наполнить его маслом с применением компенсаторов давления.

2. Разработана методика расчета постоянного магнита, учитывающая все особенности магнитных систем вентильных электродвигателей. Данная методика построена на основе метода конечных элементов, но содержит ограниченное наперед заданное количество уравнений, что позволяет включить расчетную математическую модель в большое число оптимизационных циклов. Расчетная модель параметризована и может рассчитывать магниты любых габаритов. На основе данного подхода разработана инженерная методика расчета постоянного магнита.

3. Разработана математическая модель расчета ВГКВ. В математической модели определены основные аналитические зависимости между электромагнитными величинами, константы, технологические и эксплуатационные ограничения, независимые переменные. Формализованы показатели качества. Математическая модель реализована в программной среде Delphi и является основой для разработки системы оптимального проектирования ВГКВ.

4. Разработана подсистема синтеза оптимальной геометрии ВГКВ. Основу ее составила многоуровневая однокритериальная оптимизация, при этом в зависимости от проектной ситуации имеется возможность выбора критериев оптимальности. Формализованы 8 уровней оптимизации геометрии ВГКВ. Для каждого уровня определена система констант, ограничений, независимых переменных и критериев оптимальности. С учетом выбора различных критериев система позволяет реализовать до 12 проектных ситуаций, закрывая практически все потребности реального проектирования ВГКВ данной конструкции.

5. Разработана подсистема анализа проектной системы. Подсистема анализа включает в себя оценку электромагнитного состояния и оценку теплового состояния гидрогенератора. В основу подсистемы анализа положены разработанные и проверенные на практике САД программы,

реализующие метод конечных элементов. Подсистема анализа связана с подсистемой синтеза общей оболочкой и входит в общую проектную систему по созданию гидрогенераторов данного типа. При работе подсистемы анализа в автоматическом режиме создается трехмерная твердотельная модель генератора и электронной системы управления. Модель электромагнитного анализа является цифровым двойником реального образца и электроники.

6. Разработанная подсистема теплового анализа реализована в два этапа. На первом этапе используется метод тепловых схем замещения, на основании которого определяются усреднённые температуры нагрева частей гидрогенератора. На втором этапе применена САД система Ansys Icerak, реализующая метод конечных элементов. Для построения тепловой модели второго этапа решается связанная электромагнитная и тепловая задача. В результате рассчитывается поле температур с учетом локальных перегревов.

7. Доказана работоспособность и эффективность работы проектной системы при разработке конкретной мини-ГЭС для реки Искандердарья (Таджикистан). С помощью системы определена оптимальная геометрия, основные параметры и характеристики мини – ГЭС, состоящей из 4 гидрогенераторов 3 кВт, 220 В, 350 об/мин. Результаты работы проектной системы легли в основу разработки опытного образца гидрогенератора 3 кВт, 220 В, 350 об/мин. Создана трехмерная твердотельная модель гидрогенератора, по которой сделан комплект конструкторской документации и изготовлены основные сборочные единицы.

8. Метод расчета постоянного магнита, методика расчета электрической машины комбинированного возбуждения внедрены в учебный процесс при подготовке бакалавров по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника в курсе «Проектирование специальных электрических машин».

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки

Дальнейшее развитие данного научного исследования возможно в следующих основных направлениях:

– расширение возможностей созданной проектной системы в плане включения в нее других конструкций генераторов, в том числе генераторы комбинированного возбуждения нормального исполнения, магнитоэлектрические генераторы с постоянными магнитами;

– дополнение данной проектной системы гидравлическими расчетами, которые позволят более точно рассчитывать гидравлические потери в турбине гидрогенератора;

– дополнение проектной системы функциями создания трехмерных твердотельных моделей в автоматическом режиме для автоматизации конструкторских работ.

В перспективе данная конструкторская система должна составить основу сквозного проектирования мини-ГЭС данного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альпер, Н. Я. Индукторные генераторы/ Н. Я. Альпер, А. А. Терзян. - М.: Энергия, 1970. - 189 с.
2. Альтшуллер, Г. С. Введение в теорию решения изобретательских задач/ Г. С. Альтшуллер. - Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1986. - 235 с.
3. Аминов Д.С., Косимов Б.И., Ниматов Р.Р. Использование малых гидроэлектростанций в качестве возобновляемых источников энергии Курганская государственная сельскохозяйственная академия имени Т. С. Мальцева. Стр. 70-75
4. Аминов Д.С., Ниматов Р.Р., Косимов Б.И. Комбинированная система бесперебойного питания на базе солнечных панелей, ветроэнергетической установки, гидрогенератора, аккумуляторной батареи и дизель-генератора. Десятая научная конференция Аспирантов и докторантов ЮУрГУ. Челябинск 2018.
5. Ануфриев, А.С. Особенности проектирования генераторных ветроустановок малой мощности. /А.С. Ануфриев, Ю.А. Макаричев, М.Н. Алимбеков. Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы VIII международной научно-практической конференции/Под общ. ред. Трушкина В.А. – Саратов: ООО «ЦеСАин», ISBN 978-5-906689-54-2. 2017. – с. 13-15
6. Ануфриев, А.С. Анализ энергоэффективности ветроустановок малой мощности. А.С. Ануфриев, Ю.А. Макаричев // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы IX международной научно-практической конференции/Под общ. ред. Трушкина В.А. – Саратов: ООО «ЦеСАин», 2018. ISBN 978-5-906689-80-1. С.140-141.
7. Аминов Д.С. Применение программного комплекса Ansys Electronics Desktop для анализа водопогружного гидрогенератора комбинированного возбуждения // Журнал «Электротехнические системы и комплексы» – 2020. – №1(46), – С. 13-18.
8. Басов, К. А. ANSYS: справочник пользователя/К. А. Басов. - М.:

ДМК Пресс, 2005. - 640 с.: ил.

9. Басов, К. А. Графический интерфейс комплекса ANSYS/ К. А. Басов. – М.: ДМК Пресс, 2006. - 248 с.: ил.

10. Безруких, П. П. Ветроэнергетика мира и России. Экономические и технические аспекты // ЭЛМАШ-2009: Электроэнергетика и электротехника. Проблемы и перспективы: тр. симпозиума: в 2 т. / VII Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 22-25 сентября 2009 г. - М., 2009. - Т.1. - С. 9-16.

11. Белей, В. Ф. Современная ветроэнергетика: тенденции развития, проблемы и некоторые пути их решения / В. Ф. Белей, А. Ю. Никишин // Электрика. - 2006. - №8. - С.19-22.

12. Белей, В. Ф. Современные ветроэнергетические установки большой мощности: ряд рекомендаций по их использованию / В. Ф. Белей, А. Ю. Никишин // ЭЛМАШ-2006: Перспективы и тенденции развития электротехнического оборудования: тр. симпозиума: в 2 т./ Шестой междунар. симпозиум, Москва, 2-6 октября 2006 г. - М., 2006. - Т.1. - С. 31-36.

13. Бертинов, А. И. Авиационные электрические генераторы/ А. И. Бертинов. - М.: Оборонгиз, 1959. - 594 с.

14. Бертинов, А. И. Электрические машины авиационной автоматики / А. И. Бертинов. - М.: Оборонгиз, 1961. – 428 с.

15. Беспалов, В. Я. Асинхронные машины для динамических режимов работы: (вопросы теории, математического моделирования и разработки): дис. док. тех. наук. 05.09.01 / В. Я. Беспалов. - М., 1992. – 317 с.

16. Беспалов, В. Я. Электрические машины / В. Я. Беспалов, Н. Ф. Котеленец. - М.: Академия, 2006. - 320 с.

17. Богачев А.В., Иванов А.С., Ежов Е.В. Выбор генератора для системы рекуперации избыточного давления магистральной жидкости // Энергобезопасность и энергосбережение, 2012г.-№4. - С.12-15.

18. Богачев А.В., Котеленец Н.Ф., Иванов А.С., Ежов Е.В. Способ получения электрической энергии на основе использования избыточного магистрального давления жидкости // Электричество, 2012г.-№11. - С.48-51.

19. Богачев А.В., Котеленец Н.Ф., Ежов Е.В. Способ и устройство синхронизации возбужденного синхронного генератора с сетью // Электричество, 2014г.-№4. - С. 50-54.

20. Богачев А.В., Котеленец Н.Ф. Способ синхронизации возбужденного синхронного генератора с сетью // Патент РФ № 2494513, Бюл. №27, 2013.

