

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

На правах рукописи



Котов Антон Андреевич

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ АСИНХРОНИЗИРОВАННОГО
СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
УСТАНОВОК БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ**

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук,
доцент
Ганджа Сергей Анатольевич

Челябинск – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. ВЫБОР ТИПА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ. ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДИК ПРОЕКТИРОВАНИЯ.....	22
1.1 Анализ возможных вариантов электрических генераторов для ветроэнергетических установок	23
1.1.1. Генератор постоянного тока	24
1.1.2. Асинхронный генератор	25
1.1.3. Синхронный генератор.....	26
1.1.4. Асинхронизированный синхронный генератор (машина двойного питания).....	27
1.2 Конструктивные варианты исключения щётчного узла для асинхронизированных синхронных генераторов	30
1.2.1. Установка бесщёточного возбуждательного устройства.....	30
1.2.1.1. Конструкция бесщёточного возбуждательного устройства на основе обращённого синхронного генератора.	32
1.2.1.2. Конструкция бесщёточного возбуждательного устройства на основе асинхронизированного синхронного генератора	33
1.2.2. Установка вращающегося трансформатора	34
1.3. Использование аккумуляторной батареи для бесконтактного питания цепи ротора асинхронизированного синхронного генератора.....	37
1.4. Структура проектной системы асинхронизированного синхронного генератора	41
Выводы по главе	43

2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО РАСЧЕТА АСИНХРОНИЗИРОВАННОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ЕГО ГЕОМЕТРИИ.....	44
2.1. Разработка математической модели расчета максимальных габаритов ротора при обеспечении отсутствия критических частот в рабочем диапазоне скоростей вращения.....	46
2.2. Разработка математической модели электромагнитного расчета асинхронизированного синхронного генератора	51
2.2.1. Входные параметры математической модели	53
2.2.1.1. Константы.....	53
2.2.1.2. Ограничения.....	54
2.2.1.3. Независимые переменные.....	55
2.2.2. Выходные параметры математической модели.....	60
2.3. Уравнения связи элементов магнитопровода асинхронизированного синхронного генератора и обобщённых переменных.....	61
2.4. Алгоритм математической модели расчета асинхронизированного синхронного генератора.....	65
2.5. Блок-схема алгоритма расчета асинхронизированного синхронного генератора.....	75
2.6. Расчет выходных параметров и характеристик.....	80
Выводы по главе	85
3. РАЗРАБОТКА ПОДСИСТЕМЫ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ асинхронизированного синхронного генератора ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПРОЕКТНЫХ СИТУАЦИЙ.....	87

3.1. Постановка задачи однокритериальной оптимизации асинхронизированного синхронного генератора	88
3.2. Выбор метода оптимизации.....	88
3.3. Определение уровней оптимизации	90
3.3.1. Полная габаритная оптимизация.....	91
3.3.2. Оптимизация при фиксированном наружном, внутреннем диаметрах и наружной длине (в заданных габаритах).....	91
3.3.3. Габаритная оптимизация при фиксированном наружном диаметре	92
3.3.4 Габаритная оптимизация при известном штампе.....	93
3.3.5. Поверочный расчет	93
3.4. Алгоритм выбора уровня оптимизации.....	94
Выводы по главе	95
4. РАЗРАБОТКА ПОДСИСТЕМЫ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО И ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ АСИНХРОНИЗИРОВАННОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА	96
4.1. Анализ электромагнитного состояния асинхронизированного синхронного генератора в программной среде Ansys Electronics Desktop	97
4.2. Анализ теплового состояния асинхронизированного синхронного генератора посредством решения связанной задачи теплового и вентиляционного расчёта в программной среде MATLAB SIMULINK.....	112
Выводы по главе	128
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	130
ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	133
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....	137
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	139

Приложение А. Классификация ветроэнергетических установок по мощности и конструктивному исполнению.....	158
Приложение Б. Конструкция асинхронной машины с фазным ротором	159
Приложение В. Применение проектной системы при проектировании асинхронизированного синхронного генератора для ветроустановки 3,6 МВт.	160
Приложение Г. Обзор современных систем автоматизированного проектирования	165
Приложение Д. Документы о внедрении результатов диссертационного исследования в АО «Русские электрические двигатели»	172

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Последние десять лет в мировом научном сообществе идут острые дискуссии о путях развития современной энергетики. Консервативная его часть считает, что углеводородная энергетика, основанная на использовании угля, нефти и газа, еще долгое время будет оставаться основным источником тепловой и электрической энергии для экономически развитых стран. У этой точки зрения есть основания. Запасы углеводородов на Земле еще достаточно велики. Углеводородная индустрия имеет отлаженную инфраструктуру: в наличии предприятия по производству необходимого оборудования, предприятия по строительству и обслуживанию энергетических объектов, научные исследования по повышению эффективности выработки электроэнергии этим способом.

Но при отмеченных преимуществах традиционная энергетика, основанная на углеводородах, сталкивается с большим количеством проблем и противоречий. Эти противоречия с каждым годом нарастают и, в конечном счете, могут привести к кризису традиционной энергетики, если не предпринять попытки к развитию энергетики альтернативной.

Одна из причин – удорожание добычи углеводородов. Рентабельные нефть, газ и уголь уже использованы. Добычу ископаемых приходится вести на больших глубинах под поверхностью земли, на дне океана, осваивать труднодоступные северные регионы. В конце концов, это может оказаться экономически невыгодным.

Вторая очень важная причина – экологические проблемы. Природа миллионы лет стремилась уравновесить содержание углекислого газа в атмосфере. Углеводородная энергетика это равновесие нарушает, и последствия такого нарушения человечество еще до конца не оценило. Кризис может коснуться не только изменения климата, но и живой природы, а на заключительном этапе проблемы возникнут в человеческом обществе.

Кроме того, очень мало говорят о низкой эффективности традиционной энергетики. Наивысший коэффициент полезного действия (КПД) тепловых станций составляет около 30 %, а доля их в балансе мировой энергетики – по разным оценкам, от 60 до 70 %. Данные цифры свидетельствуют о том, что традиционная энергетика способствует не только нагреванию планеты, но загрязнению ее выбросами производства. Этот процесс не может длиться долгое время. Один из вариантов решения назревших проблем – изменение баланса генерации электроэнергии в сторону расширения использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [127–129, 132–140, 144–149, 151, 157].

В настоящее время доля ВИЭ в общем балансе энергогенерации развитых стран постоянно растет [46, 154]. Источники возобновляемой энергии достаточно разнообразны: гидроресурсы, солнце, ветер, биогаз, геотермальная энергия, энергия волн, энергия приливов и отливов. В связи с чем возникает вопрос, какому источнику отдать приоритет в развитии. Энергия ветра является одним из наиболее доступных вариантов.

По данным BP Statistical Review of World Energy, в 2019 году мировой объем электроэнергии, выработанной ветроэнергетическими установками (ВЭУ), составил 1 270 ТВт·ч (млрд кВт·ч). За год количество произведенной ВЭУ электроэнергии увеличилось на 12,6 %. Тройку стран-лидеров составили КНР, США, Германия (таблица В.1).

По данным Global Wind Energy Council [103], на конец 2019 года наибольшая доля вырабатываемой мощности ВЭУ приходилась на Азию (44,8 %), Европу (31,4 %) и Северную Америку (26 %).

Таким образом, всего лишь за последние два десятилетия мировой объем вырабатываемой ВЭУ электроэнергии вырос почти в 30 раз, а объем установленных мощностей ВЭУ – почти в 40 раз.

Таблица В.1

**Статистика по объему выработанной ВЭУ электроэнергии
среди стран-лидеров (на конец 2018 года)**

Страна	Объем выработанной ВЭУ электроэнергии, ТВт·ч	Доля в общемировом объеме, %
КНР	366	28,8
США	277	21,8
Германия	111,6	8,8

В России ветроэнергетика используется в меньшем масштабе. По данным Российской ассоциации ветроиндустрии, в 2019 году в стране насчитывалось 564 ветроустановки общей мощностью 190,54 МВт [68]. Тем не менее, в последнее время российская ветроэнергетическая отрасль достаточно интенсивно развивается: анонсируются и реализуются проекты по строительству крупных ветроэнергетических станций (ВЭС) – «Ульяновская ВЭС-2», «Кольская ВЭС», «Азовская ВЭС» [68].

Особенность развития отечественной ветроэнергетики заключается в том, что строительство ВЭС реализуется в основном с привлечением иностранных партнеров, таких как Siemens Gamesa Renewable Energy S.A., Vestas, Lagerwey. Следует отметить, что эти фирмы имеют значительный производственный опыт и большие научные заделы в развитии ветроэнергетической индустрии. Кроме этого, для зарубежных компаний, способствующих внедрению ВЭС в России, существует принцип локализации. Согласно постановлению правительства РФ № 426 от 03.06.2008 г., иностранные партнеры обязаны не только ввозить оборудование, но и размещать его производство на территории РФ, создавая тем самым новые предприятия и рабочие места, в том числе локализуя производство крупных электрических генераторов для ВЭУ. Примером этому служит освоение выпуска генераторов фирмы Siemens Gamesa Renewable Energy S.A. концерном РУСЭЛПРОМ.

При всех положительных эффектах этого постановления следует признать, что ни одно развитое государство не будет переносить новейшие научные разработки и инновационные индустриальные технологии на территорию другого

государства. В Россию поставляется морально устаревшее и довольно часто физически изношенное оборудование, которое отслужило свой срок и требует серьезной модернизации. Поэтому развитие собственной научной базы и соответствующей ей современной индустрии является как экономической, так и стратегической задачей. **В связи с этим отечественные научно-исследовательские работы в области развития ветроэнергетики являются весьма важными и актуальными.**

ВЭУ представляет собой комплекс сложных технических устройств и агрегатов (рисунок В.1).

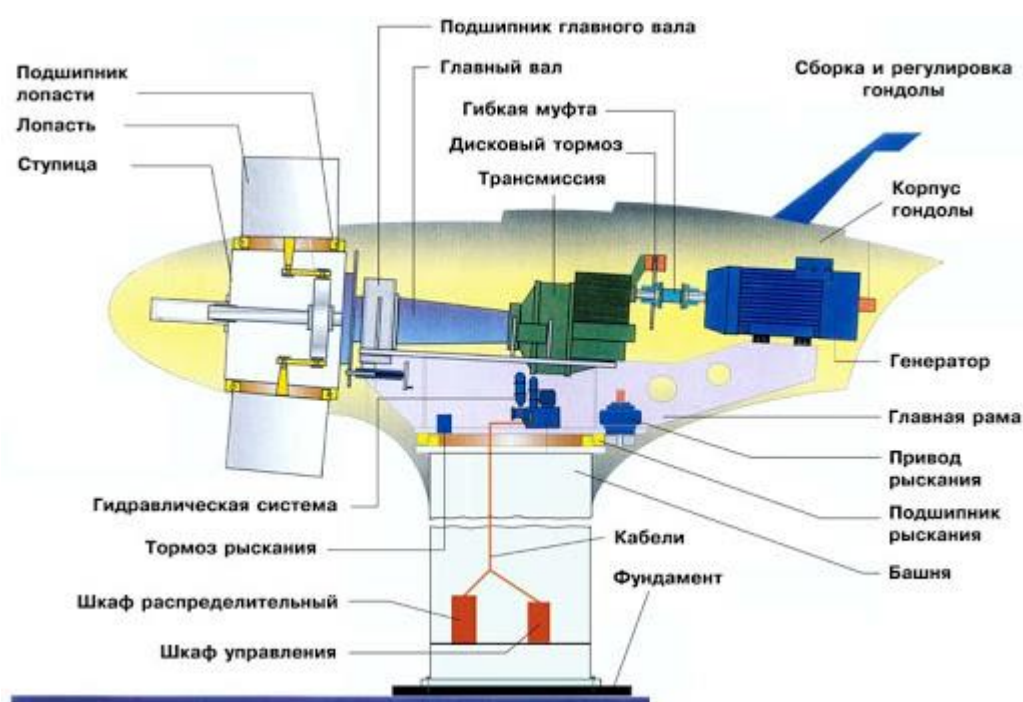


Рис. В.1. Состав ВЭУ

Наиболее сложной, важной и дорогостоящей частью ВЭУ, во многом определяющей все технические и экономические показатели, является генератор. Неправильный выбор типа генератора, некорректная оптимизация геометрии активных частей, низкая энергоэффективность электрической машины могут привести к ситуации, когда совершенствование остальных элементов теряет

смысл. Именно на этот элемент ВЭУ должны быть направлены основные научные усилия по его синтезу и анализу.

Степень разработанности исследуемой темы

В России в области ветроэнергетики существует большое количество научных разработок. Создание Н. Е. Жуковским теоретических основ ветродвигателя (1920-е гг.) значительно подтолкнуло развитие в стране этой отрасли. К разработкам привлекались Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ), Всесоюзный институт электрификации сельского хозяйства (ВИЭСХ), Центральный ветроэнергетический институт (ЦВЭИ), НПО «ВЕТРОЭН». В 1930–60-х гг. СССР становится мировым лидером ветроэнергетики, одним из крупнейших производителей ВЭУ с суммарной установленной мощностью более 100 МВт (конец 1950-х гг.). В 1958 году в районе г.Акмолинска введена в эксплуатацию первая в мире многоагрегатная ВЭС-400 (на базе 12 агрегатов Д-18), позволившая получить ценный опыт организации совместной работы нескольких ВЭУ. Однако дальнейшее развитие ветроэнергетики было практически остановлено из-за взятого в конце 1960-х гг. курса на создание Единой энергетической системы страны на базе мощных гидро- и атомных электростанций.

В развитии мировой ветроэнергетики решающую роль сыграл энергетический кризис 1973–74-х гг., после которого индустриально развитые страны активизировали исследовательские и конструкторские работы, что привело к организации в 1980-х гг. крупного серийного производства ветроэнергетической техники.

Научные исследования в области ветроэнергетики в России возродились в 1990-х гг. в связи с ростом цен на энергоносители. К наиболее значимым разработкам относятся установки АВЭ-250 мощностью 200 кВт (НПО «ВЕТРОЭН» совместно с НПО «Южное», Украина) и ВЭУ Р-1000 мощностью 1 000 кВт (МКБ «Радуга»). На базе шести установок АВЭ-250 построена

Воркутинская ВЭС (1993 г.). ВЭУ Р-1000 поставлена в качестве первого агрегата Калмыцкой ВЭС близ г. Элисты в 1994 году. В режиме опытной эксплуатации на Чукотском полуострове находится Анадырская ВЭС мощностью 2,5 МВт из 10 модернизированных АВЭ-250М. Кроме того, созданы и работают такие станции, как Куликовская ВЭС (мощность 5,1 МВт), ВЭС на острове Беринга (0,5 МВт), Башкирская ВЭС (2,2 МВт), Саратовская ВЭС (0,3 МВт).

Наиболее значимый научный вклад в развитие ВЭУ в целом и отдельных ее компонентов внесли следующие научные учреждения:

- Московский энергетический институт (государственный технический университет): ученые К. Я. Вильданов, В. А. Морозов, В. И. Нагайцев, А. В. Иванов-Смоленский, С. В. Иваницкий, Н. И. Пашков, С. А. Грузков занимались развитием общей теории расчета электрических машин с постоянными магнитами, развитием математических моделей динамических режимов работы асинхронных двигателей интегрального исполнения; Н. Ф. Ильинский, В. А. Кузнецов, А. Б. Красовский, О. П. Темиров, В. Н. Остриров, В. Ф. Козаченко, А. М. Русаков разрабатывали мощные вентильно-индукторные электрические машины;

- Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики: ученый С. Г. Герман-Галкин внес существенный вклад в разработку компьютерных моделей машин двойного питания в среде MatLab;

- Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина: ученые А. Т. Пластун, Ф. Н. Сарапулов, С. Е. Миронов, Е. Н. Андреев занимались разработкой конструкций торцевых машин, развитием теории и методов расчета синхронных машин с кольцевыми обмотками;

- Ивановский государственный энергетический университет: ученые Н. Н. Новиков, Е. Б. Герасимов, Ю. Б. Казаков, А. И. Тихонов занимались развитием методов оптимального проектирования электрических машин и развитием

методов анализа магнитных и тепловых полей, разработкой систем автоматизированного проектирования (САПР) электрических машин;

– Самарский государственный технический университет: ученые Ю. А. Макаричев, А. В. Стариков, Ю. В. Зубков, Э. Г. Чеботков, А. С. Ануфриев внесли вклад в разработку методики анализа и синтеза вентильных электрических машин, в том числе и для ветроэнергетики;

– Липецкий государственный технический университет: ученые В. Н. Мещеряков, А. А. Муравьев исследуют управление машиной двойного питания при переменной частоте вращения;

– Томский политехнический университет (Инженерная школа энергетики): ученые В. М. Завьялов, С. Е. Клочков исследуют применение асинхронизированного синхронного генератора в качестве источника питания;

– Уфимский государственный авиационный технический университет: ученые Р. Н. Султангалеев, В. В. Семенов разрабатывают автономную систему электроснабжения на основе асинхронизированного синхронного генератора;

– Нижегородский государственный технический университет: ученые О. С. Хватов, В. Г. Титов, А. В. Шахов, О. Н. Ошмарин разрабатывают электротехнические комплексы на основе машины двойного питания;

– Южно-Уральский государственный университет: ученые Ю. С. Усынин, М. А. Григорьев, Д. А. Сычев ведут разработки синхронного реактивного двигателя с независимым возбуждением; С. А. Ганджа разрабатывает теорию многоуровневой оптимизации вентильных электрических машин.

Имеется большое количество публикаций зарубежных исследователей в наукометрических базах Scopus и Web of Science, посвященных вопросам создания машин двойного питания и систем управления ими. Следует выделить работы следующих ученых: M. J. Harandi, S. G. Liasi, M. T. Bina, M. Niraula, L. Maharjan, L. Wei, R. J. Kerkman, R. A. Lukaszewski, M. M. Liwschitz, L. A. Kilgore, A. Pfeiffer, W. Scheidl, M. Eitzmann, E. Larsen, E. Nikraves, Slavomir

Seman, Jouko Niiranen, Reijo Virtanen, Jari-Pekka Matsinen [81, 85–90, 100, 102, 104–111, 114–117, 119–124].

Значительное число публикаций говорит о том, что многие проблемы ветроэнергетики до сих пор не решены. Основная часть научных исследований посвящена анализу электроприводов ВЭУ и способам управления ими, а вопросы, касающиеся проектирования и оптимизации самой электрической машины, в полной мере не раскрываются. Существующие САЕ-системы обеспечивают основу для реализации проектных систем электрических машин. Разработанные методы нелинейного программирования позволяют создавать многоуровневые системы оптимизации, но применительно к генераторам ВЭУ эти исследования не выполнены и эти научные пробелы должны быть восполнены.

В данной работе предпринята попытка разработать проектную систему, сочетающую в себе методику синтеза оптимальной геометрии и анализа полученных конструкторских решений применительно к генератору двойного питания.

Объект исследования

Таким образом, **объектом исследования** является асинхронизированный синхронный генератор большой мощности, предназначенный для работы в составе ветроэнергетической установки.

Предмет исследования

Предметом исследования являются методы оптимального проектирования данного типа генератора, методики анализа его электромагнитного и теплового состояния при различных режимах работы.

Цель диссертационного исследования

Целью диссертационного исследования является выбор наилучшего типа генератора применительно к мощной ветроэнергетической установке, разработка системы оптимизации с учетом габаритных ограничений, разработка моделей

электромагнитного анализа и анализа теплового состояния при различных режимах работы.

Достижение поставленной цели и внедрение результатов данного научного исследования в производство внесет ощутимый вклад в развитие отечественного электромашиностроения. Проектная система даст в руки инженеров-расчетчиков готовый инструмент для расчетов оптимальных вариантов асинхронизированных синхронных генераторов, что позволит значительно повысить скорость проектирования и точность расчетов.

Задачи исследования

Для достижения поставленной цели необходимо последовательно решить следующие задачи.

1. Выбрать тип электрической машины для ветроэнергетической установки с учетом всех особенностей режимов работы и требований к качеству генерируемой электроэнергии.

2. Разработать метод определения оптимального соотношения диаметра ротора генератора к его длине с целью обеспечения отсутствия критических частот в рабочем диапазоне скоростей вращения.

3. Разработать математическую модель оптимизации базового варианта генератора с учетом физических и технологических ограничений.

4. Разработать цифровую модель для анализа электромагнитного состояния генератора при различных режимах работы.

5. Разработать цифровую модель для анализа теплового состояния генератора при различных режимах работы.

6. На базе проведенных исследований разработать программные средства, представляющие собой проектную систему для решения связанной задачи синтеза (оптимизация геометрии) и анализа (оценка электромагнитного и теплового состояния) для проектирования генератора при различных проектных ситуациях.

Методология и методы исследования

Для решения поставленных задач использовались аналитические методы общей теории электрических машин, методы нелинейного программирования, методы эквивалентных схем замещения, метод конечных элементов для моделирования электромагнитных и тепловых процессов.

Научная новизна

Класс асинхронизированных синхронных машин известен достаточно давно, но вопросы бесконтактного токоподвода к цепи возбуждения, оптимизации геометрии, накопления электроэнергии самим генератором требуют инновационных решений. Научная новизна данного исследования заключается в техническом решении встроить аккумуляторную батарею в индуктор тихоходной ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения, обеспечив при этом бесконтактность токоподвода и накопление электроэнергии в период слабых воздушных потоков, а также в методике оптимального проектирования асинхронизированного синхронного генератора и в методике анализа его электромагнитного и теплового состояния при различных режимах работы.

Положения, выносимые на защиту

Автор на защиту выносит следующие основные научные результаты:

1. Методику определения максимальной длины активной части ротора из условия обеспечения отсутствия критических частот в рабочем диапазоне скоростей вращения, **отличающуюся тем, что** она позволяет на начальном этапе проектирования определить ограничения по длине активных частей ротора для последующего электромагнитного расчета генератора с целью обеспечения отсутствия критических частот в рабочем диапазоне скоростей вращения.

2. Математическую модель определения геометрии поперечного сечения магнитопровода асинхронизированного синхронного генератора, **отличающуюся тем, что** она построена на основе обобщенных переменных,

диапазон изменения которых всегда имеет фиксированные пределы от 0 до 1, что делает удобным использование данной модели в оптимизационных расчетах.

3. Математическую модель многоуровневой однокритериальной оптимизации асинхронизированного синхронного генератора, **отличающуюся тем**, что она позволяет проводить оптимизацию геометрии при различных проектных ситуациях, определенных техническим заданием заказчика.

4. Математическую модель анализа теплового состояния асинхронизированного синхронного генератора, **отличающуюся тем**, что она основывается на одновременном решении связанной вентиляционной и тепловой задачи.

5. Проектную систему для расчета асинхронизированного синхронного генератора, **отличающуюся** от разработанных ранее систем **тем**, что в основе ее лежит решение связанной задачи синтеза оптимальной геометрии и анализа электромагнитного и теплового состояния.

Соответствие паспорту специальности

Содержание диссертации соответствует Паспорту специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты. Научные результаты, полученные в работе, соответствуют п. 1 «Анализ и исследование явлений, лежащих в основе функционирования электрических, электромеханических преобразователей энергии и электрических аппаратов», п. 3 «Разработка методов анализа и синтеза преобразователей электрической и механической энергии», п. 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 машин двойного питания, которые недостаточно изучены в общей теории электрических машин, в частности, теоретическую новизну представляет собой методика определения обобщенных переменных, метод оптимизации асинхронизированного синхронного генератора с разделением на уровни, метод анализа электромагнитного и теплового состояния, который основан на решении связанной задачи.

Практическая значимость

Основным практическим результатом проведенной научной работы является создание программного комплекса по проектированию асинхронизированного синхронного генератора. Данная система представляет собой эффективный инструмент, который позволяет ускорить и облегчить сложную инженерную работу проектировщиков, повысить точность расчетов и снизить риски при производстве реального образца.

Внедрение результатов работы

Результаты научного исследования внедрены в производственную деятельность завода ОА «РЭД» (г. Челябинск) и используются в процессе проектирования нового оборудования. Также разработанные методики расчета и анализа магнитного и теплового состояния внедрены в учебный процесс кафедры «Теоретические основы электротехники» ЮУрГУ для студентов старших курсов бакалавриата по направлению подготовки «Энергетика и электротехника» при преподавании следующих дисциплин: «Конструкции, методы расчета и проектирования электромагнитных устройств и электромеханических преобразователей энергии» и «Проектирование специальных электрических машин».

Степень достоверности и апробация результатов работы

Основные положения результатов научной работы докладывались и обсуждались на таких научно-технических конференциях, как:

- Научный семинар аспирантов «IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice» (Магнитогорск, 2020);
- Международная научно-техническая конференция «International Conference on Industrial Engineering» (Челябинск, 2020);
- 72-я научная конференция профессорско-преподавательского состава, аспирантов и сотрудников Южно-Уральского государственного университета (Челябинск, 2020);
- Международная научно-техническая конференция «International Ural Conference on Electrical Power Engineering» (Челябинск, 2019);
- 10-я научная конференция аспирантов и докторантов Южно-Уральского государственного университета (Челябинск, 2018);
- Международная премия «Малая энергетика – большие достижения» (Челябинск, 2015).

Публикации по теме диссертации

По результатам проведенного научного исследования опубликовано 8 работ, из них: 3 статьи – в журналах из базы данных Scopus, 3 статьи – в журналах, входящих в перечень ВАК Минобрнауки РФ, 1 статья – в сборнике докладов научно-практической конференции, а также имеется одна публикация в международном издании Intechopen (Лондон).

Личный вклад автора в диссертационное исследование

Данная научная работа была выполнена совместными усилиями профессорско-преподавательского состава кафедры «Теоретические основы электротехники» ЮУрГУ и инженерно-технического персонала конструкторского отдела завода АО «РЭД» (г. Челябинск). Лично автором

разработаны основные положения диссертации: реализация метода определения оптимального отношения диаметра ротора к его длине с целью исключения критических частот, реализация математической модели определения геометрии поперечного сечения магнитопровода через обобщенные переменные, реализация математической модели анализа электромагнитного и теплового состояния генератора.

Автор выражает благодарность своему научному руководителю – доктору технических наук, доценту Сергею Анатольевичу Гандже за конструктивную критику и содействие в работе над диссертацией. Также автор выражает благодарность сотрудникам коллектива завода АО «РЭД» (г. Челябинск), а именно: техническому директору Дмитрию Владимировичу Соколову за моральную поддержку во время написания данной научной работы, ведущему инженеру-конструктору Тимофею Юрьевичу Рыбаку и инженеру-конструктору 1 категории Андрею Игоревичу Согрину за консультации при проведении исследований.

Структура диссертации

Диссертация имеет следующую структуру: определения используемых научных терминов, основные обозначения и сокращения, введение, 4 главы, заключение, список литературы из 157 наименований, 5 приложений. Работа изложена на 173 страницах, из них 139 страниц основного текста, содержит 77 иллюстраций, 104 аналитических выражения, 5 таблиц.

Диссертация имеет следующую логику изложения.

Во **введении** обоснована актуальность темы, представлена степень научной проработанности вопроса по генераторам для ВЭУ, определены задачи и методы исследования, указана научная новизна и соответствие паспорту специальности, показана практическая значимость работы, дана информация о публикациях по теме диссертации и ее апробации на конференциях, определен личный вклад автора в представленное исследование.

Первая глава дает описание функциональной схемы ВЭУ. В главе сформулирована основная проблема ветроэнергетики, которая заключается в преобразовании нестандартных параметров электроэнергии в стандартные при изменении направления ветрового потока и его интенсивности. Рассмотрены возможные варианты электрических генераторов для ВЭУ. Дан качественный анализ преимуществ и недостатков различных типов генераторов. В качестве базового варианта выбран асинхронизированный синхронный генератор (машина двойного питания), позволяющий вырабатывать электроэнергию со стандартными параметрами по частоте, амплитуде и фазе при широком диапазоне изменения частоты вращения ротора. Представлены варианты устранения главного конструктивного недостатка данного типа электрической машины – щеточно-контактного узла – за счет размещения на вращающейся части аккумуляторной батареи, которая выполняет функцию бесконтактного токоподвода и функцию накопления электроэнергии для тихоходных ВЭУ с вертикальной осью вращения.

Во **второй главе** сформулирована проблема проектирования генераторов большой мощности, работающих в широком диапазоне скоростей вращения. Представлена методика и математическая модель расчета максимальных габаритов ротора при обеспечении отсутствия критических частот в рабочем диапазоне скоростей вращения. Выведены обобщенные переменные для математической модели электромагнитного расчета. Разработана математическая модель электромагнитного расчета генератора для системы оптимального проектирования. Представлен алгоритм расчета в виде последовательности расчетных шагов, показана блок-схема математической модели.

В **третьей главе** разработана система многоуровневой однокритериальной оптимизации. Сформулирована задача однокритериальной оптимизации асинхронизированного синхронного генератора, выбран метод оптимизации, дано

понятие уровней оптимизации, определены пять уровней применительно к проектированию данного типа генератора.

В **четвертой главе** представлена разработка системы анализа электромагнитного состояния асинхронизированного синхронного генератора. Анализ разбит на несколько этапов. Первоначально проведен анализ электромагнитного состояния данного типа генератора в режиме RМхprt программной среды Ansys Electronics Desktop. На следующем этапе выполнен анализ его электромагнитного состояния в режиме 2D Maxwell Design программной среды Ansys Electronics Desktop с решением полевой задачи на основе метода конечных элементов и определением всех энергетических параметров. В подсистему анализа включена оценка теплового состояния асинхронизированного синхронного генератора, реализованная в программной среде MATLAB SIMULINK. В тепловом анализе решается связанная вентиляционная и тепловая задача и рассчитывается динамика нагрева от пуска до установившейся температуры.

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

В диссертации приведен **список** использованной научной **литературы**, состоящий из 157 отечественных и зарубежных источников.

Работа дополнена 5 **приложениями**, которые содержат информацию, касающуюся конструкций ВЭУ и асинхронизированного синхронного генератора, опыта применения проектной системы и разновидностей современных систем автоматизированного проектирования и данных о внедрении результатов научной работы.

1. ВЫБОР ТИПА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ. ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДИК ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Вводные замечания

В настоящее время известно большое количество конструктивных исполнений ВЭУ. В основном они классифицируются по расположению оси вращения ветроколеса, по скорости вращения ветроколеса, по типу привода (с прямым приводом или через редуктор), по наличию системы ориентации или ее отсутствию [61, 130]. Значительное число конструктивных вариантов ВЭУ позволяет добиваться наиболее оптимального использования энергии ветра применительно к каждому частному случаю установки (см. приложение А). Однако нужно понимать, что ветер по своей природе нестабилен: его поток постоянно меняет направление движения и скорость. Таким образом, ВЭУ приходится работать в широком диапазоне изменения частот вращения.

Из общей теории электрических машин [14, 37, 44, 72] хорошо известно, что скорость вращения ротора генератора прямо влияет на основные характеристики электроэнергии. Таким образом, вращаясь с разной скоростью, генератор выдает напряжение с переменными параметрами по амплитуде, частоте и фазе (рисунок 1.1).



Рис. 1.1. Генерация электроэнергии при изменении параметров ветрового потока

В свою очередь требования ГОСТ 32144–2013 [30] накладывают строгие ограничения на параметры качества электрической энергии. Принимая это во внимание, можно сформулировать главную проблему ветроэнергетики. Она заключается в необходимости преобразования электроэнергии с переменными параметрами в электроэнергию со стандартными параметрами при изменении направления и интенсивности ветрового потока.

Проблема исключения нестабильности направления ветрового потока решается применением системы ориентации для горизонтально-осевых ВЭУ и использованием ВЭУ с вертикальной осью вращения, которые нечувствительны к направлению ветра.

Для стабилизации частоты выходного напряжения возможны два варианта технических решений. Первый вариант – это механическое воздействие непосредственно на скорость вращения ветроколеса, что технически возможно, например, за счет изменения угла атаки лопасти. Данный способ называется питч-регулированием [3, 13, 41, 77, 80, 107, 152]. Второй вариант – электрическое преобразование нестандартной энергии в стандартную. Это технически реализуется при помощи включения в состав ВЭУ электронных систем управления возбуждением генераторов и электронных систем стабилизации выходной энергии. Но необходимо понимать, что состав и архитектура данных электронных систем напрямую зависит от типа генерирующего устройства, включенного в состав ВЭУ. Соответственно, наиболее важный вопрос при создании ВЭУ – это выбор типа генератора.

1.1 Анализ возможных вариантов электрических генераторов для ветроэнергетических установок

Из всех типов электрических машин традиционно можно выделить несколько основных типов генераторов, применяющихся в ветроустановках: генераторы постоянного тока, асинхронные генераторы, синхронные генераторы,

асинхронизированные синхронные генераторы [124, 125, 155]. Каждый тип генератора имеет свои преимущества и недостатки. Поэтому рассмотрим каждый из них в отдельности.

1.1.1. Генератор постоянного тока

Структурная схема ВЭУ на основе генератора постоянного тока (ГПТ) приведена на рисунке 1.1.1.1.

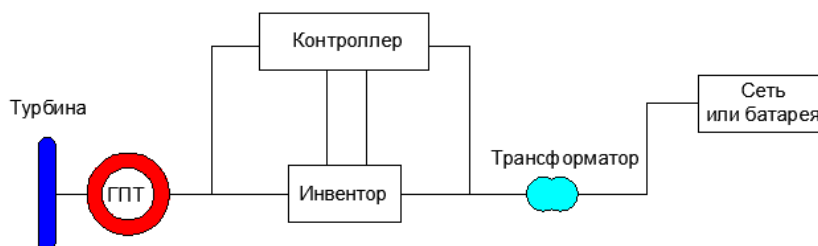


Рис. 1.1.1.1. Структурная схема ВЭУ на основе ГПТ

Данная ВЭУ состоит из турбины, ГПТ, инвертора для преобразования постоянного тока в переменный, контроллера для управления преобразованием постоянного тока в переменный нужной частоты и амплитуды, а также трансформатора (возможно исключить). ВЭУ на основе машины постоянного тока требует регулярного технического обслуживания. Они достаточно дороги и ненадежны из-за наличия коллектора с щеточным аппаратом [34] и коммутатора (инвертор + контроллер).

Данная архитектура ВЭУ не завоевала особой популярности в мире. На сегодняшний день она находит применение только в качестве ветрогенераторов малой мощности.

1.1.2. Асинхронный генератор

В данных системах используются асинхронные генераторы (АГ) с короткозамкнутым ротором, которые непосредственно соединены с сетью [48]. Структурная схема ВЭУ на основе АГ изображена на рисунке 1.1.2.1.

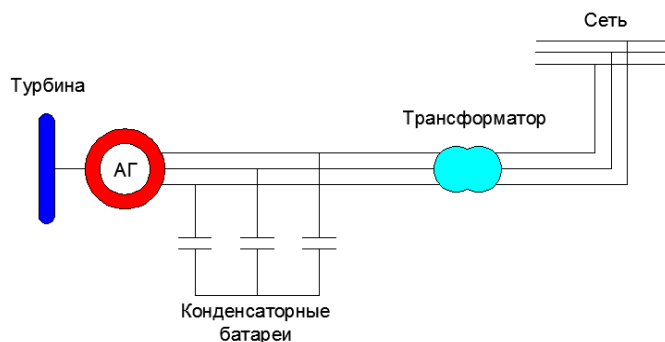


Рис. 1.1.2.1. Структурная схема ВЭУ на основе АГ

Один из недостатков данной системы заключается в том, что АГ не имеет собственного источника возбуждения, и для функционирования ему необходимо потреблять реактивную мощность из внешней сети. Таким образом, при работе напрямую с сетью данный генератор потребляет реактивную мощность из самой сети, что негативно сказывается на таком важном параметре, как коэффициент мощности сети ($\cos \varphi$). С целью компенсации реактивной мощности, а также при работе в автономном режиме ВЭУ комплектуют конденсаторными батареями, однако они довольно дорогостоящи и ненадежны. Второй недостаток заключается в том, что АГ может работать только при определенных ветрах, которые обеспечивают превышение скорости ротора относительно скорости вращения магнитного поля машины. Также применяются АГ с фазным ротором, поскольку влияние на цепь ротора позволяет изменять величину скольжения, что дает возможность работать в более широких диапазонах частоты вращения. В Европе данная система была принята за основу для ветрогенераторов малой и средней мощности [153, 156], но указанные недостатки относятся к природе самой

электрической машины, что не позволяет интенсивно развиваться этому направлению.

1.1.3. Синхронный генератор

Трехфазная синхронная машина с самого начала развития ветроэнергетики рассматривалась как один из основных типов генераторов. Его конструктивные исполнения бывают с электромагнитным возбуждением или с постоянными магнитами [91–94], которые позволяют добиваться хороших массогабаритных характеристик [49]. Основная проблема у данного типа электрических машин заключается в том, что для генерирования переменного тока определенных параметров (частота и амплитуда напряжения) необходимо поддерживать постоянную скорость вращения ротора. В случае с электромагнитным возбуждением есть возможность поддерживать в определенном интервале амплитуду генерируемого возбуждения за счет изменения возбуждения, которое регулируется током обмотки возбуждения. Однако добиться поддержания определенной частоты напряжения при изменении скорости вращения невозможно без применения дополнительных устройств. Структурная схема ВЭУ на основе синхронного генератора (СГ) приведена на рисунке 1.1.3.1.

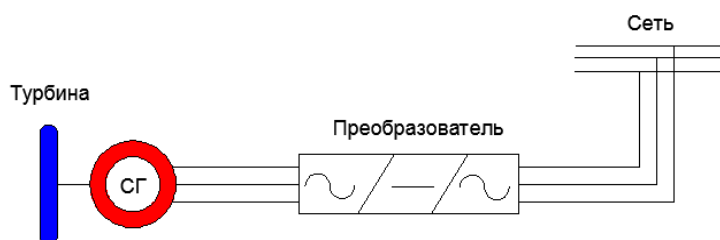


Рис. 1.1.3.1. Структурная схема ВЭУ на основе СГ

Как видно из схемы, в состав ВЭУ, помимо турбины и самого генератора, входит электронный преобразователь частоты (ПЧ). Данный преобразователь

первоначально выпрямляет генерируемое напряжение, а потом инвертирует его в переменное напряжение с заданными параметрами.

Данный тип ветрогенераторов в настоящее время довольно широко используется в ветроустановках различной мощности. Однако в ВЭУ большой мощности СГ применяются мало из-за ограниченных возможностей силовой электроники. Кроме этого, большое количество ступеней преобразования снижает общий КПД генерирующей системы.

1.1.4. Асинхронизированный синхронный генератор (машина двойного питания)

В последнее время особую популярность в системах ВЭУ завоевала машина двойного питания (DFIG), или асинхронизированный синхронный генератор (АСГ) [9, 10]. По конструкции это асинхронная машина с фазным ротором (см. приложение Б), но способ соединения АСГ с сетью абсолютно иной. Обмотку статора подключают к сети напрямую, а обмотку ротора, как правило, подключают к сети через ПЧ [143]. Структурная схема ВЭУ на основе АСГ показана на рисунке 1.1.4.1.

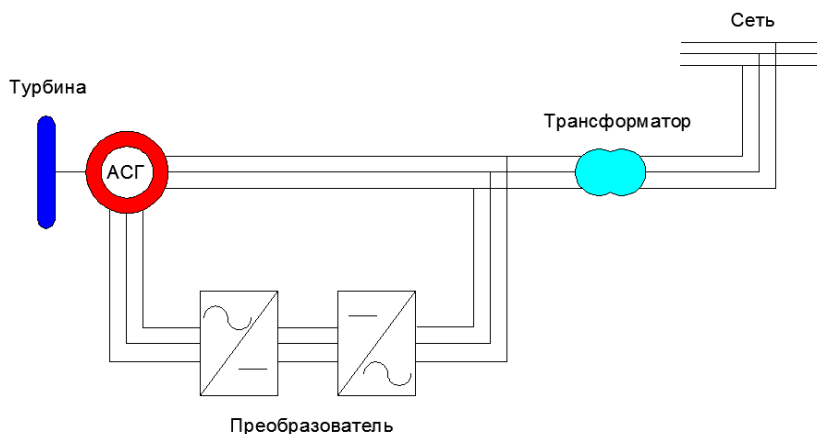


Рис. 1.1.4.1. Структурная схема ВЭУ на основе АСГ

Данный тип генератора может функционировать в трех режимах работы:

1) досинхронная скорость вращения ротора: электрическая мощность с необходимой частотой подается из сети в ротор, что соответственно создает поток энергии, идущий из обмотки статора в сеть;

2) синхронная скорость вращения ротора: на обмотку ротора подается постоянное напряжение, и он работает в режиме синхронного генератора;

3) сверхсинхронная скорость вращения ротора: подобно режиму работы при скорости вращения меньше синхронной, но при этом направление вращения поля ротора противоположное.

Данная электрическая машина обладает возможностью генерировать электрическую энергию с постоянными параметрами в широком диапазоне частоты вращения ротора ($\pm 30\%$) и возможностью управлять потоками реактивной мощности по цепи возбуждения, через которую проходит меньшая мощность, что соответственно сказывается на габаритах и стоимости электронного преобразователя [78]. Эти отличительные особенности и делают машину двойного питания наиболее привлекательной и эффективной для использования в ВЭУ, в результате к 2015 году АСГ занимали уже порядка 85 % от установленной мощности ветрогенераторов. Недостаток данного типа генераторов заключается в наличии требующего трудоемкого техобслуживания щеточного контакта для токоподвода к цепи ротора.

В настоящее время в мире действуют две крупные компании, которые наладили серийное производство АСГ для ветроустановок большой мощности, – это европейские фирмы ABB и Siemens.

ABB располагает линейкой генераторов двойного питания мощностью от 2,2 до 3,6 МВт с воздушным и жидкостным охлаждением, имеющих КПД до 97,5 % (рисунок 1.1.4.2) [101].



Рис. 1.1.4.2. Внешний вид генератора двойного питания фирмы ABB

Компания Siemens предлагает генераторы мощностью от 0,6 до 10 МВт [150]. Генераторы мощностью до 1,25 МВт имеют воздушный тип охлаждения, свыше 1,25 МВт – водяной. КПД для генераторов производства Siemens в зависимости от мощности составляет около 98 % (рисунок 1.1.4.3).



а)

б)

Рис. 1.1.4.3. Генераторы двойного питания фирмы Siemens:

а) мощностью 2,5 МВт; б) мощностью 5,3 МВт

Вариант АСГ в данное время имеет наибольшее применение в ВЭУ больших мощностей. Однако у него остается технический недостаток, связанный с наличием скользящего контакта и вынуждающий искать решения для его преодоления.

1.2 Конструктивные варианты исключения щётчного узла для асинхронизированных синхронных генераторов

Исключение щеточно-контактного узла из конструкции генераторов различных типов остается актуальной задачей на сегодняшний день. Решение этой проблемы существенно повысило бы надежность и упростило техническое обслуживание, что важно для устройств, находящихся на большой высоте в сложных климатических условиях [130].

С целью поиска оптимального решения по исключению щеточного узла был проведен анализ соответствующей литературы, на основании которого можно заключить, что в данный момент в мировой практике используются два пути решения этой проблемы:

- 1) установка бесщеточного возбудительного устройства (БВУ);
- 2) установка вращающегося трансформатора.

Ниже представлен принцип действия каждого варианта и его конструкция.

1.2.1. Установка бесщеточного возбудительного устройства

Данное конструктивное решение широко используется на синхронных турбогенераторах и синхронных электродвигателях большой мощности [43]. БВУ представляет собой дополнительный электрический генератор, установленный на один с основной электрической машиной вал. Для синхронных двигателей и турбогенераторов используется БВУ на основе обращенного синхронного генератора с включением в цепь ротора диодного выпрямителя. Общий вид БВУ представлен на рисунке 1.2.1.1. Общая электрическая схема БВУ – на рисунке 1.2.1.2.