21. Богачев А.В., Котеленец Н.Ф. Устройство синхронизации возбужденного синхронного генератора с сетью // Патент на полезную модель № 142478, Бюл. №18,2014.

22. Богачев А.В., Котеленец Н.Ф. Сравнение асинхронного и синхронного генераторов в системе рекуперации давления // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Тез. докл. XVIII междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: в 3-х т. - М.: Издательский дом МЭИ, 2012. -Т. 2.с.171-172.

23. Богачев А.В. Включение явнополюсного синхронного генератора на параллельные работы. // XIV международная конференция «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты». Программа МКЭЭЭ - 2012, Крым-Алушта, 2012. -с.142-144.

24. Богачев А.В., Котеленец Н.Ф. Автоматическая система регулирования напряжения автономного синхронного генератора с самовозбуждением. // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Тез. докл. XIX междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: в 3-х т. - М.: Издательский дом МЭИ, 2013,-Т. 2. -С.140.

25. Богачев А.В., Котеленец Н.Ф. Моделирование автономного синхронного генератора, работающего на подзаряд аккумуляторной батареи. // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Тез. докл. XX междунар.

науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: в 3-х т. - М.: Издательский дом МЭИ, 2014. -Т.2. - С.140-141.

26. Бордецкий, А. Б. Пакет программ ROMAX поиска глобального экстремума функции в условиях большой размерности / А. Б. Бордецкий, Л. С. Казаринов, Г. А. Поллак // Алгоритмы и программы: сб. науч. тр.- М.: ВНИИЦ, 1980. - № 4(36). - С. 33.

27. Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Программа ANSYS/ О.Б. Буль. – М.: Академия, 2006. - 288 с.

28. Буль, О.Б. Точность расчета осесимметричной и трехмерной магнитных систем с помощью ANSYS // Сб. трудов Шестой конференции пользователей программного обеспечения CAD_FEM GmbH (20-21 апреля 2006 г.) - М., 2006. - С. 364-377.

29. Вольдек, А. И. Исследование магнитного поля в воздушном зазоре явнополюсных синхронных машин методом гармонических проводимостей // Электричество. – 1966. - № 7. - С. 46—52.

30. Гамидов, Р. Г. О принятии решения в задачах многокритериальной оптимизации / Р. Г. Гамидов, М. Ш. Фабер // Изв. АН Азерб. ССР. Сер.: Физ. и мат. науки. – 1978. - № 3.

31. Ганджа, С. А. Анализ магнитного поля стартер-генератора комбинированного возбуждения // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: тр. III Междунар. науч.-техн. конф., Екатеринбург, 27-29 сентября 2007 г. / Урал. гос. техн. унт-УПИ. - Екатеринбург, 2007. - С.73-76.

32. Ганджа, С. А. Асинхронизированный синхронный генератор с системой управления для ветроэнергетической установки 10 кВт // Ресурсосбережение и возобновляемые источники энергии: экономика, экология, опыт применения: по материалам I Междунар. науч.-практ. конф., г. Улан-Удэ, 2008г.: Прил. к журн. «Вестник Междунар. акад. наук экологии

и безопасности жизнедеятельности». - СПб. - Чита, 2008. - Т.13, №3. - С. 117-120.

33. Ганджа, С. А. Асинхронизированный синхронный генератор с системой управления для ветроэнергетической установки 10 кВт АСГ1220-10000-380/ С.А. Ганджа, Е.С. Мастюкина // Инновационный потенциал. Челябинская область: кат. / М-во экон. развития Челяб. обл.- 2008. - С.30.

34. Ганджа, С. А. Асинхронизированный синхронный генератор с системой управления для ветроэнергетической установки 10 кВт // 60-я юбилейная научная конференция, посвященная 65-летию университета. Секции технических наук: материалы конф./ Южно-Урал.гос. ун-т. - Челябинск, 2008.-Т.1.- С.161-162.

35. Ганджа, С. А. Вентильные электрические машины постоянного тока с аксиальным зазором. Анализ и синтез // Сборник трудов Пятой конференции пользователей программного обеспечения CAD_FEM GmbH, 21-22 апреля 2005 г. - М., 2005. - С. 372-376.

36. Ганджа, С. А. Генератор для автономных источников питания// Вестн. Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер. «Энергетика». - 2005. - Вып.6, № 9. - С.100-102.

37. Ганджа, С. А. Генератор для ветроэнергетических установок // Энергетика: экология, надежность, безопасность: материалы докл. / Одиннадцатая Всероссийская научно-техническая конференция, 7-9 декабря 2005 г. - Томск, 2005. - С. 84-87.

38. Ганджа, С. А. Дизель-стартер-генераторная установка с высокими массоэнергетическими показателями ДСГУ8-П/28.5-2-М1 // Инновационный потенциал. Челябинская область: кат. / М-во экон. развития Челяб. обл.- 2008. –С.30.

39. Ганджа, С. А. Математическая модель вентильного многосекционного моментного двигателя на основе агрегированных переменных // Исследование автоматизированных электроприводов,

электрических машин и вентильных преобразователей: темат. сб. науч. тр. / Челяб. политехн. ин-т. - Челябинск, 1984. - С. 8-13.

40. Ганджа, С. А. Многоуровневая оптимизация вентильных электрических машин постоянного тока с аксиальным воздушным зазором (ВМАЗ) // XXV Российская школа по проблемам науки и технологий, посвященная 60-летию Победы (г. Миасс, 21-23 июня 2005 г.) : тез. докл./ Межрегион. совет по науке и технол. - Миасс, 2005. - С. 57.

41. Ганджа, С. А. Моделирование вентильного электродвигателя постоянного тока с электромагнитной редукцией // Сб. трудов Шестой конференции пользователей программного обеспечения CAD_FEM GmbH (20-21 апреля 2006 г.) - М., 2006. - С. 358-360.

42. Ганджа, С. А. Некоторые проблемы разработки САПР вентильных машин с аксиальным зазором // XXV Российская школа «Итоги диссертационных исследований»: сб. науч. тр./ Рос. акад. наук. - М., 2005. - С. 386-393.

43. Ганджа, С. А. Оптимальное проектирование электроприводов на базе вентильных электрических машин с аксиальным зазором // Вестник Южно-Урал. гос. ун-та. Серия «Энергетика». – 2009. - Вып.12, №34. - С.68-72.

44. Ганджа, С. А. Оптимизация параметров вентильного моментного двигателя постоянного тока: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01/С. А. Ганджа. - Свердловск, 1985. - 22 с.

45. Ганджа, С. А. Оптимизация параметров вентильных электрических машин постоянного тока с аксиальным воздушным зазором // Состояние и перспективы развития электротехнологии (XII Бенардосовские чтения): тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., 1-3 июня 2005 г./ Иван. гос. энерг. ун-т. - Иваново, 2005. – Т.2. - С. 82.

46. Ганджа, С. А. Особенности построения системы автоматизированного проектирования вентильных машин с аксиальным

зазором // Вестн. ЮУрГУ. Сер. «Энергетика». - 2007. - Вып.8, № 20. - С.19-23.

47. Ганджа, С. А. Подсистема оптимизации вентильного многосекционного моментного двигателя // Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей: темат. сб. науч. тр. / Челяб. политехн. ин-т. - Челябинск, 1984. -С. 13-21.

48. Ганджа, С. А. Применение асинхронизированных синхронных генераторов для ветроэнергетических установок // ЭЛМАШ-2009: Электроэнергетика и электротехника. Проблемы и перспективы: тр. симпозиума: в 2 т. / VII Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 22-25 сентября 2009 г. - М., 2009. - Т.1. - С.168-170.

49. Ганджа, С. А. Применение метода граничной коллокации для расчета магнитных полей в электрических машинах // Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей: темат. сб. науч. тр./ Челяб. политехн. ин-т. - Челябинск, 1983. - С. 3-10.

50. Ганджа, С. А. Применение программного комплекса Ansys для анализа вентильных электрических машин постоянного тока с аксиальным зазором/ С. А. Ганджа, М. С. Свиридов, А. А. Бедкер // Сб. трудов Шестой конференции пользователей программного обеспечения CAD_FEM GmbH (20-21 апреля 2006 г.) - М., 2006. - С. 361-363.

51. Ганджа, С. А. Разработка программного комплекса многоуровневой оптимизации вентильных машин с аксиальным зазором// ЭЛМАШ-2009: Электроэнергетика и электротехника. Проблемы и перспективы: тр. симпозиума: в 2 т. / VII Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 22-25 сентября 2009 г. - М., 2009. - Т.1. - С. 164-167.