Рис. 1.2.1.1. Конструкция БВУ: 1 – статор, 2 – ротор, 3 – вращающийся выпрямитель

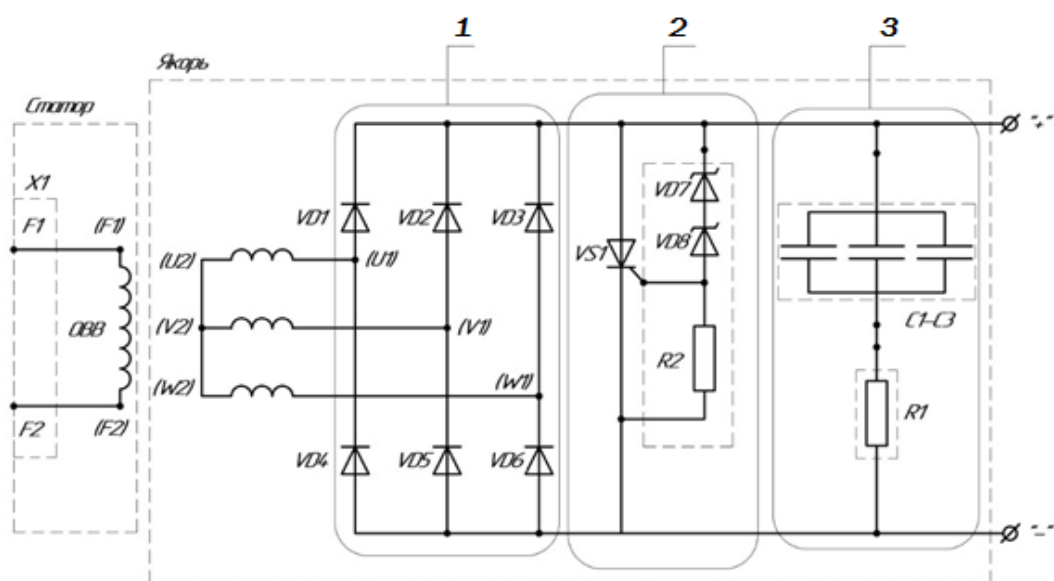


Рис. 1.2.1.2. Общая электрическая схема БВУ для синхронных двигателей и турбогенераторов: 1 – диодный мост, 2 – защитная цепь на время пуска синхронного двигателя, 3 – фильтр

Синхронные двигатели и турбогенераторы, как правило, эксплуатируются при постоянной скорости вращения и для их работы обмотка ротора должна питаться постоянным током, поэтому представленная концепция БВУ в полной мере удовлетворяет требованиям по обеспечению работы и нашла очень широкое применение.

Установка БВУ на один вал с АСГ представляет собой вентильно-машинный электромеханический каскад, являющийся одной из основных схем асинхронных вентильных каскадов, достаточно подробно исследованных в источнике [63].

При рассмотрении технической возможности применения БВУ вместо щеточного узла для АСГ необходимо выполнить следующие требования:

- обмотка ротора АСГ должна быть трехфазной;
- АСГ приходится работать в широком диапазоне скоростей вращения;
- БВУ должно обеспечивать как режим питания обмотки ротора генератора переменным током различной частоты, амплитуды и фазы, так и постоянным током.

Исходя из анализа данных требований, можно выделить два основных концептуальных решения по конструкции и схеме БВУ.

1.2.1.1. Конструкция бесщеточного возбуждательного устройства на основе обращённого синхронного генератора.

Эта конструкция аналогична рассмотренной выше конструкции БВУ для синхронных двигателей и турбогенераторов, но вместо диодного моста, цепи защиты и фильтра в цепь обмотки ротора устанавливается ПЧ, который в зависимости от скорости вращения питает обмотку ротора АСГ постоянным или переменным током определенной частоты, амплитуды и фазы. Общая электрическая схема данного типа БВУ представлена на рисунке 1.2.1.1.1.

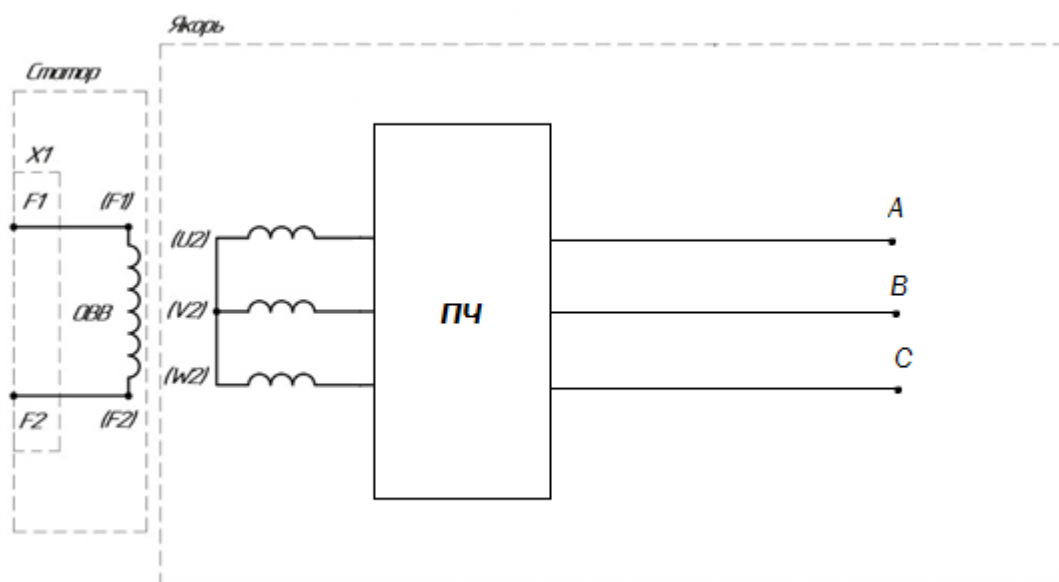


Рис. 1.2.1.1.1. Общая электрическая схема БВУ для АСГ на основе обращённого синхронного генератора

Нужно отметить, что поскольку АСГ для ВЭУ должен обеспечивать работу в широком диапазоне частот вращения ротора, то у БВУ должен оставаться источник регулирования мощности, независимый от скорости вращения ротора. В связи с этим наиболее применимо электромагнитное возбуждение вместо возбуждения за счет постоянных магнитов, которые соответственно не позволяют производить регулировку магнитного потока. Однако возможна комбинация электромагнитного возбуждения и магнитоэлектрического за счет применения в качестве БВУ электрического генератора комбинированного возбуждения [16–18, 23, 27, 99, 112].

1.2.1.2. Конструкция бесщеточного возбудительного устройства на основе асинхронизированного синхронного генератора

Если у БВУ на основе обращенного синхронного генератора заменить явнополюсный статор на статор с распределенной трехфазной обмоткой, то конструктивно получится АСГ (рисунок 1.2.1.2.1). Таким образом, конечное

устройство будет представлять собой соединение из двух АСГ, роторы которых закреплены на едином валу. Данная концепция позволяет избавиться от необходимости установки ПЧ в цепь ротора АСГ, но при этом потребуется установка электронного выпрямителя, который при синхронной скорости вращения ротора будет преобразовывать переменный ток БВУ в постоянный. При скоростях вращения, отличных от синхронной, необходимые параметры напряжения питания обмотки ротора АСГ можно создать за счет подбора частоты, фазы и амплитуды питания обмотки статора БВУ. Таким образом, необходимость установки ПЧ в цепь обмотки ротора АСГ отсутствует.

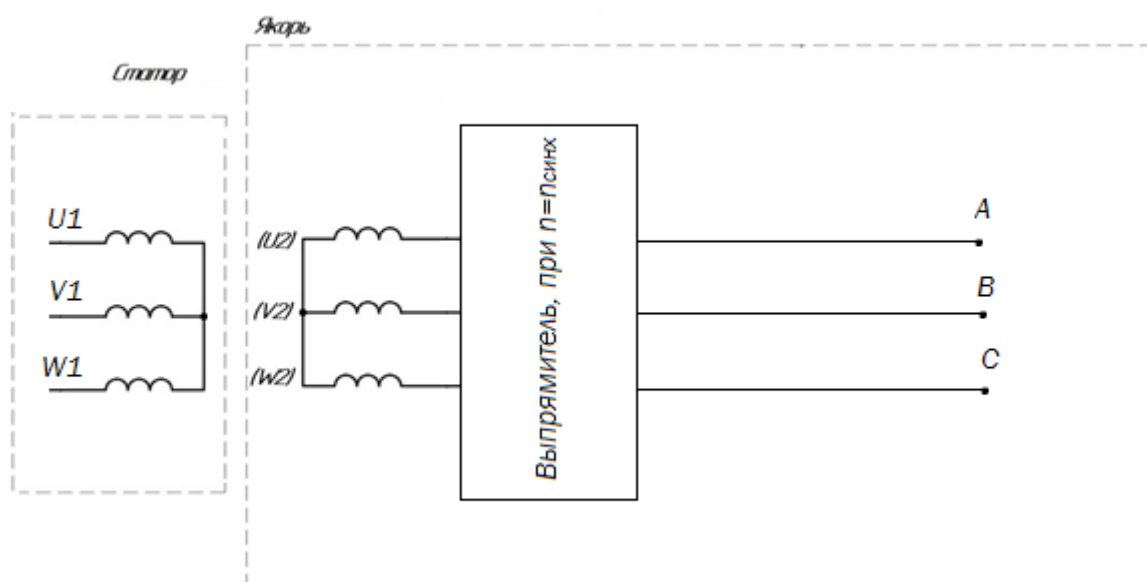


Рис. 1.2.1.2.1. Общая электрическая схема БВУ на основе АСГ

При применении любого типа БВУ необходимо понимать, что часть механической энергии, сообщаемой ротору генератора, будет уходить на преодоление тормозящего момента, создаваемого самим БВУ.

1.2.2. Установка вращающегося трансформатора

В источниках [141, 142] присутствует вариант установки вращающегося трансформатора взамен щеточно-контактного узла для АСГ.

Конструктивно предложенный вращающийся трансформатор представляет собой два металлических диска, в каждый из которых уложена однофазная обмотка. Один диск закреплен неподвижно, второй – на валу АСГ. Поскольку обмотка ротора АСГ трехфазная, то на каждую из фаз установлен свой вращающийся трансформатор. При подаче напряжения на обмотку, закрепленную на неподвижном диске, за счет гальванической развязки на обмотке, закрепленной на вращающемся диске, индуцируется напряжение той же частоты, что и на неподвижной обмотке. Общий вид АСГ с вращающимся трансформатором представлен на рисунке 1.2.2.1, общий вид вращающегося трансформатора – на рисунке 1.2.2.2, общая электрическая схема АСГ с вращающимся трансформатором – на рисунке 1.2.2.3.

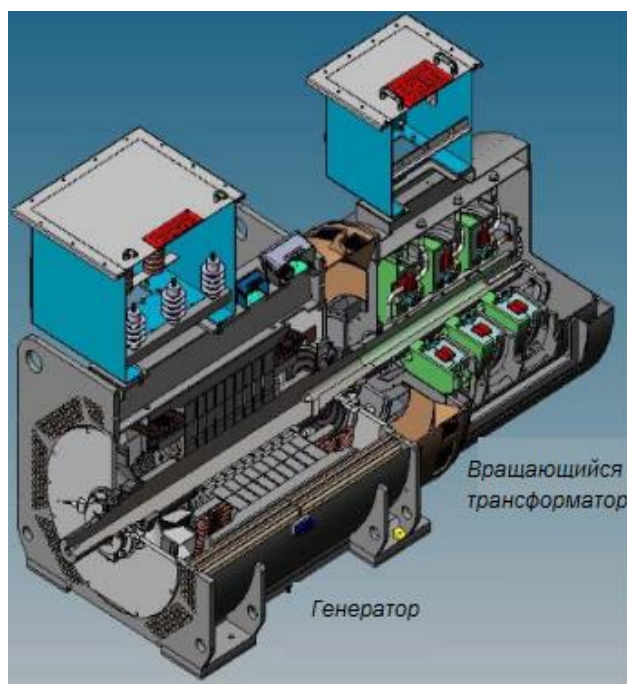


Рис. 1.2.2.1. Общий вид АСГ с вращающимся трансформатором

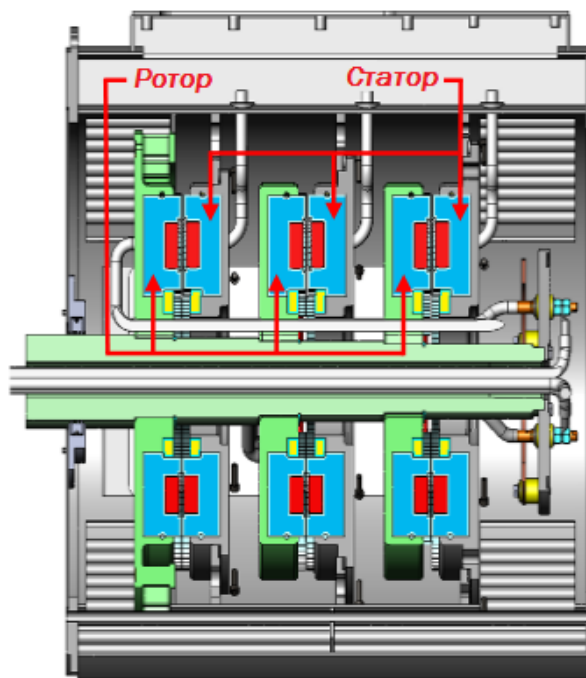


Рис. 1.2.2.2. Общий вид вращающегося трансформатора

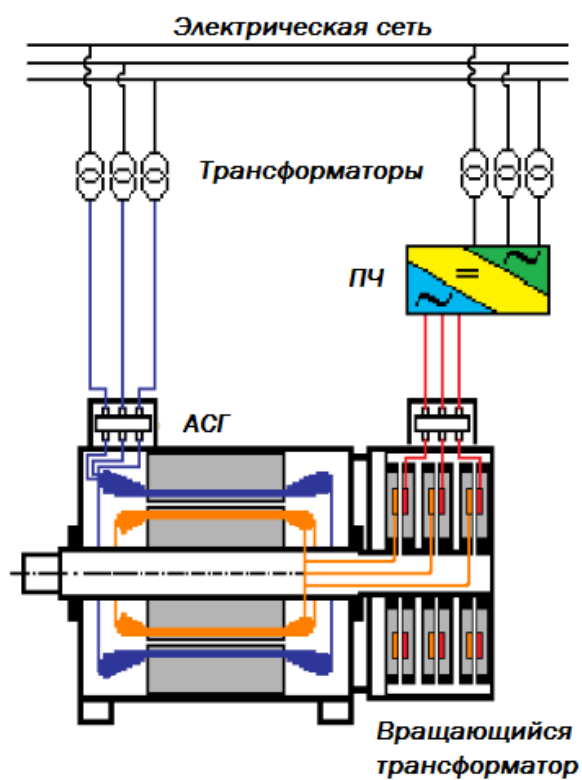


Рис. 1.2.2.3. Общая электрическая схема АСГ с вращающимся трансформатором

Данное конструктивное решение выглядит весьма привлекательным. Трансформатор, в отличие от БВУ, не создает тормозящий момент, который отбирает механическую мощность, подводимую к валу, однако появляются проблемы, связанные с наличием магнитных сил тяжения между подвижным и неподвижным дисками. Кроме этого, данный вариант имеет один существенный недостаток. При синхронной частоте вращения ротора его цепь должна питаться постоянным током, который передать через вращающийся трансформатор невозможно. Для этого режима необходимо усложнять устройство и размещать выпрямитель на вращающейся части, что практически нивелирует все преимущества данного варианта.

1.3. Использование аккумуляторной батареи для бесконтактного питания цепи ротора асинхронизированного синхронного генератора

Рассмотренные варианты в полной мере позволяют уйти от применения щеточно-контактного узла, но следует отметить, что при этом простое контактное устройство должно быть заменено сложным агрегатом, который занимает дополнительный объем, имеет большую стоимость, требует ремонта и регламентных работ.

Анализ показывает, что в качестве бесконтактного источника питания цепи ротора можно использовать аккумуляторную батарею (АКБ), если разместить ее на вращающейся части. При этом дополнительно на ротор потребуется установка электронного инвертора, преобразующего постоянное напряжение АКБ в необходимое переменное напряжение. При синхронной частоте вращения обмотку ротора можно питать постоянным током непосредственно от АКБ.

Общий вид АСГ с АКБ на роторе представлен на рисунке 1.3.1, общая электрическая схема установки – на рисунке 1.3.2.

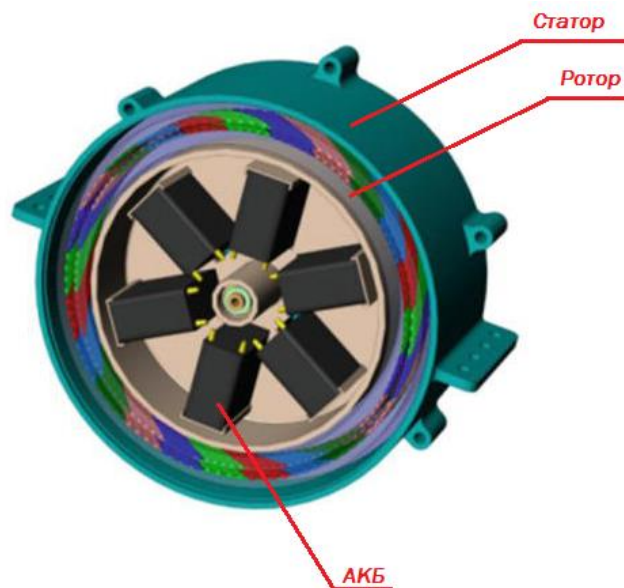


Рис. 1.3.1. Общий вид АСГ с АКБ на роторе

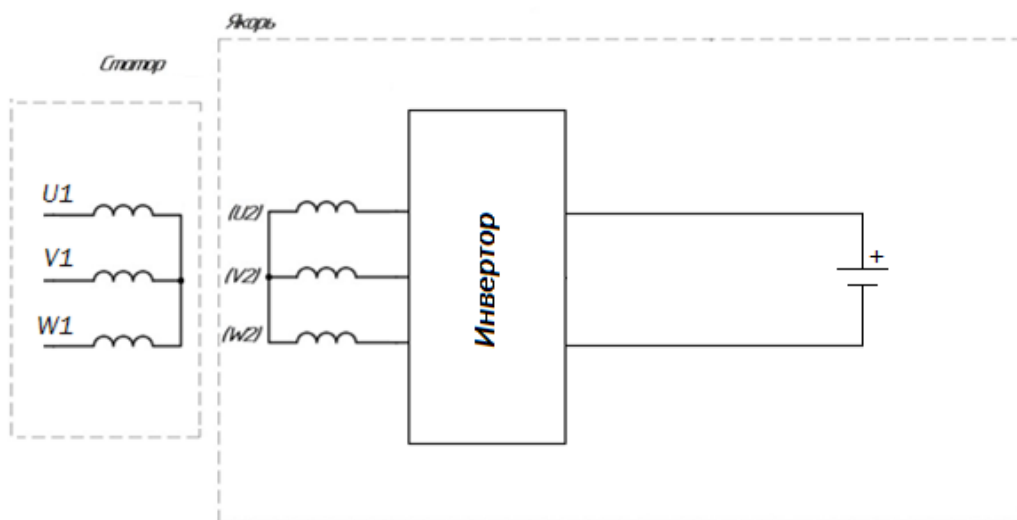


Рис. 1.3.2. Общая электрическая схема АСГ с АКБ

Данное инновационное решение позволяет преодолеть целый ряд противоречий. С одной стороны, оно упрощает систему управления за счет исключения преобразования переменного тока в постоянный. С другой стороны, АКБ можно использовать как накопитель электроэнергии. Даже при отсутствии ветра и полной остановке ротора АКБ, разряжаясь, будет генерировать энергию

в сеть, а система будет работать как преобразователь постоянного напряжения в переменное.

Данное техническое решение позволяет генератору работать как в автономном, так и в сетевом режимах, что очень важно при создании ветропарков.

Следует отметить, что емкость АКБ неограниченная. Если она полностью разрядится, то весь энергетический комплекс потеряет свою работоспособность. Следовательно, за режимом разрядки АКБ должен следовать режим ее зарядки. Такой режим у предлагаемого технического решения имеется.

На диаграмме, представленной на рисунке 1.3.3, схематично даны варианты работы АСГ в двигательном и генераторном режимах на досинхронной и сверхсинхронной частотах. Диаграмма демонстрирует направления движения энергетических потоков статора и ротора.

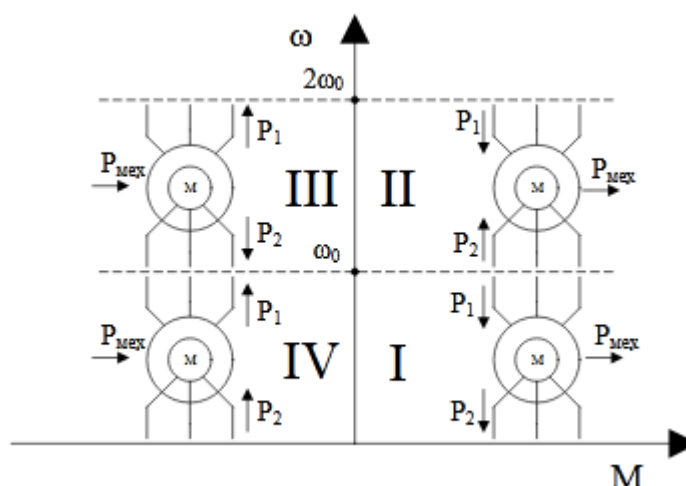


Рис. 1.3.3. Режимы работы, реализуемые в АСГ

Как видно из рисунка, в режиме генератора при скорости вращения ротора выше синхронной (сегмент III) мощность в цепи ротора АСГ меняет свое направление [56]. Это означает, что обмотка ротора начинает генерировать электрическую энергию, а не потреблять. Данный режим можно использовать для зарядки АКБ и накопления электроэнергии для ВЭУ.

Представленная концепция выглядит весьма перспективной. Она позволяет исключить щеточно-контактный узел из АСГ, а также создавать ВЭУ с накоплением электрической энергии, что очень важно для альтернативных источников, которые работают в условиях нестабильности поступления энергии.

Следует отметить, что для АКБ воздействие центробежных сил на электролит является нестандартным режимом работы и требует дополнительных исследований применения такой технологии. Кроме этого, для размещения АКБ на роторе необходим требуемый объем. По этой причине данное техническое решение первоначально следует рекомендовать для тихоходных ВЭУ с вертикальной осью вращения, которые имеют большие габариты и малые линейные скорости вращения. После опробования этой концепции на тихоходных ВЭУ и получения положительных результатов испытаний, можно предпринять попытки по ее реализации на ВЭУ с большими частотами вращения.

Современные технологии в области АКБ вполне позволяют применять данную инновационную концепцию для генераторов малой и средней мощности, а при дальнейшем развитии АКБ в части повышения удельной энергии появится возможность использовать эту концепцию и для генераторов большой мощности.

На данный момент для быстроходных ВЭУ с горизонтальной и вертикальной осью вращения следует применять вариант с БВУ или вращающимся трансформатором.

Таким образом, проведенный анализ позволяет выбрать базовый тип генератора для ВЭУ в целях дальнейшего исследования. Для тихоходных ВЭУ с вертикальной осью вращения – это АСГ с системой управления в цепи ротора, которая питается от АКБ, выполняющей функции токоподвода и накопления электроэнергии; для высокоскоростных ВЭУ с горизонтальной и вертикальной осью вращения – АСГ с БВУ или вращающимся трансформатором.

1.4. Структура проектной системы асинхронизированного синхронного генератора

Конечной целью данного исследования является разработка проектной системы АСГ. Следует отметить, что создание законченной САПР выходит далеко за рамки данной диссертации и даже за рамки научной специальности 05.09.01. Объем этой работы может выполнить только высокотехнологичное предприятие с большим штатом разных по профилю специалистов высокого уровня. Полная структура САПР включает в себя техническое, математическое, программное, информационное, лингвистическое, методическое, организационное и другие виды обеспечения [29]. В области электрических машин мировая практика не знает таких законченных систем. В наиболее полном объеме эта задача была решена при создании САПР асинхронных двигателей в процессе проектирования промышленной серии этих изделий, что потребовало колоссальных затрат и для других типов электрических машин не было повторено. Анализ научной литературы показывает, что во всем мире работы в этом направлении ведутся, но на сегодняшний день такие законченные программные продукты не коммерциализированы и приобрести их невозможно ни для машин двойного питания, ни для других типов электрических машин. Наиболее разработаны системы анализа по расчету механических напряжений, электромагнитного и теплового состояния, аэродинамики и гидродинамики. Самые распространенные программы анализа даны в приложении Г.

Программы синтеза представлены только блоками-оптимизаторами, которые реализуют различные методы перебора независимых переменных.

Тем не менее, к настоящему моменту у исследователей есть доступный набор современных, хорошо зарекомендовавших себя программных средств, использование которых дает возможность создавать проектные системы для разработки электрических машин различных классов, соединяя эти разрозненные

средства в единую проектную систему. Большое количество программных алгоритмических языков позволяют выполнить эту связку.

Задача разработчика заключается в том, чтобы придать проектной системе наибольшую гибкость, чтобы она не распадалась на отдельные части при изменении технического задания (ТЗ), при введении новых технологических или эксплуатационных ограничений, при изменении показателя качества проекта.

Анализ развития САПР показывает, что в конечном счете они нацелены на сквозную технологию, которая предполагает уменьшение бумажного документооборота, сокращение промежуточных звеньев проектирования, уменьшение количества разработчиков в проекте.

Создавая современные проектные системы или ее части, необходимо ориентироваться на эти тенденции.

Укрупненная структура сквозного проектирования АСГ показана на рисунке 1.4.1.



Рис. 1.4.1. Структура сквозного проектирования АСГ

В данной работе предпринята попытка разработать подсистему синтеза АСГ, обеспечивающую нахождение оптимальной геометрии, и подсистему анализа АСГ, определяющую его электромагнитное и тепловое состояние. В перспективе эти блоки должны составить элементы полной проектной системы

сквозной технологии проектирования АСГ. Поскольку приобрести готовый продукт такой проектной системы невозможно, его надо разрабатывать.

Выводы по главе

1. Главная проблема ветроэнергетики – это преобразование электрической энергии с нестандартными параметрами в электрическую энергию со стандартными параметрами по частоте, амплитуде и фазе при изменении направления и интенсивности ветрового потока. Эта генерация должна осуществляться при минимальном числе ступеней преобразования с максимально возможным КПД.

2. Из множества возможных типов генераторов для ВЭУ наилучшим является асинхронизированный синхронный генератор (машина двойного питания). Он позволяет без дополнительных ступеней преобразования непосредственно генерировать стандартную энергию при изменении частоты вращения ротора в широком диапазоне от 0 до сверхсинхронной скорости, что обеспечивает высокий КПД преобразования. При этом АСГ не потребляет реактивную энергию из сети и сам может быть источником реактивной мощности. Преобразование идет по цепи возбуждения, что позволяет снизить габариты и стоимость электронного оборудования.

3. Для обеспечения бесконтактного токоподвода к цепи ротора для тихоходных ВЭУ с вертикальной осью вращения принято техническое решение по размещению аккумуляторной батареи на вращающейся части. Это позволило упростить систему управления, исключив блок преобразования переменного напряжения в постоянный, и ввести функцию накопления электроэнергии, важную для альтернативных источников, работающих в режиме неустойчивости. В зависимости от частоты вращения АКБ работает в режиме разрядки и зарядки (накопления). Для быстроходных ВЭУ с вертикальной и горизонтальной осью вращения для токоподвода к ротору принят вариант с БВУ или трансформатором вращения.

2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО РАСЧЕТА АСИНХРОНИЗИРОВАННОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ЕГО ГЕОМЕТРИИ

Вводные замечания

Конструктивно АСГ представляет собой асинхронную машину с фазным ротором. Проектирование этого класса электрических машин достаточно хорошо представлено в отечественной и зарубежной литературе [33, 42, 69], однако в большинстве своем рассмотрены вопросы расчета асинхронных двигателей малой и средней мощности. В свою очередь вопросы проектирования АСГ большой мощности, которые работают составе ВЭУ в различных режимах, недостаточно широко раскрыты и практически не представлены в отечественных и зарубежных источниках.

При проектировании АСГ большой мощности необходимо учитывать проблемы, связанные со спецификой работы ВЭУ и конструктивными особенностями машин большой мощности.

1. ВЭУ приходится работать при переменной скорости вращения ротора. В связи с этим генератор необходимо проектировать на определенный рабочий диапазон скорости вращения ротора, а не на одну фиксированную скорость.

2. В большинстве современных ВЭУ используется редукторная компоновка. Применение редуктора (мультипликатора) позволяет снизить габариты электрической машины, но увеличивает рабочую скорость вращения генератора. Таким образом, в настоящее время в ВЭУ применяются генераторы с синхронными скоростями вращения 1 000, 1 500 и 3 000 об/мин.

3. Электрические машины большой мощности обладают крупным и массивным ротором, из-за чего появляются проблемы, связанные с наличием критических частот вращения. Длительная работа генератора на критической скорости вращения приведет к быстрому выходу из строя подшипников и мультипликатора.

Совокупность всех трех вышеперечисленных факторов указывает на необходимость учета при электромагнитном расчете генератора условий по механической стабильности ротора.

Разработка электрических машин большой мощности требует значительных капитальных затрат. Поэтому в условиях рыночной экономики малое количество предприятий может позволить себе вести разработку по традиционной схеме: создание и исследование макетного образца, производство опытного образца и последующая постановка изделия на серийное производство. Развитие вычислительной техники дает возможность значительно снизить большинство рисков еще на этапе расчета электрической машины и создать цифровой двойник для проверки работоспособности изделия. Для этого необходимо сделать проектную систему, сочетающую в себе подсистему синтеза оптимальной геометрии и подсистему анализа полученной электронной модели.

Подсистема синтеза создается за счет построения математической модели и подключения к ней метода нелинейного программирования для перебора вариантов и выбора оптимального варианта по заданному критерию.

Подсистему анализа можно выстроить с помощью проверенных программных инструментов, таких как Ansys Electronics Desktop, Matlab Simulink и т. д.

Разбиение проектной системы на две подсистемы обусловлено тем, что подсистема синтеза проектных решений должна реализовывать оптимизационные расчеты, которые предполагают большое количество итераций. При каждой итерации происходит новый расчет по всему алгоритму математической модели. В зависимости от выбранного метода оптимизации количество циклов может быть десятки и сотни тысяч. Это требует больших компьютерных ресурсов и длительного времени расчета. В связи с этим математическая модель для подсистемы синтеза должна быть весьма проста, что в свою очередь может сказаться на точности расчетов [65, 66]. Принимая это во внимание, в состав

проектной системы включают подсистему анализа, которая при помощи достаточно точных методов позволяет производить анализ электромагнитного и теплового состояния варианта, рассчитанного системой синтеза, и при необходимости вносить корректировки в конструкцию.

Далее приведены последовательные шаги по разработке проектной системы и, в частности, по созданию математической модели синтеза оптимальной геометрии.

2.1. Разработка математической модели расчета максимальных габаритов ротора при обеспечении отсутствия критических частот в рабочем диапазоне скоростей вращения

Как уже было сказано выше, электрические машины большой мощности обладают крупными и массивными роторами. При проектировании генератора большой мощности, к тому же работающего не на одной номинальной скорости вращения, а в широком диапазоне, обеспечение отсутствия критических частот в рабочем диапазоне имеет большее значение, чем электромагнитные характеристики генератора, поэтому в данной работе необходимо спроектировать магнитную систему генератора под требуемые параметры механической стабильности ротора. Это обстоятельство следует учесть при разработке методики электромагнитного расчета АСГ.

Анализ литературы по данному вопросу показал, что имеются расчетные аналитические методики определения критических частот ротора [76], однако они являются поверочными для уже спроектированных роторов. Их можно применить для анализа механической стабильности спроектированного ротора АСГ, но подобный анализ возможен только на завершающем этапе расчета. В случае попадания критической частоты в рабочий диапазон скоростей вращения электромагнитный расчет придется проводить заново с внесением конструктивных изменений. Таким образом, при проведении оптимизационных

расчетов геометрии электрической машины в качестве одного из условий оптимальности можно задать отсутствие критических частот, но в связи с объемностью методики ее включение в математическую модель электромагнитного расчета приведет к усложнению последней и, как следствие, к увеличению времени расчета. Поэтому предложен иной подход к порядку проектирования, согласно которому сначала определяется наружный диаметр и максимальная длина активной части ротора, а потом эти результаты переносятся в математическую модель электромагнитного расчета.

Методика и математическая модель базируются на том, что ротор АСГ изначально рассматривается упрощенно и представляет собой цилиндрическую форму, состоящую из трех участков. Пример рассматриваемого эскиза ротора представлен на рисунке 2.1.1.

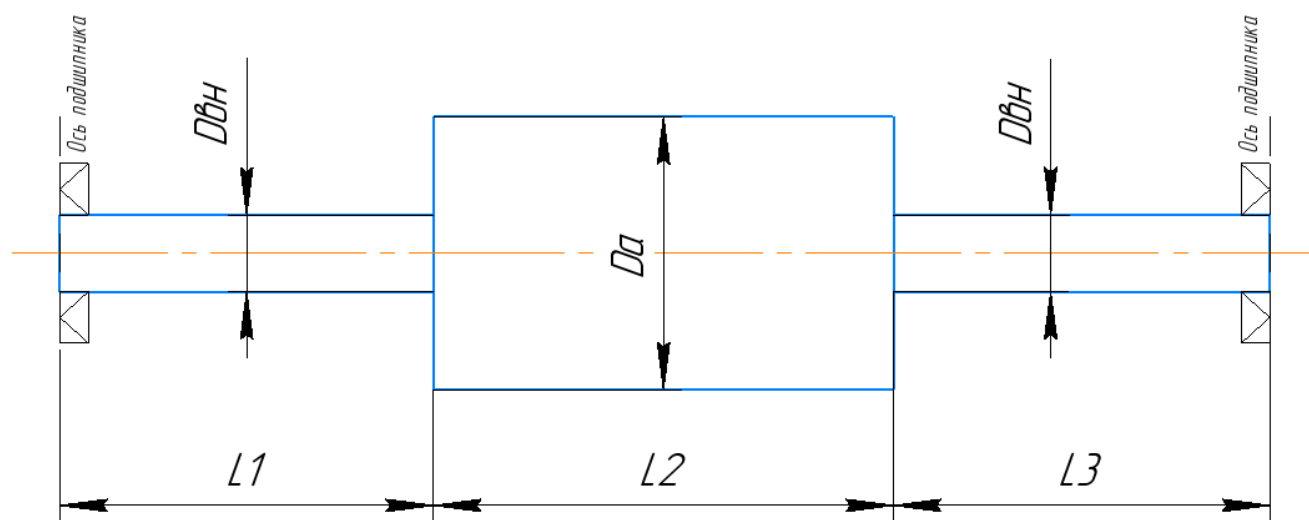


Рис. 2.1.1. Эскиз ротора АСГ

Полагаем, что перед началом расчета из ТЗ на генератор нам известна его номинальная мощность, синхронная скорость вращения ротора и его максимальная скорость вращения. Также, исходя из практики проектирования электрических машин, можно задаться расстоянием от торцевой поверхности сердечника ротора с обмоткой до оси подшипников (размеры $L1$ и $L3$ на рисунке 2.1.1).

Длина сердечника с обмоткой (размер L2 на рисунке 2.1.1) в данном расчете выступает в роли переменной и задается в виде ограниченного диапазона.

Далее последовательно производится расчет параметров, представленных ниже. Внутренний диаметр сердечника ротора (м) исходя из условия прочности вала при приложении крутящего момента:

$$D_{BH} = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot \frac{\varepsilon \cdot P}{n \cdot \frac{2\pi}{60}}}{\pi \cdot [\tau]}}, \quad (2.1)$$

где P – номинальная мощность генератора (Вт); n – синхронная скорость вращения генератора (об/мин); ε – коэффициент, учитывающий необходимый запас прочности и перегрузку генератора; $[\tau]$ – допустимое напряжение материала при кручении (Па).

Наружный диаметр ротора (м) исходя из условия прочности при действии центробежных сил:

$$D_a = \sqrt{\frac{[\sigma] - 304.5 \cdot D_{BH}^2 \cdot \left(\frac{n_{max} \cdot 2\pi}{60}\right)^2}{1606 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n_{max}}{60}\right)^2}}, \quad (2.2)$$

где n_{max} – максимальная скорость вращения генератора (об/мин); $[\sigma]$ – допустимое напряжение материала при растяжении (Па).

Общая длина ротора между осями подшипников (м):

$$L_s = L_1 + L_2 + L_3, \quad (2.3)$$

где L_1 – длина первого участка ротора (м); L_2 – длина второго участка ротора (м); L_3 – длина третьего участка ротора (м).

Масса каждого участка ротор (кг):

$$m_i = \pi \cdot \left(\frac{D_i}{2}\right)^2 \cdot L_i \cdot \rho_i, \quad (2.4)$$

где i – номер участка ротора; D_i – наружный диаметр ротора на данном участке (м); L_i – длина участка ротора (м); ρ_i – плотность материала участка ротора (кг/м³). Плотность материала первого и третьего участка ротора принимается равной плотности стали. Плотность третьего участка ротора принимается на 20% меньше плотности стали. Данная поправка вводится с целью учёта сложной геометрии активных частей, а именно наличия вентиляционных каналов в объёме бочки ротора и свободного пространства под лобовыми частями обмотки.

Погонная масса участка (кг/м):

$$q_i = \frac{m_i}{L_i}, \quad (2.5)$$

Момент инерции участка (м⁴):

$$J_i = \frac{\pi \cdot D_i^4}{64}, \quad (2.6)$$

Координата конца каждого участка (м):

$$b_i = \sum_{i=1}^i l_i, \quad (2.7)$$

Отношение координаты конца участка к длине ротора:

$$x_i = \frac{b_i}{L_s}, \quad (2.8)$$

Вспомогательная функция:

$$\Phi_i = x_i - \frac{\sin(2 \cdot \pi \cdot x_i)}{2 \cdot \pi}, \quad (2.9)$$

Приращение вспомогательной функции:

$$\Delta_i = \Phi_i - \Phi_{i-1}, \quad (2.10)$$

Сумма произведения приращения вспомогательной функции и погонной массы всех участков:

$$u = \sum_{i=1}^3 \Delta_i \cdot q_i, \quad (2.11)$$

Сумма частного приращения вспомогательной функции к моменту инерции всех участков:

$$y = \sum_{i=1}^3 \frac{\Delta_i}{J_i}, \quad (2.12)$$

Первая критическая частота вращения (об/мин):

$$n_{k1} = \frac{\pi^2 \cdot 60}{2\pi \cdot L_s^2} \cdot \sqrt{g \cdot E \cdot \frac{1}{u \cdot y}} = \frac{1.352 \cdot 10^6}{L_s^2 \cdot \sqrt{u \cdot y}}, \quad (2.13)$$

где g – ускорение свободного падения (м/с^2), E – модуль упругости стали (Па).

В результате расчёта получается зависимость значения первой критической частоты ротора от его активной части. Пример зависимости для ротора, имеющего размеры $L_1 = L_3 = 0,5$ м, $D_a = 0,808$ м, $D_{\text{вн}} = 0,2$ м, представлен на рисунке 2.1.2.

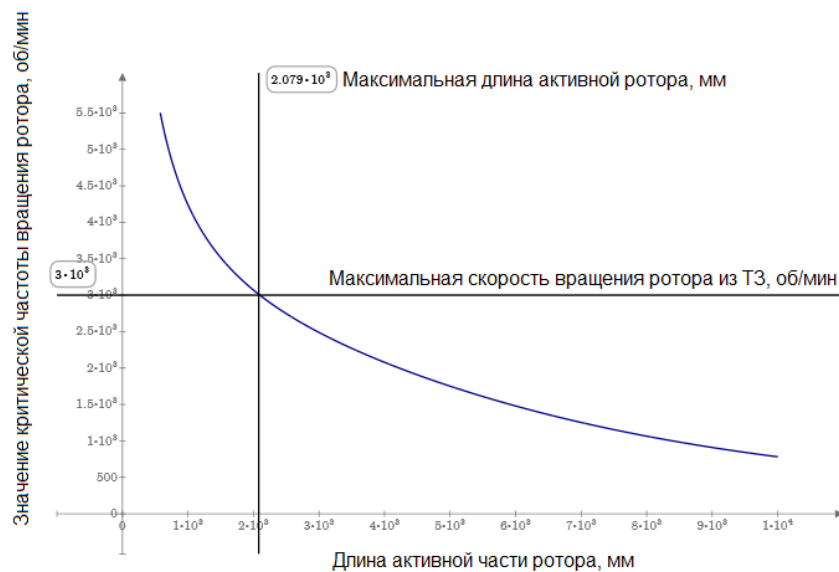


Рис. 2.1.2. Зависимость значений первой критической частоты вращения ротора от длины его активной части

Из представленной зависимости видно, что значение первой критической частоты вращения ротора стремительно уменьшается при увеличении длины активной части. Таким образом, зная максимальную скорость вращения ротора из данных ТЗ, можно определить максимальную длину активной части ротора и применить это значение в виде ограничения при оптимизационном электромагнитном расчете.

Представленная математическая модель дает возможность связать параметры механической стабильности ротора и электромагнитные параметры. Отличие данной модели от существующих методик заключается в том, что она позволяет производить не анализ проектных решений, а является методикой синтеза проектных решений.

2.2. Разработка математической модели электромагнитного расчета асинхронизированного синхронного генератора

Математическая модель электромагнитного расчета – это совокупность аналитических зависимостей, однозначно определяющих геометрию электрической машины, ее параметры и электромагнитные характеристики. Как уже было сказано во вводных замечаниях к данной главе, математическая модель системы синтеза будет участвовать в оптимизационных расчетах, которые предполагают большое количество итераций. Поэтому с целью достижения приемлемого времени оптимизации математическая модель изначально должна быть максимально упрощена, но при этом обеспечивать достаточную точность.

В общем случае математическая модель должна иметь входные параметры, которые задаются для расчетных уравнений, и выходные параметры, которые получаются в результате расчета [45].

Входные параметры можно разделить на три независимые группы.

1. Константы. Это заданные величины, которые не меняются для данной проектной ситуации. Как правило, это исходные данные ТЗ на проектирование

(номинальная мощность, номинальное напряжение, номинальная частота вращения и т. д.) и физические постоянные.

2. Ограничения. Это параметры, которые нельзя нарушать. Ограничения могут быть технологического характера (максимальный коэффициент заполнения паза, минимальная ширина зубца и т. д.) или физического характера (максимальная плотность тока в обмотке, максимальная индукция на участке и т. д.).

3. Независимые переменные. Это параметры, которые могут варьироваться независимо друг от друга в допустимых пределах. Для оптимизации геометрии электрической машины это, как правило, геометрические размеры элементов магнитопровода.

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. Общая структура математической модели для оптимизационных расчетов представлена на рисунке 2.2.1.



Рис. 2.2.1. Общая структура математической модели для оптимизационных расчётов

Далее представлен подробный подбор констант, ограничений, независимых переменных и выходных параметров для математической модели электромагнитного расчёта АСГ.

2.2.1. Входные параметры математической модели

В качестве входных параметров принимаются следующие величины:

2.2.1.1. Константы

Данные технического задания:

- номинальная выходная мощность P_n (Вт);
- синхронная частота вращения n (об/мин);
- максимальная частота вращения n_{max} (об/мин);
- номинальное фазное напряжение U_n (В);
- число фаз m ;
- частота питающего напряжения f (Гц);
- схема соединения статора и ротора обмоток (треугольник или звезда);
- требуемый КПД η ;
- требуемый коэффициент мощности $\cos \varphi$;
- воздушный зазор δ (м);
- число пазов на полюс и фазу обмотки статора q_{stator} ;
- число пазов на полюс и фазу обмотки ротора q_{rotor} ;
- обмоточный коэффициент статора k_{ob} ;
- количество параллельных ветвей обмотки ротора a_r ;
- количество эффективных проводников обмотки ротора u_r ;
- механические потери P_{meh} (Вт);

– размеры изоляции (толщина изоляции элементарного проводника, толщина витковой изоляции, толщина корпусной изоляции);

– рабочая температура обмотки t_{rab} ($^{\circ}\text{C}$);

– расстояние от активных частей ротора до оси подшипников L_1 и L_3 (м);

– индукция в воздушном зазоре B_{δ} (Тл);

– толщина крайнего нажимного кольца сердечника l_{krs} (м);

– ширина радиального вентиляционного канала b_k (м);

– толщина субпакета магнитопровода l_{pak} (м);

Физические постоянные:

– коэффициент формы поля k_B ;

– коэффициент заполнения пакета сталью k_c ;

– коэффициент полюсной дуги α ;

– удельное сопротивление меди ρ_{copper} ;

– характеристика электротехнической стали (кривая намагничивания, удельные потери, допустимые механические напряжения).

2.2.1.2. Ограничения

Технологические ограничения:

– коэффициент заполнения паза статора $k_{z\ stator}$;

– коэффициент заполнения паза ротора $k_{z\ rotor}$;

Физические ограничения:

– максимальная плотность тока в обмотке статора J_{stator} (А/мм²);

– максимальная плотность тока в обмотке ротора J_{rotora} (А/мм²);

– максимальная индукция в зубце статора $B_{z\ stator}$ (Тл);

– максимальная индукция в зубце ротора $B_{z\ rotor}$ (Тл);

– максимальная индукция в спинке статора $B_{j\ stator}$ (Тл);

– максимальная индукция в спинке ротора $B_{j\ rotor}$ (Тл);

– максимальный ток в параллельной ветви обмотки статора $I_{\max\ par}$ (А);

В зависимости от используемых материалов и технологических возможностей ограничения могут меняться.