52. Ганджа, С. А. Разработка системы автоматизированного проектирования вентильных машин с аксиальным зазором // XXV

Российская школа «Итоги диссертационных исследований»: сб. науч. тр./ Рос. акад. наук. - М., 2005. - С. 378-385.

53. Ганджа, С. А. Расчет магнитного поля в вентильных электрических машинах постоянного тока с аксиальным зазором // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: тр. III Междунар. науч.-техн. конф., Екатеринбург, 27-29 сентября 2007 г. / Урал. гос. техн. унт-УПИ. - Екатеринбург, 2007. - С.89-91.

54. Ганджа, С. А. Расчет магнитного поля постоянных магнитов стартер-генератора для автономных источников электроснабжения / С. А. Ганджа, А. В. Ерлышева // ЭЛМАШ-2006: Перспективы и тенденции развития электротехнического оборудования: тр. симпозиума: в 2 т. / Шестой междунар. симпозиум, Москва, 2-6 октября 2006 г. - М., 2006. – Т.2. - С. 111-115.

55. Ганджа, С. А. Стартер-генератор для автономных источников электроснабжения / С. А. Ганджа, А. В. Ерлышева // Вестн. ЮУрГУ. Сер. «Энергетика». - 2005. - Вып.6, № 9. - С. 84-86.

56. Ганджа, С. А. Стартер-генератор для автономных источников электроснабжения / С. А., Ганджа, А. В. Ерлышева // ЭЛМАШ-2006: Перспективы и тенденции развития электротехнического оборудования: тр. симпозиума: в 2 т./ Шестой междунар. симпозиум, Москва, 2-6 октября 2006 г. - М., 2006. - Т.1. - С. 76-80.

57. Ганджа, С. А. Экологически чистый возобновляемый источник электрической энергии ветроэнергетическая установка 10 кВт/ С.А. Ганджа, Е.С. Мастюкина // Инновационные разработки малого бизнеса Челябинской области/М-во экон. развития Челяб. обл. - Челябинск, 2007. - Вып.2. - С.30-31.

58. Разработка дизель-стартер-генераторной установки с высокими массоэнергетическими показателями: отчет о НИР (заключ.): по гос.

контракту № 4121р/6438. / рук. Ганджа С.А. – М., 2008. – 74 с. - № ГР 15019.7451229854.07.1.001.6.

59. Ветроэнергетическая установка 10 кВт: отчет о НИР (заключ.): по гос. контракту № 4956р/7317/ Рук. Ганджа С.А. – М., 2008. - № ГР 15019.7451229854.07.1.001.9.

60. Ганджа С.А., Аминов Д.С., Косимов Б.И. Разработка инженерной методики расчета магнитных систем с постоянными магнитами на основе метода конечных элементов. Вестник ПНИПУ. Серия Электротехника, информационные технологии, системы управления – 2019. № 29, -С.58-74.

61. Ганджа С.А., Аминов Д.С., Косимов Б.И. Применение водопогружного гидрогенератора комбинированного возбуждения в качестве альтернативного источника энергии для малых и средних рек. Вестник ЮУрГУ серия энергетика-2019. №4, - С. 102-111

62. Ганджа С.А., Аминов Д.С., Косимов Б.И. Разработка водопогружного гидрогенератора комбинированного возбуждения для освоения энергии малых и средних рек. Вестник СамГТУ.

63. Ганджа С.А., Аминов Д.С. Разработка водопогружного гидрогенератора в качестве возобновляемого источника электроэнергии малых рек. Десятая научная конференция Аспирантов и докторантов ЮУрГУ. 2018

64. Ганджа С.А., Аминов Д.С., Косимов Б.И. Математическое моделирование постоянного магнита для оптимизации вентильных электрических машин возобновляемых источников энергии. Наука ЮУрГУ 2018.

65. Ганджа С.А., Аминов Д.С., Косимов Б.И. Тенденции использования малых гидроэлектростанций в качестве возобновляемых источников энергии в странах центральной Азии. Научно-технические ведомости Севмашвтуза – 2019. №2, - Стр. 4-10

66. Ганджа С.А., Аминов Д.С., Косимов Б.И. Разработка водопогружного гидрогенератора комбинированного возбуждения для освоения энергии малых и средних рек // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета «Электротехника, информационные технологии, системы управления». –2020. – №34 – 24 – 44.

67. Геча, В. Я. Расчет характеристик магнитоэлектрических машин методом конечных суперэлементов/ В. Я. Геча, А. Б. Захаренко // ЭЛМАШ-2009: Электроэнергетика и электротехника. Проблемы и перспективы: тр. симпозиума: в 2 т. / VII Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 22-25 сентября 2009 г. - М., 2009. - Т.1. - С.119-123.

68. М.В. Глазырин. Перспективы применения генераторных комплексов на основе машины двойного питания для малых ГЭС/ М.В. Глазырин, Р.Х. Диёров // Известия вузов. Электромеханика №6. 2012. С. 78-82.

69. М.В. Глазырин. Анализ и исследование радиально-осевой гидротурбины для МГЭС с машинами двойного питания/ М.В. Глазырин, Р.Х. Диёров // Вестник Таджикского технического университета №4. 2012. С. 73-77.

70. М.В. Глазыфин. Построение системы регулирования активной мощности гидроагрегата с переменной частотой вращения вала/ М.В. Глазырин, Р.Х. Диёров, Е.А. Краснопеев // Вестник Таджикского технического университета №2. 2013. С. 54-59.

71. М.В. Глазырин. Анализ динамических свойств гидроагрегата на основе машины двойного питания/ М.В. Глазырин, Р.Х. Диёров // Известия вузов. Электромеханика №6. 2013. С. 28-31.

72. Гращенко, В.Т. Некоторые вопросы оптимального проектирования управляемых бесконтактных двигателей постоянного тока // Вторая всесоюзная научно-техническая конференция по бесконтактным машинам постоянного тока: тез. докл. - М., 1975.

73. Дьяков А.Ф. Пути развития Российской электроэнергетики и энергомашиностроения в современных условиях // ЭЛМАШ-2009: Электроэнергетика и электротехника. Проблемы и перспективы: тр. симпозиума: в 2 т. / VII Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 22-25 сентября 2009 г. - М., 2009. - Т.1. - С.1-3.

74. Евгеньев, Г.Б. Case-технология создания многоагентных САПР изделий машиностроения/ Евгеньев Г.Б. [и др.] // Труды Международных научно-технических конференций «Интеллектуальные системы» и «Интеллектуальные САПР». - Т. 2. -М.: Физматлит, 2003. - С. 41-46.

75. Ермолин, Н. Г. Электрические машины малой мощности/ Н. Г. Ермолин. - М.: Высш. шк., 1967. - 503 с.

76. Иваницкий С. В. Особенности компьютерной модели для расчета генераторного режима линейной асинхронной машины / С. В. Иваницкий, Ф. Н. Сарапулов // ЭЛМАШ-2009: Электроэнергетика и электротехника. Проблемы и перспективы: тр. симпозиума: в 2 т. / VII Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 22-25 сентября 2009 г. - М., 2009. - Т.1. - С.158-160.

77. Иваницкий С. В. Открытые фортранмодели ЛАД на основе детализированных схем замещения // ЭЛМАШ-2009: Электроэнергетика и электротехника. Проблемы и перспективы: тр. симпозиума: в 2 т. / VII Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 22-25 сентября 2009 г. - М., 2009. - Т.1. - С.160-163.

78. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины: в 2 т. Т. 2. / А. В. Иванов-Смоленский. — 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Изд-во МЭИ, 2005. - 528 с.

79. Иванов-Смоленский, А. В. Метод расчета магнитных полей с учетом трехмерной неоднородности сердечников электрических машин / А. В. Иванов-Смоленский, В. А. Кузнецов // Электричество. - 2005. - № 11. - С. 2—7.

80. Иоффе А. Б. Тяговые электрические машины/ А. Б. Иоффе. - М.—Л.: Энергия, 1965. - 232 с.

81. Кавун, Ю. Ю. Новые типы синхронных электрических машин с постоянными магнитами/ Ю. Ю. Кавун, Л. К. Ковалев // Проектирование и изготовление аэрокосмических аппаратов / под ред. проф. Ю. Ю. Комарова. – М.: Изд-во МАИ, 2006.

82. Казаков, Ю. Б. Комплексная автоматизированная система исследования двигателей постоянного тока / Ю. Б. Казаков, А. И. Тихонов // Электротехника. - 1995. - № 4. - С. 21-24.

83. Казаков, Ю. Б. Автоматизированное распределение обмоток статора неявнополюсных машин постоянного тока / Ю. Б. Казаков, А. И. Тихонов // Электротехника. - 1995. - № 8. – С. 8-11.

84. Казаков, Ю. Б. САПР машин постоянного тока на основе декларативных знаний с динамически формируемым алгоритмом расчета / Ю.Б. Казаков, А. И. Тихонов // Электротехника. - 1997. - № 4. - С. 30-32.

85. Казаков, Ю. Б. Конечно-элементное исследование магнитных систем машин постоянного тока с неявновыраженными полюсами / Ю. Б. Казаков, В. С. Мостейкис, А. И. Тихонов // Автоматизированный анализ физических процессов и проектирование в электромеханике: межвуз. сб. науч. трудов / Иван. гос. энерг. ун-т. -Иваново, 1990. - С. 33-37.

86. Казаков, Ю. Б. Численное моделирование и разработка конструкций электрических машин с учетом взаимного влияния физических полей: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.09.01/ Ю. Б. Казаков. - М., 2000. - 39с.

87. Казаков, Ю.Б. Оптимизационный конечно-элементный поиск эффективных конструкций машин постоянного тока / Ю. Б. Казаков, А. И. Тихонов // Моделирование и исследование устройств электромеханики: межвуз. сб. науч. трудов / Иван. гос. энерг. ун-т. - Иваново, 2001. – С. 43-47.

88. Калаев, В. Е. Актуальность и вопросы использования герметичных электрических машин/ В. Е. Калаев, С. В. Леонов // XI Международная конференция «Электромеханика, электротехнологии,

электротехнические материалы и компоненты», Крым, Алушта, 18-23 сентября/Моск. ин-т электротехн. (МЭИ) – М., 2006. – Ч. 1. - С. 196.

89. Каплун, А. Б. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство / А.Б. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферова. - М.: Едиториал УРСС, 2003. - 273 с.

90. Кобелев, А. С. Новые функции интеллектуальной САПР асинхронных электродвигателей версии «AED_AIS 2.0» // ЭЛМАШ-2006: Перспективы и тенденции развития электротехнического оборудования: тр. симпозиума: в 2 т. /Шестой междунар. симпозиум, Москва, 2-6 октября 2006 г. - М., 2006. – Т.2. - С. 43-49.

91. Кобелев, А. С. Агентно-ориентированное программирование как реализация фреймового представления знаний об электрической машине в интеллектуальных САПР // Электротехника. - 2005. - №5. - С. 8-14.

92. Кобелев, А. С. Организация расчетной подсистемы САПР АД на базе системы экспертного программирования SprutExpro // Изв. вузов. Электромеханика. - 2002. - №5. - С.16-21.

93. Кондратьев, В. А. Статические и динамические силы электромагнитных механизмов/ В. А. Кондратьев, В. Л. Малинин // Транспорт: наука, техника, управление. - 2008. - №6. - С.24-26.

94. Копылов, И. П. Некоторые проблемы создания автоматизированных систем проектирования электрических машин // Всесоюзная конференция «Современные проблемы энергетики и электротехники»: тез. докл. - М., 1977.

95. Копылов И.П. Электрические машины / И. П. Копылов. — 5-е изд. - М.: Высш. шк., 2006. - 607 с.

96. Копылов, И. П. Космическая электромеханика/ И.П. Копылов. — 3-е изд. - М.: Высш. шк., 2005. -127 с.

97. Красненкер, А. С. Условия оптимальности по Парето // Сб. науч. трудов Воронеж. ун-та по прикл. вопросам. - Воронеж, 1972. -Вып.3.

98. Куприянов, А. Д. Автоматизированное проектирование электромеханических преобразователей с возбуждением от редкоземельных постоянных магнитов: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.09.01/ А. Д. Куприянов. - М., 2004. - 17 с.

99. Кучеров, С. Ю. Поисковое проектирование электромеханических устройств / С. Ю. Кучеров, А. И. Тихонов // Вестник науч.-пром. общества. - М.: «Алев-В», 2005. –Вып.9. –С.102-108.

100. Левитин, Е. С. Методы минимизации при наличии ограничений/ Е.С. Левитин, Б. Т. Поляк // Журнал вычислит. математики и мат. физики. - 1966. – Вып. 8, №5. - С. 787-823.

101. Леонов, С. В. Вопросы исследования трехмерного магнитного поля электрических машин с аксиальным магнитным потоком/ С. В. Леонов, А. Г. Каранкевич, О. П. Муравлев // Известия вузов. Электромеханика. - 2004. -№5. - С.8-13.

102. Любимов, Э. В. Системы автоматизированного проектирования электрических машин: учеб. пособие/ Э. В. Любимов / Перм. гос. тех. ун-т. - Пермь, 2001. - 186 с.

103. Любимов, Э. В. Компьютерные технологии для проектирования электрических машин малой мощности // V Международная конференция «Электромеханика, электротехнологии и электроматериаловедение», МКЭЭЭ-2003 (ICSEE-2003): труды / Ин-т электротехники МЭИ (ТУ). – М., 2003. – Ч.1. - С. 490 -493.

104. Макаричев, Ю.А. Математическая модель синхронного генератора ветроэнергетической установки малой мощности / Макаричев Ю.А., Ануфриев А.С., Зубков Ю.В., Певчев В.П. Вестник Самарского государственного технического университета Серия «Технические науки» – № 3(55) – 2017. С.66-74.

105. Макаричев, Ю.А. Энергоэффективность генератора ветроэнергетической установки в условиях изменяющейся частоты вращения. / Макаричев Ю.А., Ю.В. Зубков, Ануфриев А.С. Вестник

Самарского государственного технического университета Серия «Технические науки» –№ 1(57) – 2018. С.77-82.

106. Макаричев, Ю.А. Оптимизация энергетических параметров синхронного генератора малой мощности. / Макаричев Ю.А., Овсянников В. Н., Зубков Ю. В., Ануфриев А.С. Вестник транспорта Поволжья. №3(69) - 2018. С.13-19.

107. Макаричев, Ю.А. Критериальный анализ параметров генераторов малой мощности. /Макаричев Ю.А., Ануфриев А.С. Известия высших учебных заведений. Электромеханика. №2 (62), 2018. с.42-47.

108. Макаричев, Ю.А. Особенности проектирования синхронных генераторов малой мощности для ветроэнергетических установок / Ю.А. Макаричев, Ю.Н. Иванников, А.С. Ануфриев // Энергетика глазами молодежи: материалы VIII Международной научно-технической конф-ии, 2017, Самара. – Т 3. Самар. гос. техн. ун-т, 2017. – С. 159-160.

109. Макаричев, Ю.А. Анализ систем запуска газотурбинного двигателя магистрального газоперекачивающего агрегата. / Ю.А. Макаричев, М.Н. Алимбеков А.С. Ануфриев. Ашировские чтения: Сб. трудов Международной научно-практической конференции. / Отв. редактор В.В. Живаева. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2017 – С. 682-686.

110. Морозов, В.А. Электрооборудование летательных аппаратов. Учебник для вузов. В 2-х томах. Том 2: Элементы и системы электропитания-приемники электрической энергии/ В.А. Морозов, В.И. Нагайцев, С.А. Грузков/ Моск. энерг. ин-т (МЭИ). - М., 2008. – 552с.

111. Новиков, А. М. Докторская диссертация: пособие для докторантов и соискателей ученой степени доктора наук / А. М. Новиков,– 3-е изд. – М.: Изд-во «Эгвес», 2003. – 120 с.

112. Новиков, Н. Н. О постановке задачи оптимального проектирования явно полюсных синхронных двигателей / Н. Н. Новиков, В. Ф. Шутько // Автоматизация исследований и проектирования электрических

машин и трансформаторов: межвуз. сб. науч. трудов. - Иваново, 1987. – С. 81-86.

113. Ногин, В.Д. Критерии существования решений в конечномерной задаче многоцелевой оптимизации // Вестник ЛГУ. Сер.: Математика, механика, астрономия. – 1980. - №7. - С.27-32.

114. Особенности моделирования магнитных цепей индукторных машин/ Д.В. Исаков [и др.] // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: труды III Междунар. науч.-техн. конф., Екатеринбург, 27-29 сентября 2007 г. /Урал. гос. техн. унт-УПИ. - Екатеринбург, 2007. - С. 271-273.

115. Пат. 2030059 Российская Федерация, Н 02 К 5/04. Электродвигатель/ Ганджа С. А.; заявитель и патентообладатель С. А. Ганджа. - № 5030007/07; заявл. 28.02.92; опубл. 27.02.95.