2.2.1.3. Независимые переменные

Выбор независимых переменных – это один из самых важных вопросов построения математической модели, поскольку они совместно с константами должны полностью определять вариант проектируемого изделия [52, 53], от качественных характеристик выбранных переменных зависит работоспособность и точность математической модели. В связи с этим сформулируем перечень характеристик, которыми должны обладать независимые переменные в математической модели, участвующей в оптимизационных расчетах [98].

1. Переменные должны иметь наглядный и понятный физический смысл.
2. Переменные должны быть эффективными, то есть за минимальное количество итераций приблизить расчет к наилучшему результату.
3. Оптимум должен лежать не на границе. Если оптимум окажется на границе, это сузит применение градиентных методов оптимизации.
4. Переменные должны иметь четкие пределы изменения, поскольку блок-оптимизатор не может перебирать бесконечное множество вариантов.

Логично, что в качестве независимых переменных для электромагнитного расчета можно взять размеры, определяющие геометрию магнитопровода АСГ, например, высоту и ширину паза статора и ротора, наружный и внутренний диаметры ротора, наружный и внутренний диаметры статора. Однако применение геометрических размеров в качестве переменных не в полной мере удовлетворяет перечню приведенных выше характеристик, поскольку они не имеют четких границ изменения, которые, конечно, можно определить вручную, но в таком случае появляется вероятность, что оптимум окажется на границе.

Также нужно отметить, что анализ характеристик электрических машин показывает: энергоэффективность и удельные энергетические показатели зависят

в меньшей степени от конкретных линейных размеров, таких как высота и ширина паза, размер спинки статора и индуктора, ширина открытия паза. В большей степени энергетика машины зависит от соотношения площадей активных зон, например, от отношения площади поперечного сечения якоря к площади поперечного сечения всего двигателя, от отношения площадей пазово-зубцовой зоны к площади якоря и т. д. Выбор этих относительных параметров в качестве независимых переменных очень удобен. Они имеют четкие границы изменения от 0 до 1, показывают наилучшее соотношение активных зон, участвующих в преобразовании энергии, их оптимальные значения колеблются в небольшом диапазоне при изменении габаритов в широких пределах. В связи с этим в данной работе было решено отказаться от применения геометрических размеров магнитопровода в качестве переменных в пользу соотношения площадей активных зон.

Сама идея использования данных относительных параметров в качестве независимых переменных не нова. Она была применена для синтеза тяговых электродвигателей подвижного состава [51], а впоследствии для разработки методики проектирования вентильных моментных двигателей постоянного тока [26], однако для АСГ эта методика ранее не использовалась. Назовем эти переменные термином «обобщенные переменные», который отражает их физическую сущность, и определим их для АСГ.

Для АСГ удобно выделить шесть обобщенных переменных [92].

1. Переменная f_s – показывает, какую часть от площади поперечного сечения электрической машины занимают активные части электрической машины (рисунок 2.2.1.3.1).

$$f_s = \frac{S_{\text{кольца}}}{S_{\text{круга}}} = \frac{S_{\text{поп.сеч.маш}}}{S_{\text{поп.сеч}}}, \quad (2.14)$$

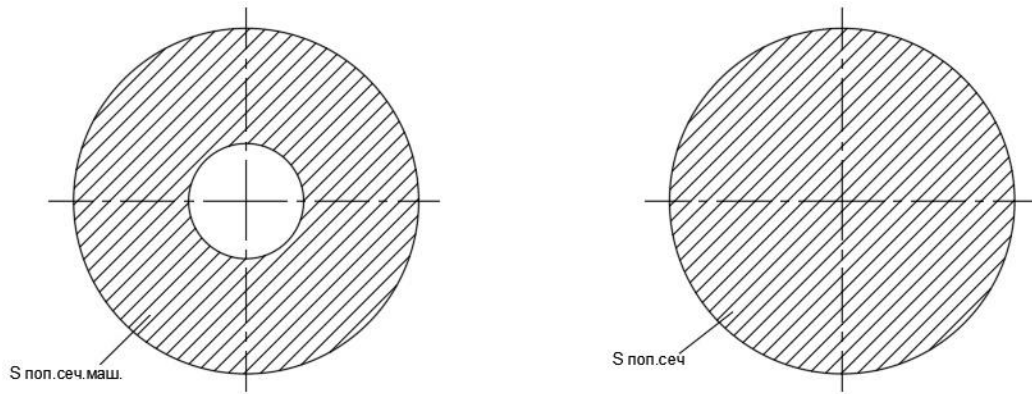


Рис. 2.2.1.3.1. Переменная f_s

2. Переменная f_a – отражает отношение площади поверхности, занимаемой ротором, к площади поверхности, которую занимают активные части машины (рисунок 2.2.1.3.2).

$$f_a = \frac{S_{\text{ротора}}}{S_{\text{поп.сеч.маш.}}}, \quad (2.15)$$

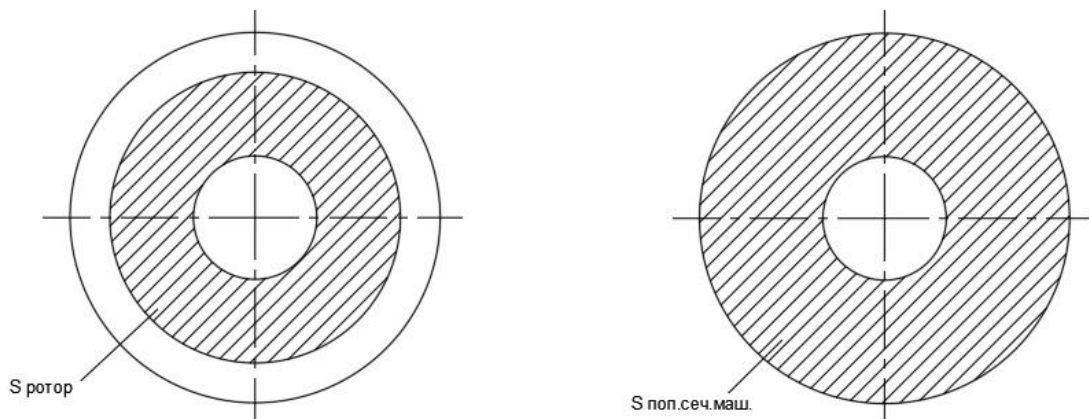


Рис. 2.2.1.3.2. Переменная f_a

3. Переменная f_{er} – показывает отношение площади поверхности пазово-зубцового слоя ротора к площади поверхности, которую занимает сам ротор (рисунок 2.2.1.3.3).

$$f_{er} = \frac{S_{\text{паз.зубц.слой ротора}}}{S_{\text{ротора}}}, \quad (2.16)$$

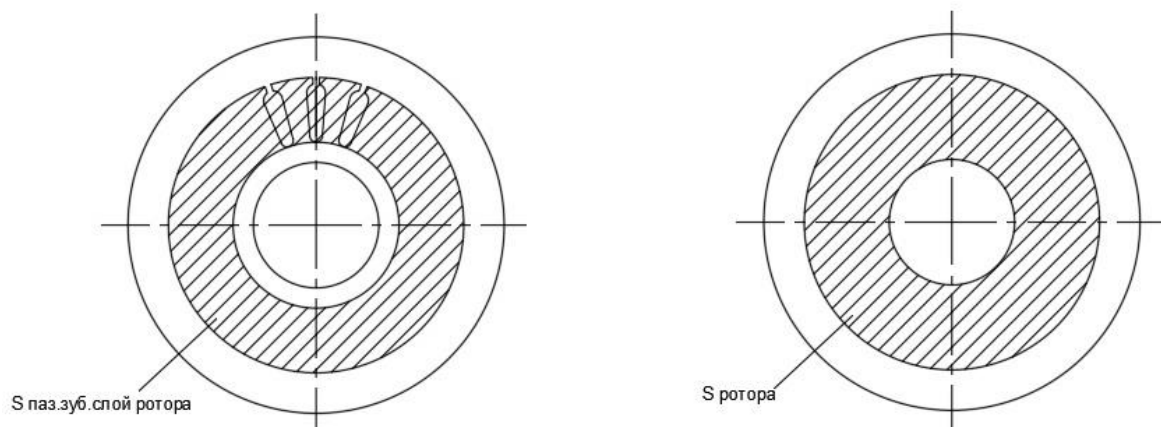


Рис. 2.2.1.3.3. Переменная f_{er}

4. Переменная f_{zr} – отражает отношение площади поверхности, занимаемой пазами ротора, к площади поверхности, которую занимает пазово-зубцовый слой ротора (рисунок 2.2.1.3.4).

$$f_{zr} = \frac{S_{\text{пазов ротора}}}{S_{\text{паз.зубц.слой ротора}}}, \quad (2.17)$$

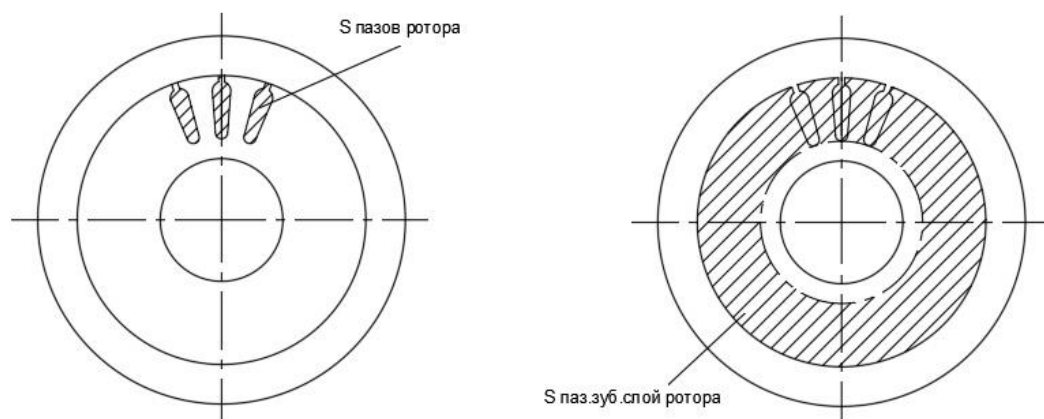


Рис. 2.2.1.3.4. Переменная f_{zr}

5. Переменная f_{es} – показывает отношение площади поверхности пазово-зубцового слоя статора к площади поверхности, которую занимает сам статор (рисунок 2.2.1.3.5).

$$f_{es} = \frac{S_{\text{паз.зубц.слоя статора}}}{S_{\text{статора}}}, \quad (2.18)$$

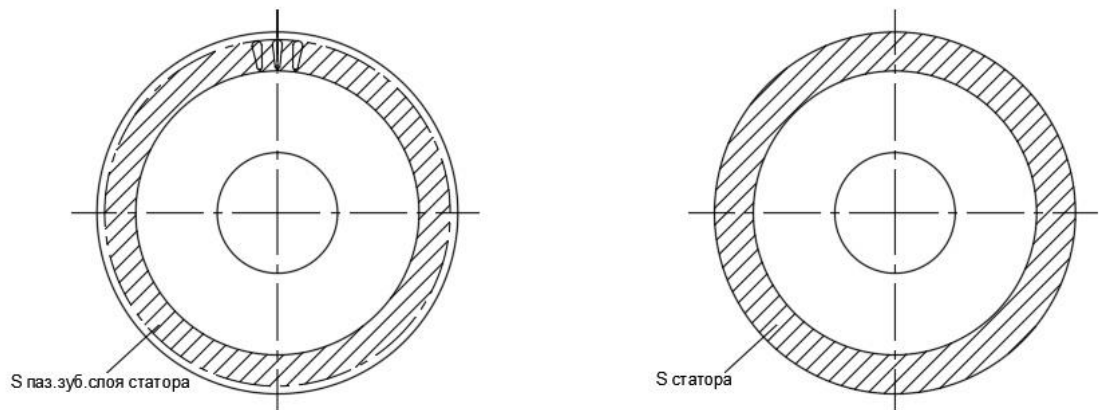


Рис. 2.2.1.3.5. Переменная f_{es}

6. Переменная f_{zs} – отражает отношение площади поверхности, занимаемой пазами статора, к площади поверхности, которую занимает пазово-зубцовый слой статора (рисунок 2.2.1.3.6).

$$f_{zs} = \frac{S_{\text{пазов статора}}}{S_{\text{паз.зубц.слоя статора}}}, \quad (2.19)$$

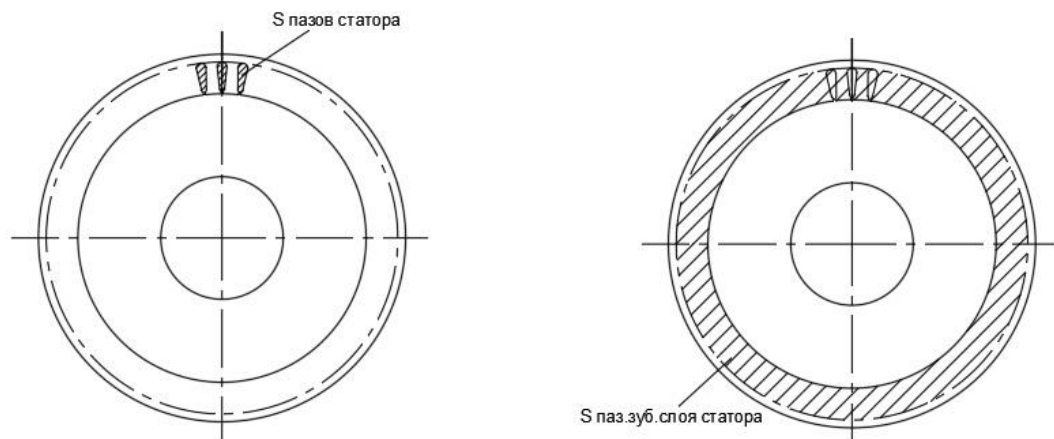


Рис. 2.2.1.3.6. Переменная f_{zs}

Как видно из представленных на рисунках соотношений, обобщенные переменные обладают всеми необходимыми качественными характеристиками

для применения их в качестве независимых переменных в оптимизационных расчетах. Они наглядны и имеют ясный физический смысл. Четко видно, что при выводе каждой последующей переменной используются площади взаимосвязанных участков, таким образом, диапазон изменения каждой обобщенной переменной строго ограничен в пределах $[0;1]$, а также оптимальное значение данных переменных никогда не будет лежать на границе указанного диапазона.

Дополнительно в виде переменной задается длина магнитопровода электрической машины. С помощью механического расчета по методике согласно параграфу 2.1 главы 2 определяются границы изменения данной переменной. Таким образом, организуется взаимосвязь решения задачи исключения критических частот и оптимизационного электромагнитного расчета.

2.2.2. Выходные параметры математической модели

Поскольку решается задача оптимизации, то выходными параметрами математической модели должны быть критерии оптимальности. В дальнейшем будет рассмотрена однокритериальная оптимизация, то есть в качестве критерия качества будет выбираться только один параметр. Критерий оптимальности зависит от конкретной проектной ситуации, поэтому он может меняться. Проектная система должна обеспечивать достаточную гибкость для удобства расчетчика, поэтому математической модели необходимо включать в себя по возможности наибольшее количество критериев оптимальности.

Выбор критерия оптимальности ориентирован на приоритетность технических требований к устройству. Очевидно, что для ВЭУ большой мощности приоритетом является энергоэффективность, то есть максимальный КПД и минимальная себестоимость.

КПД является общей оценкой генератора, наиболее близкой к экономическому критерию и, в частности, к энергоэффективности генератора.

Выбор КПД в качестве критерия оптимальности достаточно сложен, поскольку КПД электрической машины имеет связи с габаритами активных частей. По этой причине в практике оптимизации электрических машин принято задавать КПД не как критерий оптимальности, а как ограничение, за пределами которого полученные варианты не рассматриваются. На основании изложенного в разрабатываемую математическую модель включены следующие показатели качества, которые являются ее выходными параметрами:

- масса активных частей (масса железа статора + масса железа ротора + масса обмотки статора + масса обмотки ротора) (кг) – для решения задач габаритной оптимизации любого рода;

- генерируемая мощность (Вт) – для решения задачи оптимизации в заданных габаритах.

2.3. Уравнения связи элементов магнитопровода асинхронизированного синхронного генератора и обобщённых переменных

Конструктивно магнитопровод АСГ состоит из зубчатого статора и зубчатого ротора. В машинах мощностью более 100 кВт для придания катушкам большей механической прочности их выполняют из прямоугольного провода [38, 42], поэтому пазы статора и ротора выполняют прямоугольной формы. Таким образом, для машин с внутренним ротором, изначально задавшись наружным диаметром статора, определив величину воздушного зазора и число пазов статора и ротора, все геометрические размеры элементов магнитопровода рассматриваемых АСГ можно выразить следующим образом (рисунок 2.3.1).

Внутренний диаметр сердечника ротора (м):

$$D_{\text{вн}} = D_{\text{н}} \cdot \sqrt{1 - f_s}, \quad (2.20)$$

где $D_{\text{н}}$ – наружный диаметр статора генератора (м).

Наружный диаметр ротора (м):

$$D_a = D_H \cdot \sqrt{1 - f_s + f_a \cdot f_s}, \quad (2.21)$$

Высота паза ротора (м):

$$h_{zr} = 0,5 \cdot D_H \cdot (\sqrt{1 - f_s + f_a \cdot f_s} - \sqrt{1 - f_s - f_a \cdot f_{er} \cdot f_s + f_a \cdot f_s}), \quad (2.22)$$

Ширина паза ротора (м):

$$b_{zr} = \frac{\pi \cdot D_H \cdot f_{zr}}{2 \times z_p} \cdot (\sqrt{1 - f_s + f_a \cdot f_s} + \sqrt{1 - f_s - f_a \cdot f_{er} \cdot f_s + f_a \cdot f_s}), \quad (2.23)$$

где z_p – число пазов ротора.

Высота паза статора (м):

$$h_{zs} = 0,5 \cdot (\sqrt{f_{es} \cdot D_H^2 - (D_a + 2 \cdot \delta)^2} \times (f_{es} - 1) - D_a - 2 \cdot \delta), \quad (2.24)$$

где δ – величина воздушного зазора (м).

Ширина паза статора (м):

$$b_{zs} = \frac{f_{zs} \cdot f_{es} \cdot \pi \cdot (D_H^2 - (D_a + 2 \cdot \delta)^2)}{4 \cdot z_s \cdot h_{zs}}, \quad (2.25)$$

где z_s - количество зубцов статора.

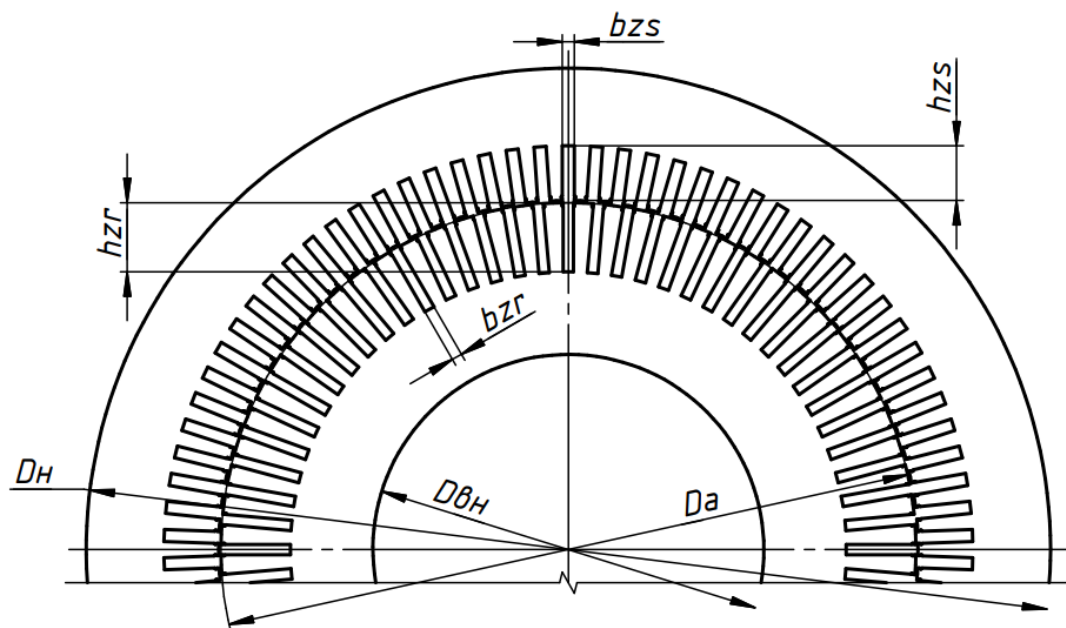


Рис. 2.3.1. Эскиз поперечного сечения магнитопровода АСГ

Для АСГ обращенной конструкции данные уравнения связи также актуальны с учетом одностипности статора и ротора. Таким образом, по уравнению (2.20) определяется внутренний диаметр статора, по уравнению (2.21) – наружный диаметр статора, по уравнению (2.22) – высота паза статора, по уравнению (2.23) – ширина паза статора, по уравнению (2.24) – высота паза ротора, по уравнению (2.25) – ширина паза ротора.

Разрабатываемая математическая модель синтеза предполагает, что на начальном этапе производится механический расчет по методике согласно параграфу 2.2 главы 2. По его результатам будет определен наружный и внутренний диаметр ротора. Учитывая данную особенность в расчете, можно сократить количество обобщенных переменных до четырех, применив аналогичный прием, но отсекая в рассматриваемой площади поперечного сечения спинку статора. Таким образом, в расчете останутся три переменные, выведенные ранее, – f_{zs} , f_{er} , f_{zr} , а также появится одна новая переменная.