116. Пат. 2015606 Российская Федерация, МПК Н 02 К 5/22. Электродвигатель / Ганджа С.А.; заявитель и патентообладатель С. А. Ганджа. - № 5039128/07; заявл. 21.04.92; опубл. 30.06.94.

117. Пат. 2244996 Российская Федерация, МПК Н 02 К 19/16, 1/06. Генератор переменного тока / Ганджа С. А., Соломин Е. В., Шауфлер А. Д.; заявитель и патентообладатель С. А. Ганджа. - № 2003124088/09; заявл. 31.07.03; опубл. 20.01.05.

118. Пат. на полезную модель 66635 Российская Федерация, МПК Н 02 Р 9/00. Асинхронизированный синхронный генератор / Ганджа С.А. -№ 2007112437/22; заявл.03.04.2007; опубл.10.09.2007, приоритет 03.04.2007.

119. Пат. на полезную модель 56524 Российская Федерация, МПК F 16 Н1/00. Мотор-редуктор / Ганджа С. А., Федоров В. Б., Кулешов В. В., Смирнов В. А. - № 2006115854/22; заявл. 11.05.06; опубл.10.09.06.

120. Пашков, Н. И. Исследование и разработка новых конструкций и технологии изготовления торцевых асинхронных электродвигателей малой мощности применительно к массовому производству: дис. д-ра техн. наук: 05.09.01/ Н. И.Пашков - М., 2007. - 349 с.: ил. РГБ ОД, 71 08-5/94.

121. Перминов, Э. М. Опыт и перспективы развития возобновляемой энергетики в России // ЭЛМАШ-2009 Электроэнергетика и электротехника. Проблемы и перспективы: тр. симпозиума: в 2 т. / VII Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 22-25 сентября 2009 г. - М., 2009. - Т.1. - С.17-27.

122. Пикунов, В. М. Расчет компонентов электронных микроволновых устройств с помощью программного комплекса ANSYS / В. М. Пикунов, К. А. Куров // Сборник трудов Пятой конференции пользователей программного обеспечения CAD_FEM GmbH, 21-22 апреля 2005 г. - М., 2005. - С. 363-371.

123. Пластун, А. Т. Статор асинхронного двигателя малой мощности с кольцевыми обмотками / Пластун, А. Т. [и др.] // «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты: XI-я Международная конференция, Украина, Крым, г. Алушта, 18-23 сентября 2006 г.– М., 2006. - Ч. 2. – С. 324-325.

124. Подиновский, В. В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В. В. Подиновский, В. Д. Ногин. - М.: Наука, 1982.

125. Полак, Э. Численные методы оптимизации / Э. Полак. – М.: Мир, 1974. – 376с.

126. Приступ, А. Г. Частотно-регулируемый торцевой асинхронный электродвигатель: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01/А. Г. Приступ. - Новосибирск, 1990. - 16 с.

127. Программный комплекс моделирования электромагнитных процессов / А. Л. Федянин, С. В. Леонов, А. Г. Каранкевич, О. П. Муравлев // Оптимизация режимов работы электромеханических систем: межвуз. сб. науч. трудов / Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004. - С.127-132.

128. Проектирование электрических машин / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В. П. Морозкин, Б. Ф. Токарев. - 4-е изд. / под ред. И.П. Копылова. - М.: Высш. шк., 2005. – 767 с.

129. Пульсации электромагнитного момента многофазных вентильных моментных двигателей постоянного тока с целым числом пазов на полюс и фазу/ В. А. Лифанов, Г. Н. Мармелев, С. А. Ганджа, С. З. Зильберман // Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей: темат. сб. науч. тр. / Челяб. политехн. ин-т. - Челябинск, 1985. - С. 3-11.

130. Пупырев, П. В. Упрощенная математическая модель машины переменного тока с кольцевыми обмотками / П. В. Пупырев, А. Г. Цимбулов, А. Т. Пластун // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: труды III Междунар. науч.-техн. конф., Екатеринбург, 27-29 сентября 2007 г. /Урал. гос. техн. унт-УПИ. - Екатеринбург, 2007. - С.300-308.

131. Расчет магнитного поля в активной зоне аксиальной индукторной машины с постоянными магнитами в пазах индуктора / Ю. И. Дикин, В. К. Лапшин, Д. Я. Мача, В. А. Пугачев //Бесконтакт. электрич. машины. - Рига, 1980. - Вып. 19. - С. 184—198.

132. Рубцов, Д. В. Разработка конструкции торцевого ветрогенератора с использованием конечно-элементной модели магнитного поля / Д. В. Рубцов, А. И. Тихонов, В. П. Шишкин // Состояние и перспективы развития электротехнологии: тез. докл. / Междунар. науч.-техн. конф. - Иваново, 2005. - 88с.

133. Сарапулов, С. Ф. Физическая модель электромагнитного вращателя металлического расплава/ С. Ф. Сарапулов, А. А. Идиятулин, С. М. Фаткулин // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: труды III Междунар. науч.-техн. конф., Екатеринбург, 27-29 сентября 2007 г. /Урал. гос. техн. унт-УПИ. - Екатеринбург, 2007. - С.278-281.

134. Семкин, Б.В. Разработка систем управления "малой" энергетикой / Б.В. Семкин, П.П. Свит // Измерения, контроль и автоматизация

производственных процессов. Тез. докл. к Третьей Междунар. Конф. Том II, часть I. - Барнаул: изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 1995. - С. 118.

135. Семкин, Б.В. Выбор типа электрогенератора для мини-ЭС / Б.В. Семкин, П.П. Свит // Научн. - техн. творч. студ.: Сборник тез. 53-й научн. - техн. конф. студ., аспирант. и проф.- преподав. состава Алт. гос. техн. ун-та. Часть 2, Барнаул: изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 1996. - С. 141-142.

136. Семкин, Б.В. Использование возобновляемых энергоресурсов в малой энергетике / Б.В. Семкин, М.И. Стальная, П.П. Свит // Теплоэнергетика. – 1996, № 2. – С. 6-7.

137. Семкин, Б.В. Факторы, определяющие работу систем управления микро-ГЭС / Б.В. Семкин, П.П. Свит // Научн. - техн. творч. студ.: Сборник тез. 54-й научн. - техн. конф. студ., аспирант. и проф.- преподав. состава Алт. гос. техн. ун-та. Часть 2. Барнаул: изд-во Алт. гос. техн. ун-та. - 1996. С. 10-11.

138. Свит, П.П. Ветроэнергетические установки. Перспективы их использования / П.П. Свит, А.М. Касьянов // там же. – С. 12-13.

139. Семкин, Б.В. Опыт-конструкторская разработка микро-ГЭС / Б.В. Семкин, М.И. Стальная, П.П. Свит, Э.Л. Пурдик // Охрана природы, гидротехническое строительство, инженерное оборудование: Сборник тез. докл. научн.- техн. конф. Часть 3. НГАС. - Новосибирск. - 1996. С.126-127.

140. Семкин, Б.В. Микро-ГЭС как автономный источник энергии / Б.В. Семкин, М.И. Стальная, П.П. Свит // Горы и человек: в поисках устойчивого развития. Тез. докл. на междунар. научн. - практ. конф. - Барнаул. – НИИ Горного природопольз. - 1996. - С. 248-250.

141. Семкин, Б.В. Проблемы использования микро-ГЭС на территории Алтайского края / Б.В. Семкин, А.П. Кротов, В.М. Иванов, П.П. Свит // Проблемы энергетики и пути их решения. Тез. докл. научн. - техн. семинара (Барселона). – Москва, 24-31 мая 1997. - С. 49-50.

142. Семкин, Б.В. Перспективы размещения малых и микро-ГЭС в предгорных районах Алтайского края и проблемы охраны окружающей

среды в зонах их водохранилищ / Б.В. Семкин, В.М. Иванов, П.П. Свит, Т.Ю. Родивилина // Обской вестник. – 1997, № 1. - С. 55-66.

143. Свит, П.П. Потребности людей и охрана окружающей среды / П.П. Свит, М.А. Лапшин // Сб. тез. докл. 55-й научно-техн. конф. студентов, аспирантов, проф.-препод. состава АлтГТУ им.И.И. Ползунова. Ч.1, Барнаул: изд-во Алт. гос. техн. ун-та. – 1997. - С.72.

144. Семкин, Б.В. К вопросу о рациональном использовании автономных электростанций в труднодоступных районах / Б.В. Семкин, М.И. Стальная, П.П. Свит // Ползуновский альманах. – 1999, № 3. – С. 99-103.

145. Семкин, Б.В. Работа асинхронного генератора с приводным двигателем соизмеримой мощности / Б.В. Семкин, М.И. Стальная, П.П. Свит // Электрические станции. – 2000, № 9. – С. 51-54.

146. Свит, П.П. Стабилизация выходных параметров автономного асинхронного генератора / П.П. Свит, П.Н. Манухин, К.С. Ашиток // Научнотехническое творчество молодежи. Сб.тез.докл. 58-й научно-техн. конф. студентов, аспирантов, проф.-препод. состава АлтГТУ им. И.И. Ползунова. Ч.1, Барнаул: изд-во Алт. гос. техн. ун-та. – 2000. - С.144.

147. Свит, П.П. Зависимость скорости развозбуждения самовозбуждающегося асинхронного генератора от параметров возбудителя и нагрузки. / П.П. Свит // Научно-техническое творчество молодежи: Сб. тез. докл. 59-й научнотехн. конф. студентов, аспирантов, проф.-препод. состава АлтГТУ им. И.И. Ползунова. Часть 1, Барнаул: изд -во АлтГТУ. – 2001. – С. 103.

148. Свит, П.П. К вопросу о напряжении развозбуждения асинхронного генератора. / П.П. Свит // там же. – С. 104.

149. Свит, П.П. Автобалластная нагрузка в качестве регулятора электрических параметров асинхронных генераторов. / П.П. Свит, А.Р Книппенберг // Научно-техническое творчество молодежи: Сб. тез. докл. 59-й научно-техн. конф. студентов, аспирантов, проф.-препод. состава АлтГТУ им. И.И. Ползунова. Часть 1, Барнаул: изд-во АлтГТУ. – 2001. – С. 110.

150. Семкин, Б.В. Малая энергетика – решение вопроса энергоснабжения Алтайского края / Б.В. Семкин, В.М. Иванов, П.П. Свит, Г.О. Клейн, Д.А. Бычков // Вестник алтайской науки: эффективность и безопасность энергосбережения. – Барнаул: изд-во АлтГТУ – 2004, №1 – С. 62-109.

151. Свит, П.П. Определение параметров схем замещения асинхронных двигателей небольшой мощности / П.П.Свит, Б.В. Семкин // Ползуновский альманах. – 2004, № 3. – С. 96-99.

152. Семкин, Б.В. Микро-ГЭС на основе водоналивных колес и асинхронных самовозбуждающихся генераторов / Б.В. Семкин, П.П. Свит, В.М. Иванов // Энергетика, экология, энергосбережение, транспорт. Часть 1. – Тобольск: Новосиб. Гос. Акад. Водн. Трансп. – 2004. (Труды второй международной научнопрактической конференции, 8-11 сентября 2004 г.) С. 334-340.

153. Свит, П.П. Проектирование водоналивных колес для микро-ГЭС/ П.П. Свит // 62-я Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Наука и молодежь ". Секция «Энергетика». – Барнаул: изд-во АлтГТУ. – 2004. – С. 12- 16. (<http://edu.secna.ru/main/review>).

154. Семкин, Б.В. Разработка систем автоматического управления асинхронными генераторами микро-ГЭС на основе водоналивных колес – развитие технической мысли XVIII в. на Алтае в современных условиях / Б.В. Семкин, П.П. Свит, В.М. Иванов // Ползуновский альманах. – 2006, № 1. – С. 112-123.

155. Семкин, Б.В. К вопросу о максимальном токе нагрузки асинхронного генератора микро-ГЭС / Б.В. Семкин, П.П. Свит // Вестник АлтГТУ им. И.И. Ползунова. – 2006, №2. – С. 14-18. - 180 с.

156. Свит, П.П. Расчет характеристик асинхронного генератора автономной микро-ГЭС / П.П.Свит, Б.В. Семкин, В.М. Иванов // Ползуновский вестник. – 2007, № 1. (в печати). Т.Ю. Родивилина, Г.О.

Клейн, Д.А. Бычков, П.В. Иванова // Сб. "Труды НГАСУ". – Новосибирск: изд-во НГАСУ. – 2003, №4. – С. 18-29.

157. Совместный магнитно-тепловой конечно-элементный расчет неявнополюсного двигателя постоянного тока / Е.Б. Герасимов, Ю.Б. Казаков, А.И. Тихонов, Ю.Я. Щелькалов // Электротехника. -1996. -№10. – С.39-42.

158. Статников, Р. Б. Решение многокритериальных задач проектирования машин на основе исследования пространства параметров // Многокритериальные задачи принятия решений. - М.: Машиностроение, 1978. - С. 148-155.

159. Столов, Л. И. Моментные двигатели с постоянными магнитами / Л. И. Столов, Б. Н. Зыков. – М.: Энергия, 1977 г. – 112 с.

160. Столов, Л. И. К теории бесконтактных моментных двигателей постоянного тока с неограниченным углом поворота ротора / Л. И. Столов, Ш. С. Галеев // Вторая всесоюзная научно-техническая конференция по бесконтактным машинам постоянного тока: тез. докл. - М.,1975.

161. Технология численного исследования электрических машин с использованием библиотеки конечно-элементного моделирования магнитного поля/ А. И. Тихонов, С. Ю. Кучеров, И. М. Лашманов, Д. В. Рубцов // Вестник Иван. гос. энерг. у-та. – 2006. – Вып. 3. - С. 5-8.

162. Тихонов, А. И. Разработка моделей и методов анализа и синтеза решений в автоматизированном проектировании электромеханических устройств: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.12 / Тихонов Андрей Ильич. - Иваново, 2007. - 280 с.: ил. РГБ ОД, 71 08-5/113.

163. Тихонов, А. И. Методы анализа и синтеза электромеханических устройств на основе компонентной интеграции моделей / Иван. гос. энерг. ун-т. - Иваново, 2006. -100с.

164. Тихонов, А. И. Метод декларативного проектирования электрических машин / А. И. Тихонов, С. Ю. Кучеров // Моделирование и

исследование устройств электромеханики: межвуз. сб. науч. трудов / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2001. - С. 57-60.

165. Тихонов, А. И. Имитация работы машины постоянного тока в среде MatLab с использованием конечно-элементной модели магнитного поля / А. И. Тихонов, Е. Ю. Комков, И. М. Лашманов // Электротехника и прикладная математика: сб. трудов, посвященный 200-летию открытия электрической дуги В. В. Петровым и 160-летия со дня рождения Н. Н. Бенардоса / Иван. гос. энерг. ун-т. - Иваново, 2003.- С. 81-84.

166. Тихонов, А. И. Интегрированная исследовательская среда математического моделирования электромеханических устройств // Вестник науч.-пром. общества. - М.: «Алев-В», 2005. – Вып.9. – С.55-59.

167. Тубис, Я. Б. База знаний «Тепловентиляционный расчет асинхронных двигателей» как составная часть расчетной подсистемы интеллектуальной САПР АЭД / Я. Б. Тубис, А. Э. Кравчик, А. С. Кобелев // Электротехника. - 2004. - №7. - С. 2-8.

168. Уайлд, Д. Д. Методы поиска экстремума: [пер с англ.]. - М.: Наука, 1967. – 268 с.

169. Февралев, А. В. Проектирование гидроэлектростанций на малых реках: Учебное пособие / А. В. Февралев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Н. Новгород: ННГАСУ. – 2014. – 181 с.

170. Федий, К. С. Низкоскоростной синхронный генератор автономных источников электроснабжения: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.09.01 / К. С. Федий. - Красноярск, 2007. - 20 с.

171. Федоров, А. Г. Вентильно-индукторные электродвигатели общепромышленного применения – оптимальное проектирование: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2003611806 от 29.07.2003 г.

172. Федянин, А. Л. Анализ применения дисковой машины с магнитной связью двух роторов в составе оборудования ядерно-химической отрасли / А. Л. Федянин, С. В. Леонов, О. П. Муравлев // Современные

техника и технологии: материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных Томск, 26-30 марта 2007 г. / Томский политехн. ун-т. - Томск, 2007. - С. 346-347.

173. Федянин, А. Л. Герметичный синхронный двигатель для химического производства: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.09.01/ А. Л. Федянин. - Томск, 2007. – 20 с.

174. Федянин, А. Л. Информационные технологии в моделировании электромеханических систем / А. Л. Федянин, С. В. Леонов // Наука. Технологии. Инновации: материалы всерос. науч. конф. молодых ученых, Новосибирск, 8-11 декабря 2005 г. / Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2006. – Т. 1. -С. 258-259.