Переменная f_{es1} – показывает, какую часть от общей площади поперечного сечения электрической машины занимают ротор и вал, исключая спинку статора (рисунок 2.3.2).

$$f_{es1} = \frac{S_{\text{ротора и вала}}}{S_{\text{поп.сеч}}}, \quad (2.26)$$

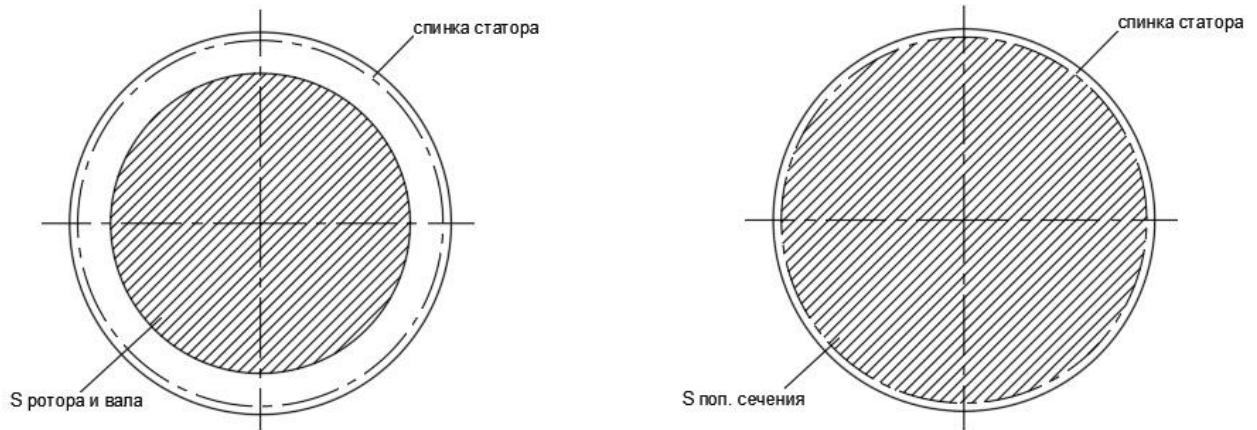


Рис. 2.3.2. Переменная f_{es1}

Таким образом, для машин с внутренним ротором уравнения связи примут следующий вид:

Высота паза статора (м):

$$h_{zs} = \sqrt{\frac{\left(\frac{D_a}{2}\right)^2}{f_{es1}}} - \frac{D_a}{2} - \delta, \quad (2.27)$$

Ширина паза статора (м):

$$b_{zs} = \frac{f_{zs} \cdot \left(\pi \cdot \frac{\left(\frac{D_a}{2}\right)^2}{f_{es1}} - \pi \cdot \left(\frac{D_a}{2} + \delta\right)^2 \right)}{z_s \cdot h_{zs}}, \quad (2.28)$$

Высота паза ротора (м):

$$h_{zr} = \frac{D_a}{2} - \sqrt{\left(\frac{D_a}{2}\right)^2 - f_{er} \cdot \left(\left(\frac{D_a}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_{BH}}{2}\right)^2 \right)}, \quad (2.29)$$

Ширина паза ротора (м):

$$b_{zr} = \frac{f_{zr} \cdot (\pi \cdot (\frac{D_a}{2})^2 - \pi \cdot (\frac{D_a - 2 \cdot h_{zr}}{2})^2)}{z_p \cdot h_{zr}}, \quad (2.30)$$

Высота спинки статора определяется под заданную величину магнитной индукции по результату расчета магнитной цепи.

Уравнения связи (2.20–2.25) были применены в математической модели для синтеза оптимальной геометрии АСГ при оптимизации в заданных габаритах.

Уравнения связи (2.27–2.30) были применены в математической модели для синтеза оптимальной геометрии АСГ при полногабаритной оптимизации.

2.4. Алгоритм математической модели расчета асинхронизированного синхронного генератора

Математическую модель расчета АСГ представим в виде алгоритма шагов, при этом в ее основу положен хорошо апробированный метод схем замещения [44]. Расчет производится для синхронного режима работы генератора.

1. Ввод исходных данных. Исходными данными являются перечисленные выше константы, ограничения и независимые переменные. Также задается предварительное значение коэффициента электродвижущей силы (ЭДС) (k_{epred}).

2. Производится механический расчет по методике согласно параграфу 2.1 главы 2. По результатам механического расчета определяется наружный и внутренний диаметр ротора, а также ограничение по длине ротора.

3. Число полюсов:

$$p = f \cdot \frac{60}{n}, \quad (2.31)$$

где f – частота напряжения питания (Гц) (задаётся как входные параметры), n – синхронная скорость вращения ротора (об/мин) (задаётся как входные параметры).

4. Число зубцов статора:

$$z_s = 2 \cdot p \cdot m \cdot q_{stator}, \quad (2.32)$$

где m – число фаз (задаётся как входные параметры), q_{stator} – число пазов на полюс и фазу статора (задаётся как входные параметры).

5. Число зубцов ротора:

$$z_r = 2 \cdot p \cdot m \cdot q_{rotor}, \quad (2.33)$$

где q_{rotor} – число пазов на полюс и фазу ротора (задаётся как входные параметры).

6. Определяются высота и ширина пазов статора и ротора через обобщённые переменные по уравнениям связи (2.27–2.30).

7. Расчётная (электромагнитная) мощность (ВА):

$$P_{rasch} = P_n \cdot \frac{k_{epred}}{\cos \varphi}, \quad (2.34)$$

где P_n – номинальная выходная мощность (Вт) (задаётся как входные параметры), $\cos \varphi$ – номинальный коэффициент мощности (задаётся как входные параметры).

8. Полюсное деление (м):

$$\tau = \pi \cdot \frac{D_a + 2 \cdot \delta}{2 \cdot p}, \quad (2.35)$$

где D_a – наружный диаметр ротора (м) (задаётся как входные параметры), δ – воздушный зазор (м) (задаётся как входные параметры).

9. Линейное напряжение обмотки статора (В):

При соединении обмоток в звезду:

$$U_{n_stator} = \sqrt{3} \cdot U_n, \quad (2.36)$$

где U_n – номинальное фазное напряжение В (задаётся как входные параметры).

При соединении обмоток в треугольник:

$$U_{n_stator} = U_n, \quad (2.37)$$

10. Номинальный фазный ток (А):

При соединении обмоток в звезду:

$$I_{nf_stator} = \frac{P_{rasch}}{\sqrt{3} \cdot U_{n_stator} \cdot k_{epred}}, \quad (2.38)$$

При соединении обмоток в треугольник:

$$I_{nf_stator} = \frac{P_{rasch}}{3 \cdot U_{n_stator} \cdot k_{epred}}, \quad (2.39)$$

11. Ширина зубцового деления (м):

$$t_{stator} = \frac{\pi \cdot (D_a + 2 \cdot \delta)}{z_s}, \quad (2.40)$$

12. Ток в параллельной ветви (А):

$$I_{paralel_stator} = \frac{I_{nf_stator}}{a_{vozm}[i]}, \quad (2.41)$$

где $a_{vozm}[i]$ – возможные варианты количества параллельных ветвей.

13. Определение количества параллельных ветвей обмотки статора исходя из условия обеспечения допустимого тока в параллельной ветви ($I_{paralel_stator} < I_{\max par}$).

14. Линейная нагрузка (А/м):

$$A = \frac{6,1 \cdot P_{rasch}}{l_\delta \cdot k_B \cdot \alpha_\delta \cdot k_{ob} \cdot B_\delta \cdot (D_a + 2 \cdot \delta)^2 \cdot n}, \quad (2.42)$$

где l_δ – расчётная длина магнитопровода (м) (задаётся как независимая переменная), k_B – коэффициент формы поля (задаётся как входные параметры), α_δ – коэффициент полюсного перекрытия (задаётся как входные параметры), k_{ob} – обмоточный коэффициент (задаётся как входные параметры), B_δ – индукция в воздушном зазоре (Тл) (задаётся как входные параметры).

15. Количество эффективных проводников:

$$u_{p_vozm} = \frac{\pi \cdot D_a \cdot A}{I_{parallel_stator}[i] \cdot z_s}, \quad (2.43)$$

где $I_{parallel_stator}[i]$ – величина тока в параллельной ветви при выбранном количестве параллельных ветвей (А).

16. Количество витков в фазе:

$$w_1 = \frac{u_{p_vozm} \cdot z_s}{2 \cdot a \cdot m}, \quad (2.44)$$

где a – выбранное количество параллельных ветвей.

17. Площадь паза статора (м²):

$$S_{paz_stator} = h_{zs} \cdot b_{zs}, \quad (2.45)$$

где h_{zs} – высота паза статора (м), b_{zs} – ширина паза статора (м).

18. Площадь меди в пазах статора (м²):

$$S_{medi_stator} = S_{paz_stator} \cdot k_{z_stator}, \quad (2.46)$$

где h_{zs} – коэффициент заполнения паза статора.

19. Площадь эффективного проводника статора (м²):

$$q_{ef_stator} = \frac{S_{medi_stator}}{u_{p_vozm}}, \quad (2.47)$$

20. Плотность тока в эффективном проводнике статора (А/м²):

$$J_{stator} = \frac{I_{parallel_stator}[i]}{q_{ef_stator}}, \quad (2.48)$$

21. Количество радиальных вентиляционных каналов:

$$n_k = \frac{l_\delta}{l_{pak}}, \quad (2.49)$$

где l_{pak} – толщина субпакета магнитопровода (м) (задаётся как входные параметры).

22. Конструкционная толщина магнитопровода (м):

$$l_{ct} = l_\delta + n_k \cdot b_k, \quad (2.50)$$

где b_k – ширина радиального вентиляционного канала (м) (задаётся как входные параметры).

23. Высота спинки статора (м):

$$h_{a_stator} = \frac{\alpha_\delta \cdot B_\delta \cdot \tau}{2 \cdot B_{J_stator} \cdot k_c}, \quad (2.51)$$

где B_{J_stator} – значение индукции в спинке статора (Тл) (задаётся как входные параметры), k_c – коэффициент заполнения пакета сталью (задаётся как входные параметры).

24. Коэффициент распределения обмотки статора:

$$k_{p_stator} = \frac{\sin(\frac{\pi}{2 \cdot m})}{q_{stator} \cdot \sin(\frac{\pi}{2 \cdot m \cdot q_{stator}})}, \quad (2.52)$$

25. Коэффициент укорочения обмотки статора:

$$k_{y_stator} = \frac{k_{ob}}{k_{p_stator}}, \quad (2.53)$$

26. Шаг обмотки статора по пазам:

$$y_{stator} = 2 \cdot \frac{\arcsin(k_{y_stator})}{\pi} \cdot m \cdot q_{stator}, \quad (2.54)$$

27. Расчёт геометрии катушки и активного сопротивления фазы обмотки статора по методике [42]:

$$r_1 = \rho_u \frac{L}{q_{ef_stator} \cdot a'}, \quad (2.55)$$

где L – общая длина проводников фазы обмотки статора (м) (рассчитывается по методике [42]), ρ_u – удельное сопротивление меди, приведённое к рабочей температуре (Ом·м).

28. Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора, определённое по методике [42]:

$$x_\sigma = 15,8 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{w_1}{100}\right)^2 \cdot \frac{l_\delta - 0,5 \cdot n_k \cdot b_k}{p \cdot q_{stator}} \cdot (\lambda_{nk} + \lambda_{л1} + \lambda_{г1}), \quad (2.56)$$

где λ_{nk} – коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния (рассчитывается по методике [42]), $\lambda_{л1}$ – коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния (рассчитывается по методике [42]), $\lambda_{г1}$ – коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния (рассчитывается по методике [42]).

29. Магнитный поток обмотки статора (Вб):

$$\Phi_H = B_\delta \cdot \alpha_\delta \cdot \tau \cdot l_\delta, \quad (2.57)$$

30. ЭДС обмотки статора через поток (В):

$$E = 4 \cdot \Phi_H \cdot k_B \cdot f \cdot w_1 \cdot k_{ob}, \quad (2.58)$$

31. Определение необходимой ЭДС (В):

$$E_{rasch} = U_n + I_{nfstator} \cdot \sqrt{r_1^2 + x_\sigma^2}, \quad (2.59)$$

32. Определение фактической погрешности расчёта ЭДС:

$$\varepsilon_e = \frac{|E_{rasch} - E|}{E_{rasch}}, \quad (2.60)$$

33. Сравнение фактической погрешности расчета ЭДС с допустимой погрешностью:

$$\varepsilon_e \leq \varepsilon_{e_dop}, \quad (2.61)$$

Если условие выполняется, расчет переходит к пункту 35. В противном случае расчет повторяется с пункта 7 с новым предварительным коэффициентом ЭДС.

34. Расчет магнитной цепи якоря по традиционной методике, определение фактических значений индукций в элементах магнитопровода и определение суммарной магнитодвижущей силы (МДС) магнитной цепи [42].

35. Определение цепи МДС с учётом реакции якоря из диаграммы Потье по методике [69].

После определения МДС реакции якоря выполняется расчет тока возбуждения и МДС возбуждения. Для правильного проведения расчетов стоит отметить, что в синхронном режиме возбуждение генератора производится постоянным током, а обмотка ротора у данных электрических машин является трехфазной. В связи с этим появляется возможность создания результирующего вектора МДС за счет питания каждой фазы требуемыми токами. Наиболее оптимальным является вариант, в котором две фазы питаются номинальным током возбуждения, а третья фаза отключается. Соответственно каждая из двух

фаз создает номинальную МДС. Векторная диаграмма результирующей МДС для данного режима питания обмотки ротора представлена на рисунке 2.4.1.

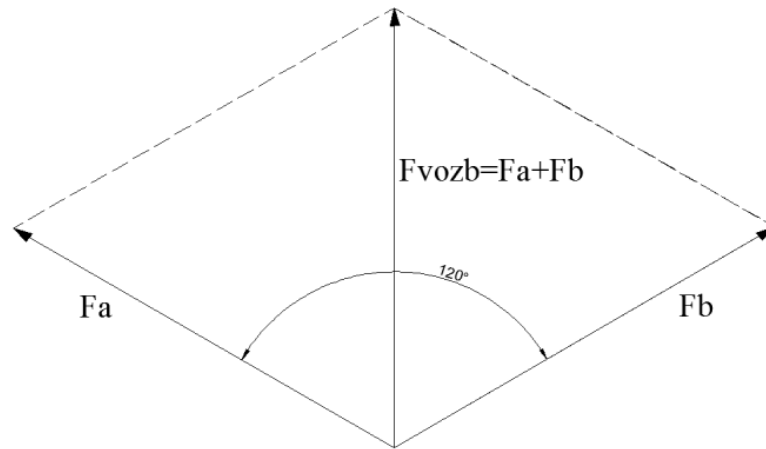


Рис. 2.4.1. Векторная диаграмма результирующей МДС обмотки возбуждения АСГ в синхронном режиме

36. Число витков в фазе обмотки ротора:

$$w_2 = \frac{u_r \cdot z_r}{2 \cdot a_r \cdot m}, \quad (2.62)$$

где u_r – количество эффективных проводников обмотки ротора (задаётся как входные параметры), a_r – количество параллельных ветвей обмотки ротора (задаётся как входные параметры).

37. Коэффициент распределения обмотки ротора:

$$k_{p_rotor} = \frac{\sin(\frac{\pi}{2 \cdot m})}{q_{rotor} \cdot \sin(\frac{\pi}{2 \cdot m \cdot q_{rotor}})}, \quad (2.63)$$

38. Ток возбуждения (А):

$$I_B = F_{BH} \cdot \frac{p}{w_2 \cdot k_{p_rotor}}, \quad (2.64)$$

где F_{BH} – МДС возбуждения, создаваемая одной фазой (А).

39. Площадь паза ротора (м²) :

$$S_{paz.rot} = b_{zr} \cdot h_{zr}, \quad (2.65)$$

где b_{zr} – ширина паза ротора (м), h_{zr} – высота паза ротора (м).

40. Площадь эффективного проводника ротора (м²):

$$q_{provod_rotor} = \frac{S_{paz.rot}}{u_r} \cdot k_{z_rotor}, \quad (2.66)$$

где k_{z_rotor} – коэффициент заполнения паза ротора.

41. Плотность тока в эффективном проводнике ротора (А/м²):

$$J_{rotor} = \frac{I_B}{q_{provod_rotor}}, \quad (2.67)$$

42. Расчёт геометрии катушки и активного сопротивления фазы обмотки ротора по методике [42]:

$$r_2 = \rho_u \frac{L_2}{q_{provod_rotor} \cdot a_r}, \quad (2.68)$$

где L_2 – общая длина проводников фазы обмотки ротора (м) (рассчитывается по методике [42]).

43. Определение массы электротехнической стали и меди (кг).

44. Генерируемая мощность (Вт):

$$P_{gen} = 3 \cdot I_{nf_stator} \cdot (E - I_{nf_stator} \cdot \sqrt{r_1^2 + x_\sigma^2}) \cdot \cos \varphi, \quad (2.69)$$

45. Электрические потери в обмотке статора (Вт):

$$P_{el_stator} = m \cdot I_{nf_stator}^2 \cdot r_1, \quad (2.70)$$

46. Электрические потери на возбуждение (Вт):

$$P_B = (m - 1) \cdot I_B^2 \cdot r_2, \quad (2.71)$$

47. Магнитные потери в зубцах статора (Вт):

$$P_{mag_z} = 1,7 \cdot p_{1.50} \cdot B_{z1cp}^2 \cdot m_{z1} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3}, \quad (2.72)$$

где $p_{1.50}$ – удельные потери в электротехнической стали при частоте 50 Гц и магнитной индукции 1 Тл (Вт/кг), B_{z1cp} – магнитная индукция в среднем сечении зубца статора (Тл), m_{z1} – масса зубцов статора (кг).

48. Магнитные потери в ярме статора (Вт):

$$P_{mag_a} = 1,5 \cdot p_{1.50} \cdot B_a^2 \cdot m_{a1} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3}, \quad (2.73)$$

где B_a – магнитная индукция в ярме статора (Тл), m_{a1} – масса ярма статора (кг).

49. Добавочные потери (Вт):

$$P_{dob} = 0,005 \cdot P_n, \quad (2.74)$$

50. Суммарные потери (Вт):

$$\sum P = P_{el_stator} + P_B + P_{mag_z} + P_{mag_a} + P_{dob}, \quad (2.75)$$

51. Коэффициент полезного действия:

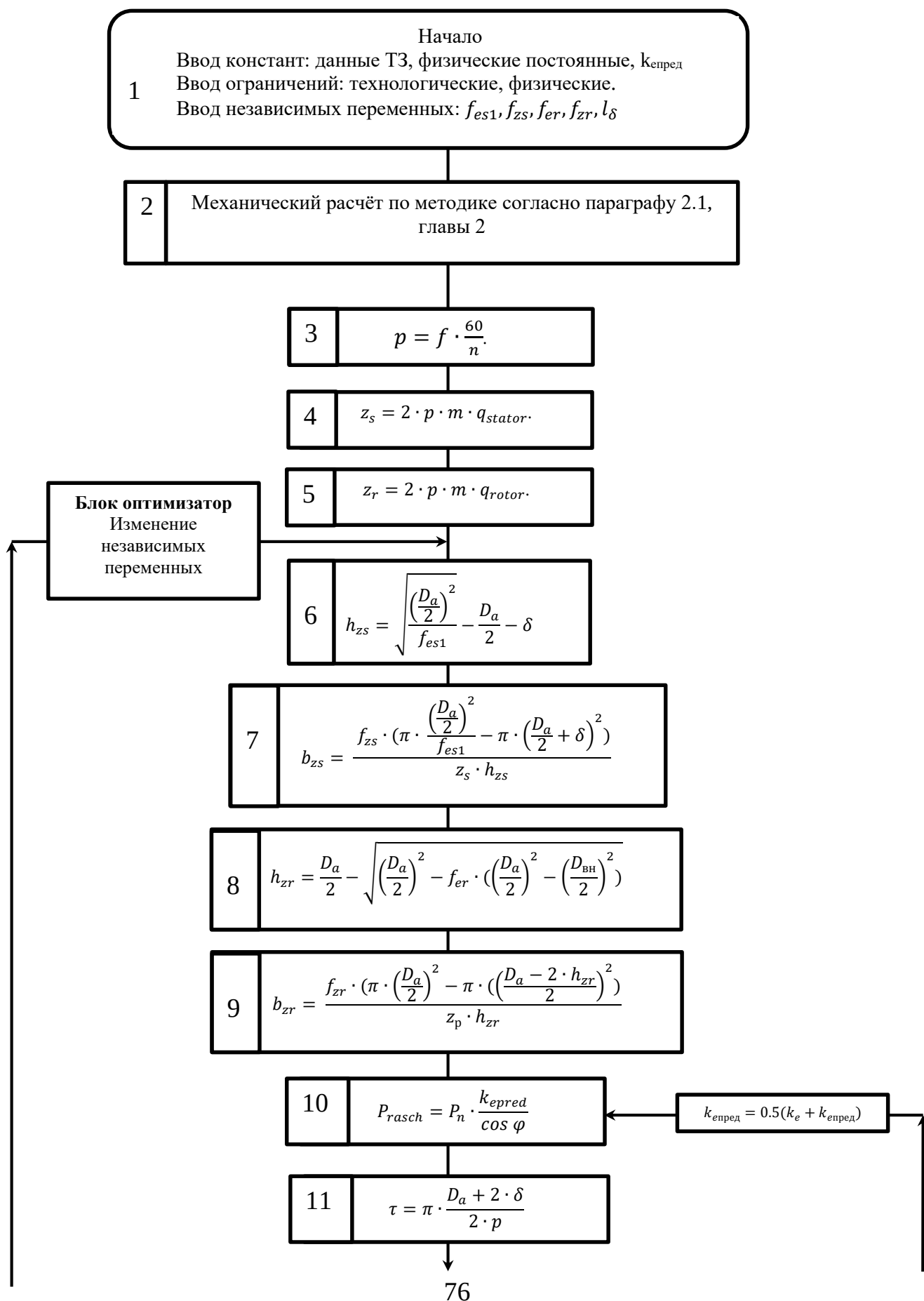
$$\eta = 1 - \frac{\sum P}{P_{gen} + \sum P}, \quad (2.76)$$

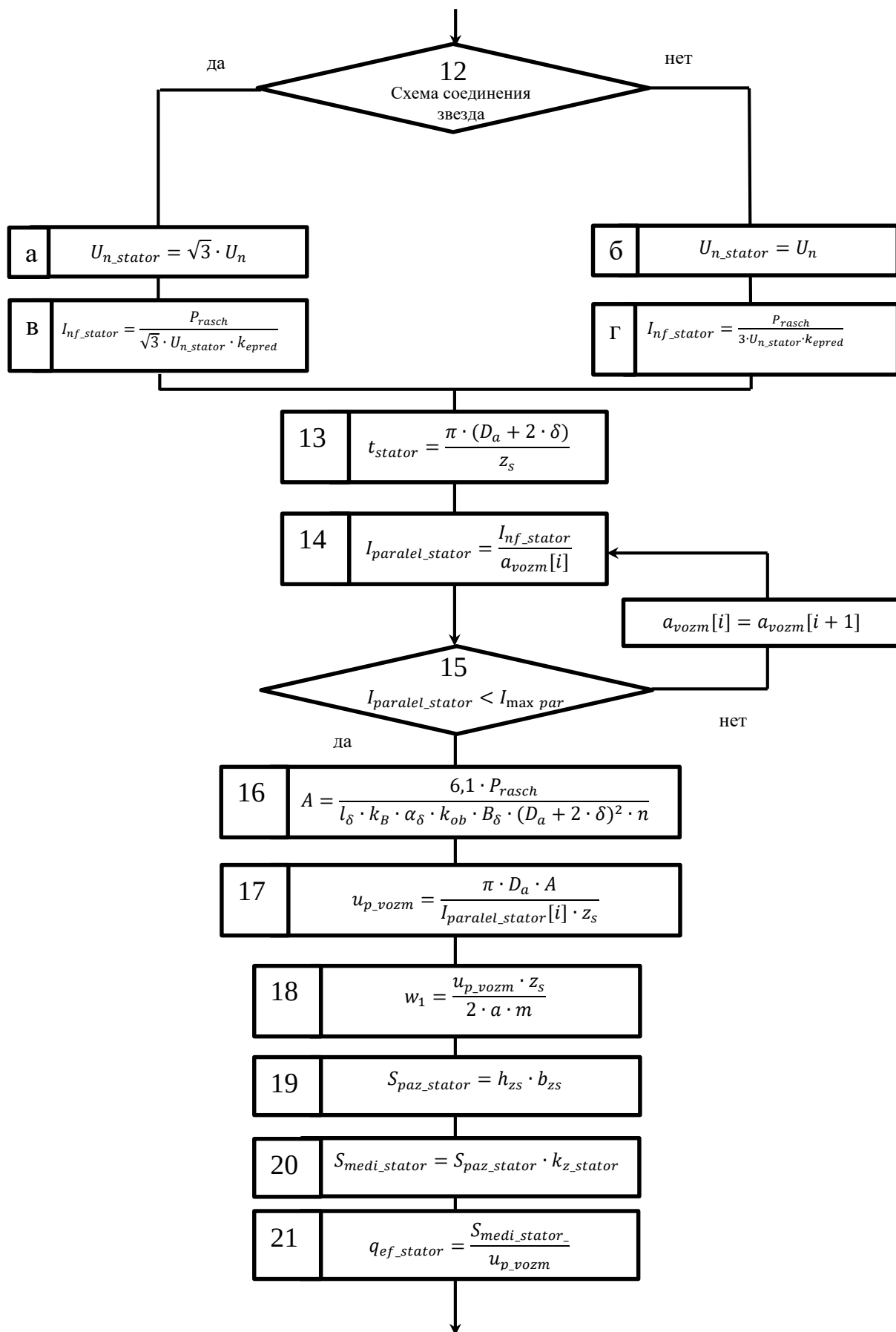
52. Проверка ограничений. При нарушении ограничений к целевой функции прибавляется штрафная функция. Размер штрафа определяется величиной нарушения ограничения.