175. Федянин, А. Л. Исследование синхронного двигателя дискового типа со смещением полюсов / А. Л. Федянин, А. В. Лялин, С. В. Леонов // Современные техника и технологии: материалы XII Междунар. науч.-практ. конф. студентов и молодых ученых, Томск, 27-31 марта 2006 г. / Том. политехн. ун-т. - Томск, 2006. - С. 297-300.

176. Федянин, А. Л. Программный комплекс моделирования электромеханических устройств / А. Л. Федянин, С. В. Леонов, О. П. Муравлев // Электромеханические преобразователи энергии: материалы междунар. науч.-техн. конф. / Том. политехн. ун-т. – Томск, 2005. - С.163-165.

177. Шишкин, В. П. Бесконтактные магнитоэлектрические генераторы для ветроэнергетических установок/ В. П. Шишкин, Ю. Б. Казаков // Состояние и перспективы развития электротехнологии: тез. докл. / Междунар. науч.-техн. конф. - Иваново, 2005. – С.230.

178. Щелыкалов, Ю. Я. О применении численных методов для расчета физических полей // Теория и расчеты электрических машин и аппаратов: межвуз. сб. науч. трудов / Иван. гос. ун-т Иван. энерг. ин-т. - Иваново, 1978.

179. Якорь машины переменного тока с кольцевой обмоткой /А. Т. Пластун, П. В. Пупырев, А. В. Мельчанов, Д. Г.Киселев// ЭЛМАШ-2006:

Перспективы и тенденции развития электротехнического оборудования: тр. симпозиума: в 2 т. /Шестой междунар. симпозиум, Москва, 2-6 октября 2006 г. - М., 2006. – Т.2. - С.158-163.

180. Якунин, А. Н. Проблемы адаптации конечно-элементных сеток в ANSYS и практические приложения адаптивных сеток / А. Н. Якунин, А. Н. Цой // Сб. трудов Шестой конференции пользователей программного обеспечения CAD_FEM GmbH (20-21 апреля 2006 г.) - М., 2006. - С. 351-357.

181. Aydin, M. S. Huang and T. A. Lipo. “Axial Flux Permanent Magnet Disc Machines: A Review”, In Conf. Record of SPEEDAM, , May 2004, pp. 61-71

182. Akatsu K. and Wakui S. “A comparison between axial and radial flux PM motor by optimum design method from the required NTcharacteristics”, Conference Proceeding of ICEM2004, No. 361, Cracow-Poland, 2004.

183. ANSYS Manual. Revision 6.0. ANSYS Inc/2002.-2567 p.

184. Cingoski V., Murakawa R., Kaneda K. and Yamashita H. Automatic mesh generation in finite element analysis using dynamic bubble system.// Jornal of Applied Physics, 1997, Vol.81, No.8, Part 2, pp.4085-4087.

185. Gandzha S., Aminov D., Kiessh I. The development of an engineering technique for calculating magnet systems with permanent magnets. 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) 15-18 May 2018, Moscow, Russia. DOI: 10.1109/ICIEAM.2018.8728650.

186. Gandzha S., Aminov D., Bakhtiyor K. Design of Brushless Electric Machine with Axial Magnetic Flux Based on the Use of Nomograms. Proceedings - 2018 International Ural Conference on Green Energy, UralCon 2018, pp. 282-287Chelyabinsk, Russia. DOI: 10.1109 / URALCON.2018.8544320

187. Gandzha S., Aminov D., Kiessh I., Bakhtiyor K. Application of Digital Twins Technology for Analysis of Brushless Electric Machines with Axial Magnetic Flux. 2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC) 13-15 Nov. 2018. Chelyabinsk, Russia DOI: 10.1109 / GloSIC.2018.8570132

188. Gandzha S., Bakhtiyor K., Aminov D. Selecting Optimal Design of

Electric Motor of Pilgrim Mill Drive for Manufacturing Techniques Seamless Pipe. 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 25-29 March 2019. Sochi, Russia
DOI: 10.1109/ICIEAM.2019.8742941

189. Gandzha S., Aminov D., Bakhtiyor K. Development of Engineering Method for Calculation of Magnetic Systems for Brushless Motors Based on Finite Element Method. 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), ECF Paper 25-29 March 2019 Sochi, Russia, DOI: 10.1109 / ICIEAM.2019.8742976.

190. Gandzha S., Bakhtiyor K., Aminov D. Development of a system of multi-level optimization for Brushless Direct Current Electric Machines. International Ural Conference on Electrical Power Engineering (Ural Con) 2019. 1-3 Oct. 2019 Chelyabinsk, Russia. DOI: 10.1109/URALCON.2019.8877650.

191. Gandzha S., Aminov D., Bakhtiyor K. Application of the combined excitation submersible hydrogenerator as an alternative energy source for small and medium rivers. IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry. 4-5 Oct. 2019 Magnitogorsk, Russia. DOI: 10.1109 / PEAMI.2019.8915294.

192. Sergey Gandzha, Bakhtiyor Kosimov, Dilshod Aminov. Development of analysis methods for Clow Pole Synchronous Motor of the Pilger mill for the Manufacturing of Seamless Pipers. IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry. . 4-5 Oct. 2019 Magnitogorsk, Russia. DOI: DOI: 10.1109/PEAMI.2019.8915343

193. Sergey Gandzha. Dilshod Aminov, Bakhtiyor Kosimov, Rustam Nimatov, Azamdzhon Davlatov and Azamjon Mahmudov. Development of a concept of an energy-efficient house for an environmentally friendly settlement in the South Ural. International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE – 2019). Peter the Great St. Petersburg

Polytechnic University. 18 December 2019 St. Petersburg, Russia. DOI <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201914011009>

194. Sergey Gandzha, Bakhtiyor Kosimov, Dilshod Aminov. Application of the Ansys Electronics Desktop Software Package for Analysis of Claw-Pole Synchronous Motor. *Machines* 2019, 7 (4), 65; <https://doi.org/10.3390/machines7040065>

195. George P.L. Meshing: Construction, Optimization and Adaptation.// Proceeding of 8 th International Roundtable. South Lake Tahoe. CA, USA, 1999, pp. 133-144.

196. Magnet Materials - Fundamentals, Design and Application, July 2000.

197. Holmes F. H., Pat. 2060 and 2665 (London), 1868.

198. Makarichev, Yu.A. Low - power wind generator./ Makarichev Yu.A., Anufriev A.S., Ivannikov, Y.N., Didenko, N., Gazizulina, A. International Conference on Information Networking Volume 2018-January, 19 April 2018, Pages 671-672. 32nd International Conference on Information Networking, ICOIN 2018;

199. Marcuin D.L. and Gaither A. Unstructured Surface Grid Generation Using Global Mapping and Physical Space Approximation. // Proceeding of 8 th International Roundtable. South Lake Tahoe. CA, USA, 1999, pp. 37-46.

200. Satoh H., Akutsu S., Miyamura T., and Shinoki H., “Development of Traction Motor for Fuel Cell Vehicle,” SAE Technical Paper Series (Paper No. 2004-01-0567), reprinted from Advanced Hybrid Vehicle Powertrains 2004 (SP-1833).