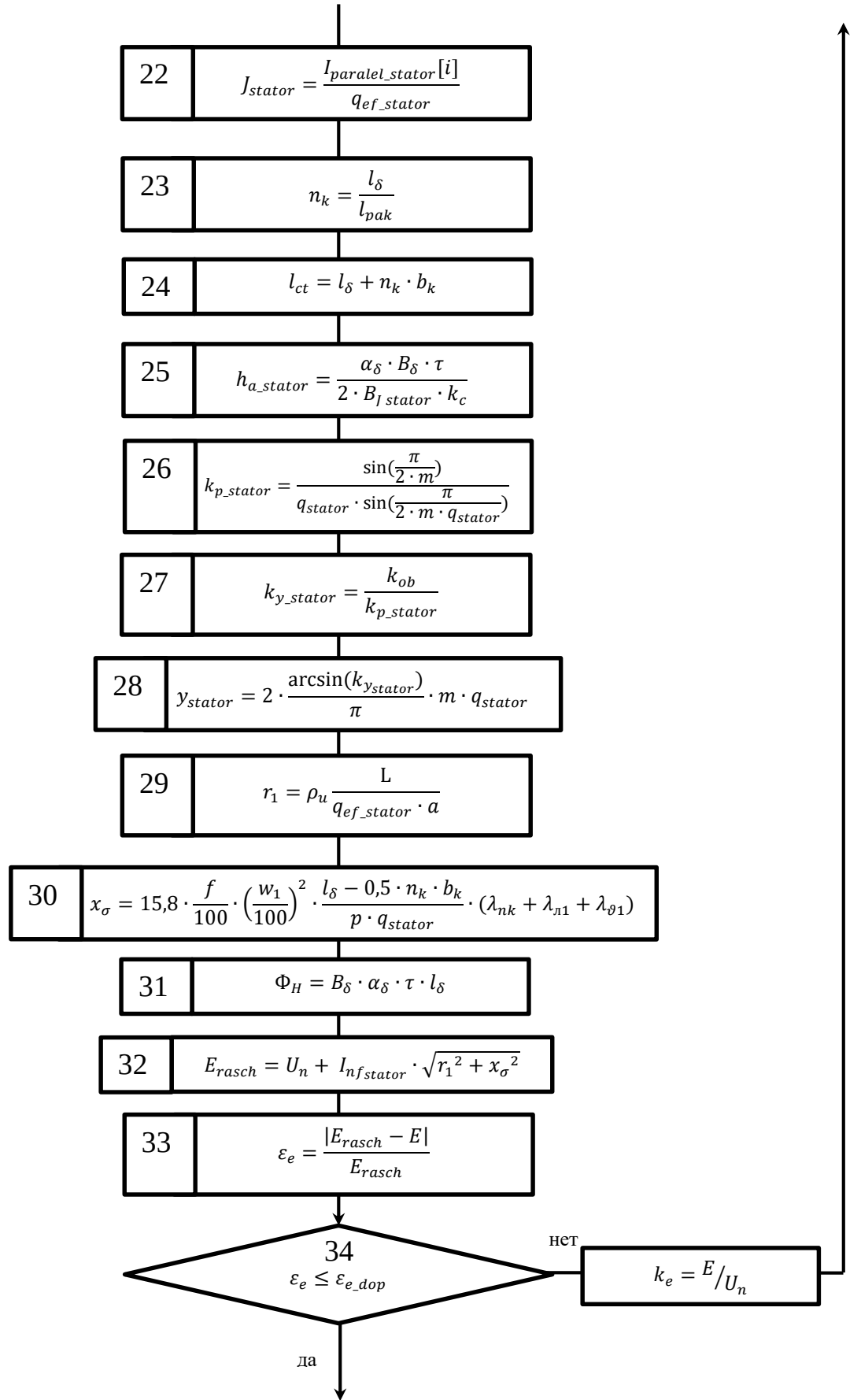
2.5. Блок-схема алгоритма расчета асинхронизированного синхронного генератора

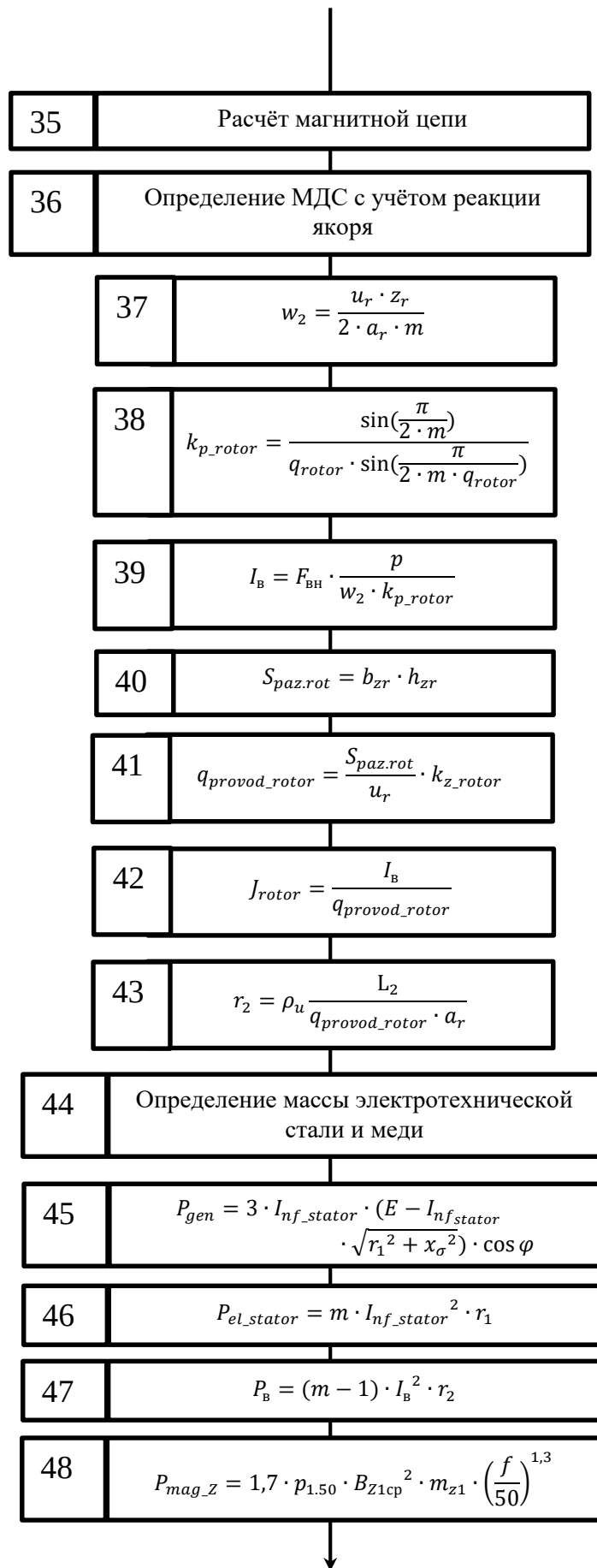
Для более наглядного представления математической модели расчета ее рассмотренный алгоритм изображен в виде блок-схемы на рисунке 2.5.1.

Математическая модель по приведенному алгоритму реализована в программной среде Delphi и включена в программный комплекс оптимизации АСГ.









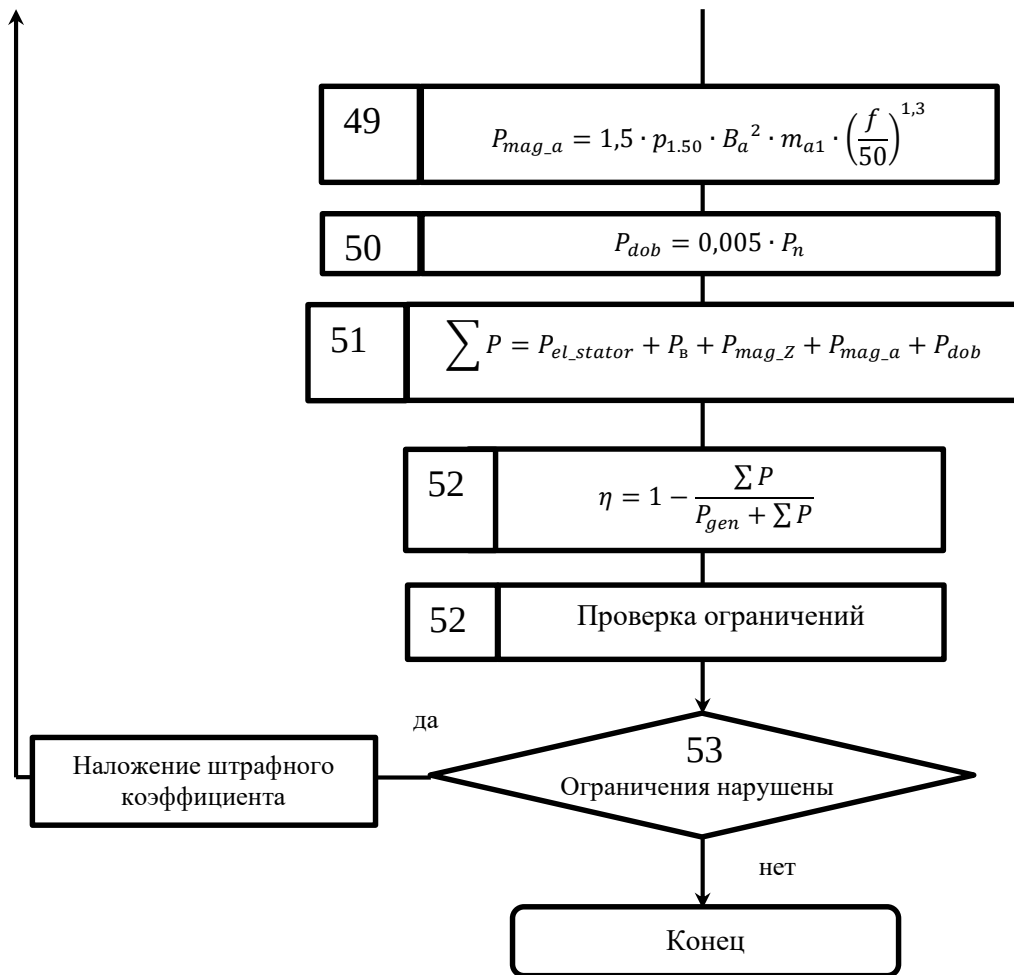


Рис.2.5.1 Блок-схема алгоритма электромагнитного расчета АСГ

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

2.6. Расчет выходных параметров и характеристик

Из всех возможных режимов работы для АСГ представляют интерес генераторный режим работы до синхронной скорости и генераторный режим работы выше синхронной скорости. В этих режимах система уравнений, описывающих электромагнитные процессы при стационарной нагрузке имеют вид [28]:

$$\bar{U}_1 = R_s \bar{I}_1 + jX_{ls} \bar{I}_1 + \bar{E}_1, \quad (2.77)$$

$$\frac{\bar{U}_2^l}{s} = \frac{R_r}{s} \bar{I}_2^l + jX_{lr} \bar{I}_2^l + \bar{E}_2, \quad (2.78)$$

$$\bar{I}_m = \bar{I}_1 + \bar{I}_2^l, \quad (2.79)$$

где:

$\bar{U}_1$ – фазное напряжение;

$\bar{I}_1, \bar{E}_1 = j\omega_1 \bar{\Psi}_m = jX_m \bar{I}_m$ – ток и ЭДС в обмотке статора;

$\bar{U}_2^l, \bar{I}_2^l, \bar{E}_2^l = j\omega_1 \bar{\Psi}_m = jX_m \bar{I}_m$ – приведенные напряжение, ток и ЭДС в обмотке ротора;

$\bar{I}_m$ – ток намагничивания;

$R_s, X_{ls} = \omega_1 L_{ls}$ – активное и индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора;

$R_r, X_{lr} = \omega_1 L_{lr}$ – приведенное активное и индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора;

$X_m = \omega_1 L_m$ – индуктивное сопротивление цепи намагничивания;

s – скольжение.

Т-образная схема замещения АСГ, составленная по уравнениям, приведена на рисунке 2.6.1а. Преобразуем Т-образную схему замещения АСГ в Г-образную схему замещения, которая представлена на рисунке 2.6.1б. Для Г-образной схемы замещения значение переводного коэффициента C определяется из уравнения

$$C = 1 + \frac{X_{ls}}{X_m}, \quad (2.80)$$

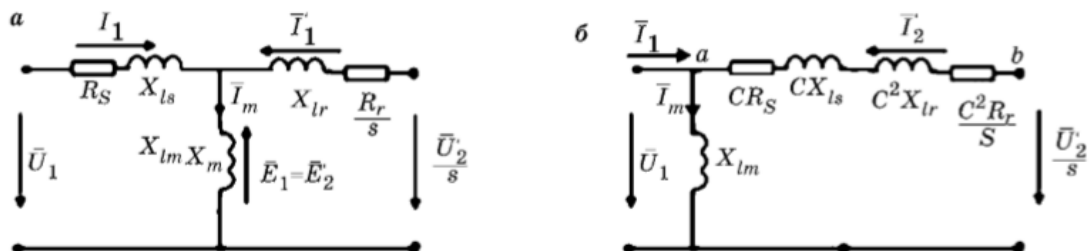


Рис. 2.6.1. Схемы замещения АСГ: а) Т-образная; б) Г-образная

Для Г-образной схемы замещения уравнения напряжений приводятся к виду:

$$\bar{U}_2^l = \bar{U}_1 + R_2 \bar{I}_2^l + jX_2 \bar{I}_2^l, \quad (2.81)$$

$$\bar{U}_1 = jX_{1m} \bar{I}_m, \quad \bar{I}_m = \bar{I}_1 + \bar{I}_2^l, \quad (2.82)$$

$$R_2 = R_s C + \frac{R_r}{s} C^2 \approx R_s + \frac{R_r}{s}, \quad (2.83)$$

$$X_2 = X_{ls} C + X_{lr} C^2 \approx X_{ls} + X_{lr}, \quad (2.84)$$

$$X_{1m} = X_{ls} + X_m, \quad (2.85)$$

где R_2 , X_2 , X_{1m} – активные и индуктивные сопротивления Г-образной схемы замещения.

При оценке энергетических потоков АСГ следует учитывать, что:

1) активная мощность в источнике положительна, когда источник отдает энергию, и отрицательна, когда источник потребляет энергию;

2) реактивная мощность в источнике положительна (индуктивная), когда напряжение опережает ток, и отрицательна (емкостная), когда напряжение отстает от тока;

3) механическая мощность на валу положительна в двигательном режиме работы машины двойного питания и отрицательна в генераторном режиме ее работы.

Активная и реактивная мощности в источниках якоря (1) и индуктора (2) определяются выражениями:

$$P_1 = \frac{3}{2} U_1 I_1 \cos \varphi_1, \quad (2.86)$$

$$P_2 = \frac{3}{2} \bar{U}_2^l \bar{I}_2^l \cos \varphi_2, \quad (2.87)$$

$$Q_1 = \frac{3}{2} U_1 I_1 \sin \varphi_1, \quad (2.88)$$

$$Q = \frac{3}{2} \bar{U}_2' \bar{I}_2' \sin \varphi_2, \quad (2.89)$$

Рассмотрим только генераторные режимы работы, когда механическая энергия на валу преобразуется в активную электрическую энергию и отдается в сеть. На рисунке 2.6.2 представлены векторная и энергетическая диаграммы для генераторного режима, когда скорость вращения ротора меньше синхронной. В случае работы генератора на стационарную сеть для этого режима возможно потребление реактивной энергии из сети и зарядка АКБ, но также возможен режим разрядки АКБ и генерации реактивной энергии в стационарную сеть. Активная энергия роторной цепи идет на добавление к механической мощности на валу.

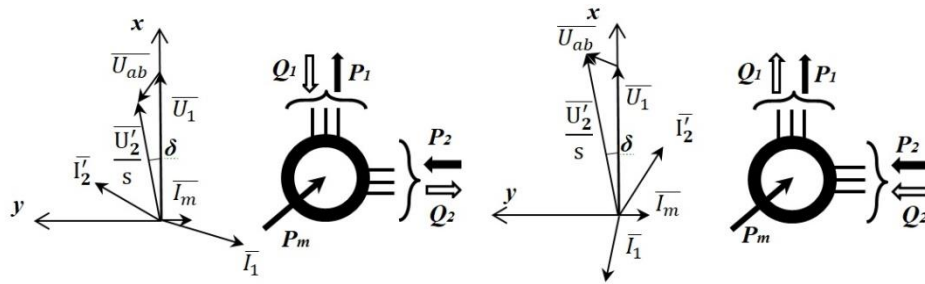


Рис. 2.6.2. Векторная диаграмма и энергетическая диаграмма для генераторного режима, когда скорость вращения ротора меньше синхронной.

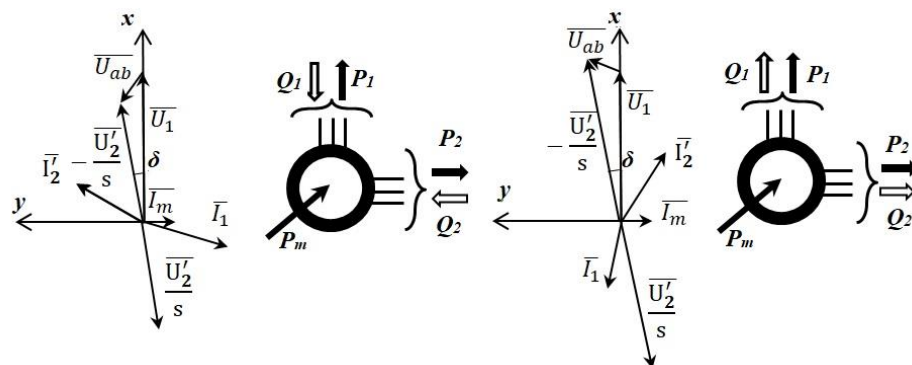


Рис. 2.6.3. Векторная диаграмма и энергетическая диаграмма для генераторного режима, когда скорость вращения ротора больше синхронной.

На рисунке 2.6.3 представлены векторная и энергетическая диаграммы для генераторного режима, когда скорость вращения ротора больше синхронной. В случае работы генератора на стационарную сеть для этого режима возможно потребление реактивной энергии из сети и одновременно из АКБ, но также возможен режим разрядки АКБ и генерации реактивной энергии в стационарную сеть. Механическая энергия на валу имеет избыток, который идет в роторную цепь АСГ.

Баланс активных мощностей генераторного режима для досинхронных и сверхсинхронных скоростей сведен в таблицу 2.6.1.

Таблица 2.6.1

Баланс активных мощностей при разных скольжениях

Скольжение	Генераторный режим
$s > 0$	$P_1 + P_m = -P_1 + \Delta P$
$s < 0$	$P_m = -P_1 + \Delta P - P_2$

Токи статора и ротора определяются из решения уравнений:

$$I_1 = \frac{\overline{U_1} \left(\frac{R_r}{s} + jX_s \right) - j \frac{\overline{U_2}}{s} X_m}{(R_s + jX_s) \left(\frac{R_r}{s} + jX_s \right) - X_m^2}, \quad (2.90)$$

$$\bar{I}_2 = \frac{\frac{\overline{U_2}}{s} (R_s + jX_s) - j \overline{U_1} X_m}{(R_s + jX_s) \left(\frac{R_r}{s} + jX_s \right) - X_m^2}, \quad (2.91)$$

Полный ток статора и ротора рассчитываются по выражениям:

$$I_1 = \sqrt{I_{1x}^2 + I_{1y}^2}, \quad (2.92)$$

$$|I_2| = \sqrt{|I_{2x}|^2 + |I_{2y}|^2}, \quad (2.93)$$

Электромагнитный момент определяется по следующему выражению:

$$T_e = \frac{3}{2} p L_m (\bar{I}_2 \cdot \bar{I}_1) = 1,5 p L_m (I_{2x} I_{1y} - I_{2y} I_{1x}), \quad (2.94)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p L_m (\bar{I}_2 \cdot \bar{I}_1) = 1,5 p L_m (I_{2x} I_{1y} - I_{2y} I_{1x}), \quad (2.95)$$

Энергетические характеристики АСГ определим после расчета токов по приведенным ниже выражениями:

$$P_1 = 1,5 U_1 I_{1x}, \quad (2.96)$$

$$Q_1 = -1,5 U_1 I_{1y}, \quad (2.97)$$

$$Q_2 = 1,5 (U_{2y} I_{2x} - U_{2x} I_{2y}), \quad (2.98)$$

$$P_m = T_e \omega_m = T_e \frac{(1-s)\omega_1}{p}, \quad (2.99)$$

$$P_2 = 1,5 (U_{2x} I_{2x} + U_{2y} I_{2y}), \quad (2.100)$$

Тепловые потери в АСГ можно рассчитать по выражению:

$$\Delta P = I_1^2 R_s + I_2^2 |R_r|. \quad (2.101)$$

Приведенные уравнения (2.77–2.101) полностью определяют энергетику АСГ в стационарном режиме работы и могут быть использованы для расчета внешних, регулировочных и нагрузочных характеристик.