201. Норматов, П.И. Курбонов, Н.Б. Фурмин, Г.Т.Норматов, И.Ш. Метеорологические особенности и гидрохимия озера Искандеркуль и впадающих в него рек / П.И. Норматов, Н.Б. Курбонов, Г.Т. Фрумин, И.Ш. Норматов // Научно-теоретический журнал / Российский государственный гидрометеорологический университет, 2016 – С. 13-17

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ МАЛЫХ ГЭС



Рисунок. П1.1. Плотинная мини-ГЭС



Рисунок. П1.2. Деривационные мини-ГЭС

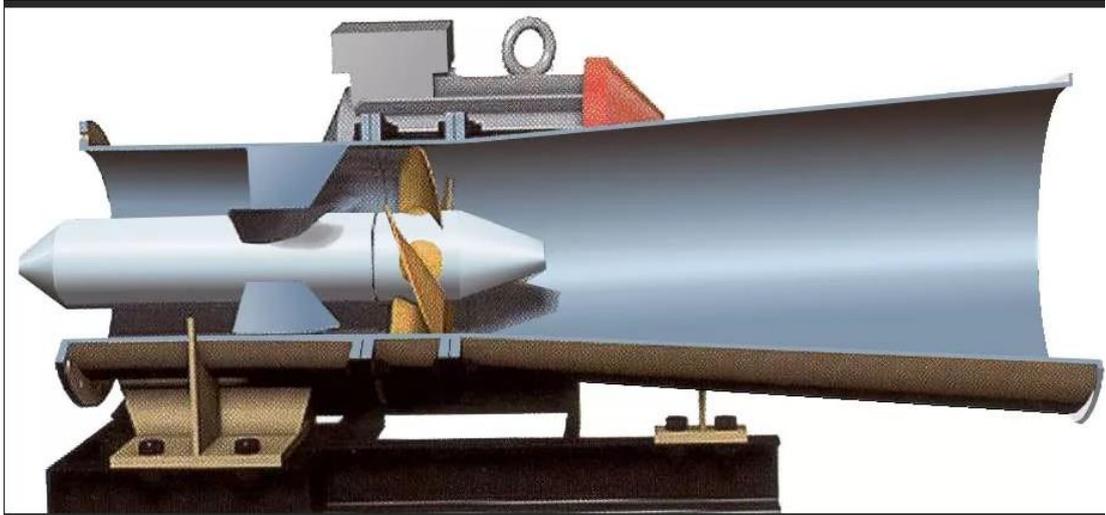


Рисунок. П1.3. Водопогружные проточные мини-ГЭС

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ПОСТОЯННОГО МАГНИТА ПРИ ПОМОЩИ ИНЖЕНЕРНОЙ МЕТОДИКИ И ПРИ ПОМОЩИ САД СИСТЕМЫ ANSYS ELECTRONICS DESKTOP.

Для проверки точности расчета разработанной инженерной методики она сравнивалась с решением задач копий в программе Ansys Electronics Desktop, которая осуществляет автоматическую разбивку области расчета на несколько тысяч элементов.

В качестве одного из вариантов тестирования была выбрана магнитная система со следующими параметрами:

- воздушный зазор, (м)	0.01;
- толщина магнита, (м)	0.01;
- ширина магнита, (м)	0.04;
- толщина магнитопровода, (м)	0.02;
- расстояние между боковой гранью магнита и магнитопроводом (для потоков рассеяния), (м)	0.005;
- Остаточная индукция магнитного материала, (Тл)	1.1;
- коэрцитивная сила магнитного материала, (А/м)	890000.

На рис.1. представлены результаты сравнительного анализа расчета основных параметров в программе Mathcad и в программе Ansys Electronics Desktop.

Погрешность по определению средней индукции в воздушном зазоре составила 1.5 %, что является очень хорошим результатом для инженерных расчетов. Следует отметить, что время решения всех тестовых задач составило доли секунды, в отличие от работы программы Ansys Electronics Desktop, которая занимала около 2 минут.

Data Table 1

Maxwell2DDesign1

	Shm [mm]	Flux_Magnet_N Setup1 : LastAdaptive	Flux_Magnet Setup1 : LastAdaptive	Flux_Air Setup1 : LastAdaptive	Bsr_Magnet_N1 Setup1 : LastAdaptive	Bsr_Magnet11 Setup1 : LastAdaptive	Bsr_Air Setup1 : LastAdaptive
1	10.000000	0.014449	0.011704	0.009317	0.722467	0.585188	0.465830

Индукция в зазоре

$$B_{\text{delta}} = \frac{AA_{17}}{0.5 \cdot b_m} \quad B_{\text{delta}} = 0.473$$

Индукция в нейтральном сечении магнита

$$B_{\text{mag}} = \frac{AA_1}{0.5 \cdot b_m} \quad B_{\text{mag}} = 0.715$$

Индукция на поверхности магнита

$$B_{\text{mag}} = \frac{AA_{13}}{0.5 \cdot b_m} \quad B_{\text{mag}} = 0.579$$

Индукция в магнитопроводе

$$B_{\text{fe}} = \frac{AA_{16}}{l_j} \quad B_{\text{fe}} = 0.495$$

Индукция рассеяния с боковой стороны магнита

$$\left| \frac{AA_{13} - AA_1}{b_m} \right| = 0.274$$

Магнитный поток

$$F_{\text{mag}} = AA_{13}$$

$$F_{\text{mag}} = 0.01157$$

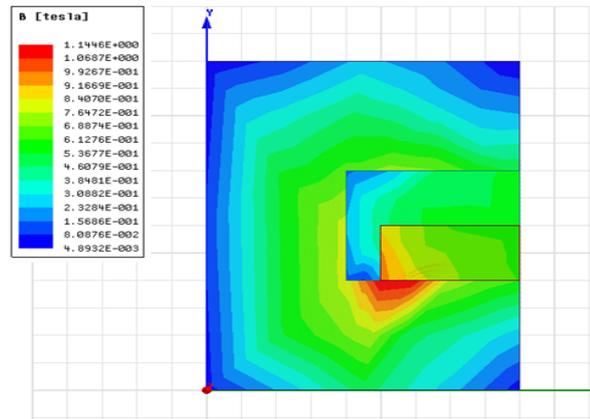


Рисунок. П2.1. Результаты решения задачи копии в программе Ansys Electronics Desktop

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. ДОКУМЕНТЫ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Документ об использовании результатов диссертационной работы Аминова
Д.С. в учебном процессе на кафедре «Теоретические основы
электротехники» Южно - Уральский государственный университет



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»

д.т.н., доцент

А.В. Коржов

2020 г.

Акт

об использовании материалов диссертационной работы

Аминова Дилшода Саидовича на тему:

**«Теоретические основы разработки водопогружных гидрогенераторов,
используемых в качестве возобновляемых источников электроэнергии
малых и средних рек» в учебном процессе**

Результаты диссертационной работы Аминова Дилшода Саидовича «Теоретические основы разработки водопогружных гидрогенераторов, используемых в качестве возобновляемых источников электроэнергии малых и средних рек» внедрены в учебном процессе на кафедре «Теоретические основы электротехники» Южно-Уральский государственный университет (НИУ) при подготовке бакалавров по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника в курсе «Проектирование специальных электрических машин».

В учебный процесс внедрены методы построения трехмерных твердотельных моделей, методы оценки электромагнитного и теплового состояния электрических машин.

И.О. декана Энергетического факультета

А.Е. Бычков

Заведующий кафедрой

«Теоретические основы электротехники»

С.А. Ганджа

Документ об использовании результатов диссертационной работы Аминова
Д.С. в Каскаде Варзобских ГЭС


«УТВЕРЖДАЮ»
Директор Каскада
Варзобских ГЭС
Абдулхазода Х.А.
« / » 2020 г.



АКТ

**о внедрении результатов кандидатской диссертации Аминова Д.С.
«Теоретические основы разработки водопогружных гидрогенераторов,
используемых в качестве возобновляемых источников электроэнергии
малых и средних рек»**

Результаты диссертационной работы Аминова Д.С. были рассмотрены на Касакаде Варзобских ГЭС. Отдельное внимание было уделено теоретической возможностей способа оценке технического состояния гидрогенераторов, описанный в диссертационной работе. Предложенный метод представляет особый интерес для Каскада Варзобских ГЭС. На основе обсуждения полученных результатов метод предложен к внедрению для оценки технического состояния гидрогенераторов.

Главный инженер



Джононов М.М.

Документ об использовании результатов диссертационной работы Аминова
Д.С. в учебном процессе на кафедре «Электрические станции» Института
энергетики Таджикистана

МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ И ВОДНЫХ РЕСУРСОВ РЕСПУБЛИКИ
ТАДЖИКИСТАНА
ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ ТАДЖИКИСТАНА

УТВЕРЖДАЮ

Ректор
Института энергетики Таджикистана
кандидат технических наук, доцент
Назарзода Х.Х.
04 2020 г.



СПРАВКА

об использовании материалов диссертационной работы
Аминова Дилшода Саидовича
«Теоретические основы разработки водопогружных
гидрогенераторов, используемых в качестве возобновляемых источников
электроэнергии малых и средних рек» в учебном процессе

Настоящей справкой подтверждаю, что результаты диссертационной работы Аминова Дилшода Саидовича «Теоретические основы разработки водопогружных гидрогенераторов, используемых в качестве возобновляемых источников электроэнергии малых и средних рек» используются в учебном процессе Института энергетика Таджикистана студентами энергетического факультета специальности 1-430105-05 «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» при изучении дисциплины «Проектирование гидроэлектростанций для малых рек». В учебный процесс внедрены методы оптимального проектирования, методы электромагнитного и теплового анализа.

Заведующий кафедрой
«Электрические станции»

Рахимов Х.А.