Выводы по главе

1. Разработана математическая модель расчета максимальных габаритов ротора при обеспечении отсутствия критических частот в рабочем диапазоне

скоростей вращения. Модель, исходя из условий механической прочности и стабильности, рассчитывает минимально допустимый внутренний диаметр сердечника ротора, максимально допустимый наружный диаметр ротора и максимально допустимую длину активных частей ротора. Данная математическая модель дает возможность связать параметры механической стабильности ротора и электромагнитные параметры. Отличие данной модели от существующих методик заключается в том, что она позволяет производить не анализ проектных решений, а является методикой синтеза проектных решений.

2. Разработана математическая модель электромагнитного расчета АСГ для оптимизации геометрии активных частей. В качестве независимых переменных выведены и применены обобщенные переменные, представляющие собой соотношения площадей активных зон электрической машины. В математической модели определены основные аналитические зависимости и формализованы показатели качества.

3. Представленные математические модели реализованы в единой программной оболочке на языке Delphi и являются основой для разработки системы оптимального проектирования АСГ.

3. РАЗРАБОТКА ПОДСИСТЕМЫ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ АСИНХРОНИЗИРОВАННОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПРОЕКТНЫХ СИТУАЦИЙ

Вводные замечания

Оптимизация – это процесс выбора наилучшего из возможных вариантов [62] по одному или нескольким показателям качества. В самом общем случае при проектировании электрической машины необходимо решать многокритериальную задачу. Это ситуация, когда необходимо выбрать наилучшее решение сразу по нескольким критериям. Но в электромеханике решение многокритериальной задачи достаточно сложно, поскольку критерии оптимальности находятся в противоречивой зависимости, и, таким образом, улучшение одного параметра приводит к ухудшению другого. Например, увеличение КПД приводит к увеличению массогабаритных показателей, снижение стоимости – к ухудшению энергетических параметров. Существует достаточно большое количество методов многокритериальной оптимизации (метод весовых коэффициентов, лексикографический метод, оптимизация по Парето, метод изменения ограничений, генетический метод), но в основном они носят субъективный характер и эффективность их применения в значительной степени зависит от опыта разработчика. Как правило, многокритериальная оптимизация используется в отношении изделий, для которых накоплена большая статистическая база данных по параметрам и конструктивным решениям. Мировая и отечественная практика проектирования электрических машин до настоящего времени не выявила удачных универсальных методов решения многокритериальных задач. В связи с этим в данной работе, так как разрабатывается инновационное изделие, не накопившее статистики по оптимальным решениям, рассматривается **однокритериальная** задача оптимизации геометрии АСГ, которая достаточно хорошо формализована. При этом в систему заложена возможность выбирать разные критерии, чтобы

расширить количество потенциальных вариантов для разных проектных ситуаций. В данной формулировке для разработки подсистемы синтеза необходимо определить задачу однокритериальной оптимизации, выбрать метод оптимизации и определить уровни оптимизации для создания достаточной гибкости проектной системы.

3.1. Постановка задачи однокритериальной оптимизации асинхронизированного синхронного генератора

Постановку задачи однокритериальной оптимизации АСГ в классическом виде можно сформулировать следующим образом: для заданных констант (конкретного исполнения, материалов, исходных данных ТЗ) при заданных ограничениях необходимо, делая перебор независимых переменных по определенному алгоритму, найти геометрию, которая обеспечивала бы экстремальное значение выбранного критерия [1, 47, 50, 65, 66, 91, 113].

Определение и выбор констант, ограничений и критериев оптимальности были подробно разобраны в параграфе 2.2 главы 2.

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

3.2. Выбор метода оптимизации

С учетом нелинейного характера зависимости между габаритами электрической машины, электромагнитными нагрузками и мощностью решение задачи оптимального проектирования сводится к поиску экстремума нелинейной функции. Решению данных задач посвящен отдельный раздел математики – нелинейное программирование [35].

На данный момент уже разработано большое количество методов оптимизации, которые по самой обобщенной классификации разделяются на:

- детерминированные методы;

- стохастические методы;
- комбинированные методы.

В свою очередь каждый из представленных классов содержит большое количество частных методов, которые могут исчисляться десятками. Это говорит о том, что не существует одного универсального и наиболее эффективного метода поиска оптимума. Таким образом, для каждой математической модели необходимо подбирать свой метод оптимизации, учитывая ее специфику.

Решение задачи оптимального проектирования зачастую происходит в условиях отсутствия информации о числе локальных оптимумов. Поэтому поиск в общем случае должен быть направлен на выявление глобального оптимума. Однако анализ целевых функций различных типов электрических машин показал, что задачу оптимизации массы можно ограничить поиском локального экстремума [25, 36, 54]. Это позволяет исключить стохастические и комбинированные методы перебора независимых переменных и ориентироваться 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 и метод однопараметрической оптимизации Фибоначчи при выборе длины шага поиска [20]. Этот метод можно использовать при переборе непрерывных и дискретных параметров, что очень удобно для оптимизации электрических машин. Именно он был принят для реализации блока-оптимизатора в оптимальной модели, но при этом следует отметить, что поиски наиболее приемлемого метода по количеству оптимизационных циклов следует продолжать. Эти научные поиски представляют собой отдельное исследование.

3.3. Определение уровней оптимизации

Процесс проектирования в различных ситуациях может требовать различного направления движения, поэтому проектная система должна обладать достаточной гибкостью, чтобы иметь возможность реализовывать проектные ситуации в зависимости от требований заказчика. Одним из возможных подходов, реализующих эту гибкость, является многоуровневая оптимизация.

Разбиение процесса оптимизации на уровни не является новым подходом в электромашиностроении. Достаточно подробно этот метод был рассмотрен и детально проработан для вентильных машин с аксиальным магнитным потоком [19, 21, 24], но для АСГ создание системы оптимизации с учетом разбиения ее на уровни является новым подходом, который требует формирования подсистемы синтеза особым образом.

Суть многоуровневой оптимизации заключается в охватывании как можно большего количества проектных ситуаций. Например, если мы разрабатываем генератор для новой системы, где присутствуют ограничения по габаритам, целесообразно произвести полную габаритную оптимизацию, то есть в данной проектной ситуации можно варьировать все переменные, и в итоге мы получим генератор требуемой мощности с требуемым КПД и оптимальной массой.

В случае, если генератор разрабатывается не для новой установки, а для модернизации старой, возможна проектная ситуация, требующая создания генератора максимальной мощности в заранее известных габаритах. В этом случае варьированию подлежат также все переменные, но меняется математическая модель.

Также возможны проектные ситуации, требующие более низкого уровня оптимизации. Например, расчет электрической машины под известный штамп и замена ротора электрической машины. Любая новая из проектных ситуаций может потребовать изменения математической модели и изменения количества и типов независимых переменных.

Потенциальных проектных ситуаций может быть достаточно много, и заранее заложить их все в проектную систему достаточно сложно, поэтому в данной работе выделяются пять типов различных проектных ситуаций, которые должны быть основными при разработке генераторов для новых установок.

3.3.1. Полная габаритная оптимизация

На этом уровне оптимизации варьируются все независимые переменные.

В качестве констант в этом случае выступают следующие параметры:

- данные ТЗ согласно параграфу 2.2.1.1 главы 2;
- физические постоянные согласно параграфу 2.2.1.1 главы 2;

В качестве ограничений следует принять следующие величины:

- технологические ограничения согласно параграфу 2.2.1.2 главы 2;
- физические ограничения согласно параграфу 2.2.1.2 главы 2;
- минимальное значение КПД из данных ТЗ.

В качестве независимых переменных принимаются:

- обобщенные переменные – f_{es1} , f_{zs} , f_{er} , f_{zr} ;
- активная длина магнитопровода – l_δ (м).

В качестве критерия оптимальности устанавливается минимальная масса активных материалов при условии обеспечения требуемого КПД и отсутствия нарушения физических и технологических ограничений.

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

Оптимизация в заданных габаритах – это наиболее часто встречающаяся проектная ситуация при разработке новой электрической машины для применения в уже готовой системе электропривода, например, при замене старого генератора в существующей ВЭУ.

На этом уровне оптимизации так же, как и при полной габаритной оптимизации, варьируются пять независимых переменных.

Однако в данном случае в качестве независимых переменных выступают:

- обобщенные переменные – f_{es} , f_{zs} , f_{er} , f_{zr} ;
- линейная нагрузка – A (А/м).

Также меняется требуемый критерий оптимальности и, следовательно, трансформируется математическая модель расчета.

В качестве констант и ограничений в этом случае выступают те же параметры, что и при полной габаритной оптимизации, с добавлением наружного диаметра статора и активной длины магнитопровода.

В качестве критерия оптимальности устанавливается максимум генерируемой мощности при условии обеспечения требуемого КПД и отсутствия нарушения физических и технологических ограничений.

3.3.3. Габаритная оптимизация при фиксированном наружном диаметре

Эта проектная ситуация возникает для вновь создаваемых изделий при ограничении внешнего габарита, определяемого разработчиком привода. В этих условиях основной задачей разработчика является получение мощности при минимальной активной длине, обеспечивающей заданную мощность.

В качестве констант и ограничений в этом случае выступают те же параметры, что и при оптимизации в заданных габаритах, исключая только длину магнитопровода.

В качестве ограничений и независимых переменных принимаются те же параметры, что и при полной габаритной оптимизации.

Поскольку между длиной магнитопровода и массой активных материалов зависимость прямолинейная, то в качестве критерия оптимальности устанавливается минимальная масса активных материалов при условии

обеспечения требуемого КПД и отсутствия нарушения физических и технологических ограничений.

3.3.4 Габаритная оптимизация при известном штампе

Ввиду значительной дороговизны штамповой оснастки конструкторские отделы заводов зачастую сталкиваются с проектной ситуацией, когда необходимо спроектировать электрическую машину с требуемыми характеристикам под имеющийся в номенклатуре штамп. С целью снижения себестоимости изделия в данной проектной ситуации также рассматривается минимум массы активных материалов при условии обеспечения требуемого КПД и отсутствия нарушения физических и технологических ограничений. В связи с этим в проектную систему введен данный уровень оптимизации.

В качестве констант в этом случае выступают все те же параметры, что и при полной габаритной оптимизации, с добавлением полного описания геометрии поперечного сечения магнитопровода.

В качестве ограничений принимаются те же параметры, что и при полной габаритной оптимизации.

Таким образом, решение задачи оптимизации сводится к определению активной длины магнитопровода, поэтому в качестве независимой переменной варьируется только линейная нагрузка.

3.3.5. Поверочный расчет

Поверочный расчет является уровнем, на котором отсутствуют независимые переменные. Здесь все размеры, однозначно определяющие конструкцию, заданы. Проектная система не синтезирует конструктивные исполнения, а только проводит анализ конкретной заданной конструкции, рассчитывая основные параметры и характеристики.

Этот уровень позволяет разработчику самостоятельно варьировать переменные и тем самым уточнять результаты оптимизационных расчетов.

3.4. Алгоритм выбора уровня оптимизации

Как уже говорилось выше, процесс проектирования в различных ситуациях может требовать различного направления движения, что соответственно влечёт за собой выбор необходимого уровня оптимизации. Общий алгоритм выбора уровня оптимизации представлен на рисунке 3.4.1.

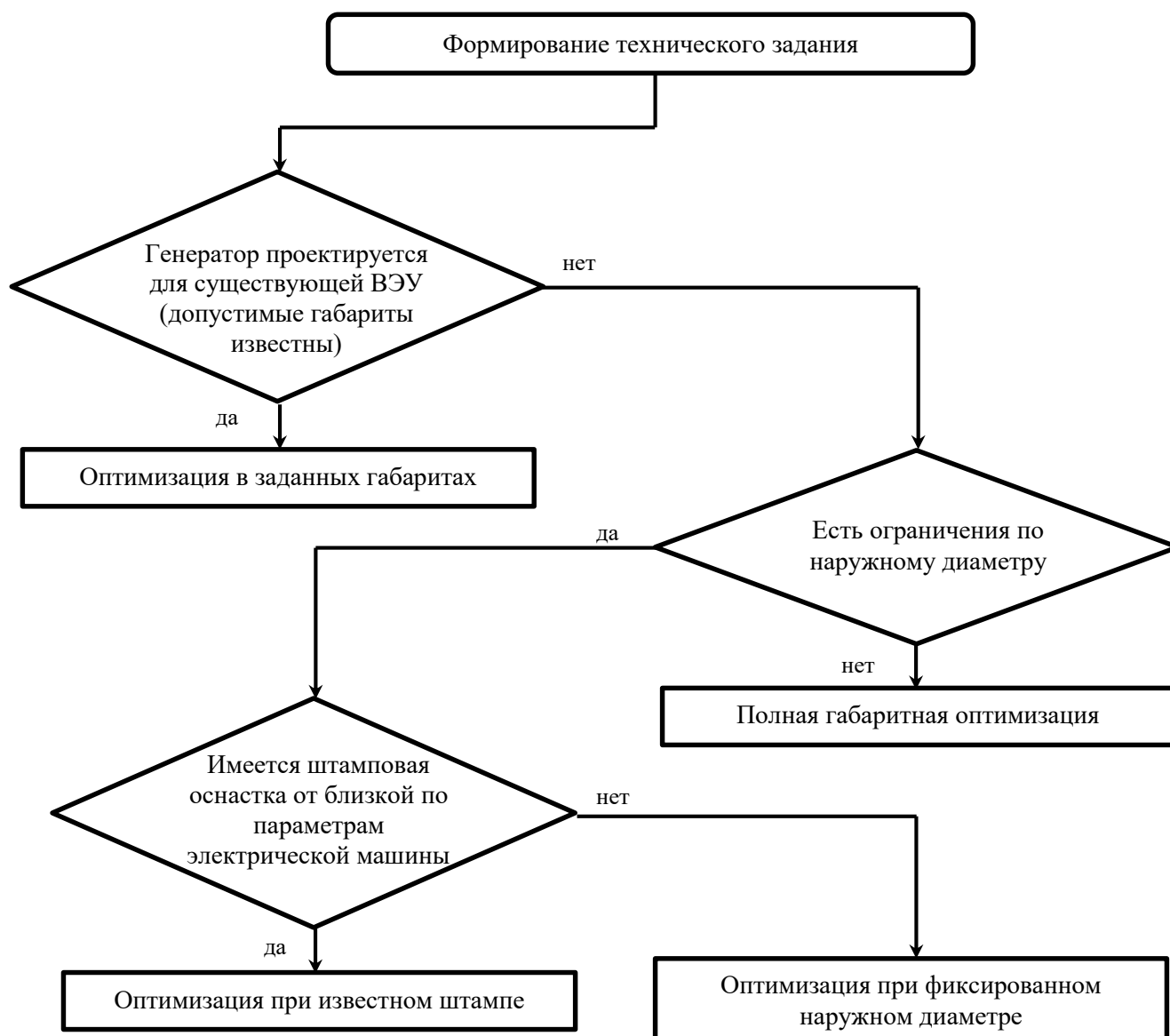


Рис. 3.4.1. Общий алгоритм выбора уровня оптимизации АСГ

Данный алгоритм заложен в подсистему синтеза. Он позволяет формализовать оптимизационную задачу.

Выводы по главе

1. Сформулирована задача однокритериальной оптимизации АСГ. В качестве оптимизации выбран метод, сочетающий в себе метод покоординатного спуска (Гаусса – Зейделя) при движении к оптимуму и метод Фибоначчи при определении шага.

2. Определено понятие уровней оптимизации. Формализованы пять уровней оптимизации геометрии АСГ. Для каждого уровня установлены константы, ограничения, независимые переменные и критерии оптимальности.

3. На основе проведенного анализа разработана система оптимизации АСГ, реализующая многоуровневую однокритериальную оптимизацию для различных проектных ситуаций. Система позволяет реализовать до пяти основных проектных ситуаций.

4. РАЗРАБОТКА ПОДСИСТЕМЫ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО И ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ АСИНХРОНИЗИРОВАННОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Вводные замечания

Подсистема синтеза проектных решений строится на основе максимально упрощенной математической модели с целью достижения приемлемого времени расчета. В связи с этим после синтеза необходимо провести подробный анализ полученных вариантов при помощи других, более точных методов.

В настоящее время существует большое количество программных средств, являющихся точными инструментами для проведения подробного анализа электромагнитного и теплового состояния электрических машин.

Одними из самых современных и точных программных средств для анализа электрических машин являются комплексы, основанные на методе конечных элементов (Ansys, Femm и др.) [2, 4–6, 11, 12, 22, 60, 64, 79, 97, 126]. Кроме этого, существуют программные средства, в основе которых лежит метод схем замещения (Matlab Simulink, Vissim и др.) [4, 39, 40, 71]. Данные программы также позволяют производить точные расчеты электрических машин, включая динамические режимы.

Все вышеуказанные программные средства самостоятельны, их можно использовать отдельно друг от друга и от подсистемы оптимизации, но разрозненное применение этих систем затрудняет подготовку исходных данных и снижает их эффективность. Решить эту проблему можно, если создать взаимосвязь между подсистемой синтеза и подсистемой анализа. Большинство из перечисленных выше систем имеют встроенные языки программирования, что позволяет создавать необходимые взаимосвязи через составление готовых скриптов.

В связи с этим для построения целостной проектной системы необходимо выполнить следующие действия:

- выбрать подходящие программные средства для анализа электромагнитного и теплового состояния;
- организовать взаимосвязь между подсистемой синтеза и подсистемой анализа;
- создать модели для проведения анализа;
- алгоритмизировать порядок действий в выбранных программных средствах.

Из сложившейся практики по разработке конкретных проектов для создания системы анализа были выбраны следующие готовые САЕ-системы:

- Ansys Electronics Desktop для расчета электромагнитных полей;
- Matlab Simulink для решения связанной задачи теплового и вентиляционного расчета.

Немаловажным фактором при выборе программных средств послужило наличие у Южно-Уральского государственного университета лицензий. Это позволило проводить научные исследования в правовом поле.

4.1. Анализ электромагнитного состояния асинхронизированного синхронного генератора в программной среде Ansys Electronics Desktop

Ansys Electronics Desktop – это комплекс программ, ориентированный на электромагнитные расчеты электрических машин различных типов. Данная программа состоит из трех расчетных блоков:

- Maxwell RMxprt – режим поверочного расчета на основе метода схем замещения;
- Maxwell 2D Design – режим анализа двухмерной задачи с использованием метода конечных элементов;
- Maxwell 3D Design – режим анализа трехмерной задачи с использованием метода конечных элементов.

Работу расчетчика облегчает то, что режим Maxwell RMxpert содержит шаблоны для построения моделей большинства основных конструкций электрических машин. Среди стандартных шаблонов имеется шаблон для расчета АСГ (модель Generic Rotating Machines). В данном режиме на основе метода схем замещения можно рассчитать большинство параметров и характеристик генератора при работе на сеть неограниченной мощности, но этот режим является упрощенным и не позволяет учитывать особенности питания электрической машины от несинусоидальных источников, а также не позволяет рассчитывать переходные процессы.

Следующий режим – Maxwell 2D Design – дает возможность анализировать электромагнитное состояние методом конечных элементов в двумерной постановке. В этом режиме можно производить расчеты переходных процессов и учитывать особенности питания электрической машины. Например, можно задать параметры широтно-импульсной модуляции от ПЧ и определить величину добавочных потерь от несинусоидального питания. Особенностью использования данного режима является то, что электрическая машина должна иметь плоскую симметрию. Это условие ограничивает количество типов электрических машин, для анализа которых можно применять Maxwell 2D Design, но для анализа АСГ данный режим дает точные результаты.

Третий режим – Maxwell 3D Design – позволяет производить анализ электромагнитного состояния методом конечных элементов в трехмерной постановке. В этом режиме можно создать цифровой двойник реального генератора и провести полный анализ электромагнитного состояния с учетом всех особенностей геометрии. Стоит отметить, что данный режим рассчитан на использование мощных компьютерных ресурсов и, соответственно, время проведения анализа может составлять несколько часов.

Рассматривая два режима Maxwell 2D Design и Maxwell 3D Design, позволяющих проводить анализ методом конечных элементов, стоит отметить,

что практика проектирования электрических машин показала: характеристики, полученные в режиме Maxwell 2D Design для плоскосимметричных машин, достаточно близки к реальным устройствам. Таким образом, для анализа электромагнитного состояния АСГ методом конечных элементов использование режима Maxwell 3D Design является избыточным и трудоемким в применении, поэтому для создания подсистемы анализа следует остановиться на использовании режима Maxwell 2D Design [82, 83].

Создание необходимой взаимосвязи между подсистемой синтеза и Ansys Electronics Desktop легко реализуется через использование встроенных в программу Ansys Electronics Desktop команд Script. В программе оптимизации был сформирован блок передачи данных в Ansys Electronics Desktop и ее вызов. Таким образом, была объединена программа оптимизации, написанная на языке Delphi, с программой Ansys Electronics Desktop.

Проектирование генератора начинается с оптимизации геометрии на языке Delphi. При этом в соответствии с ТЗ заказчика и имеющимися данными выбирается уровень оптимизации (рисунок 4.1.1).

3 Синтез и анализ генератора двойного питания

Файл Константы и ограничения Печать отчета Ansys: Matlab Расчет критических частот

Выбор модели

Данные технического задания (4)

Результат

Нормальная конструкция

Обращенная конструкция

Уровни оптимизации: нормальная конструкция

Полная габаритная оптимизация

Оптимизация при известном типе

Оптимизация в заданных габаритах

Повторный расчет

Расчет

Геометрия		Обмоточные данные статора		Обмоточные данные ротора		Объемно-массовые показатели	
Наружный диаметр статора, м	1.11	Кол. эффективных проводников	26	Кол. эффективных проводников	2	Масса зубьев статора, кг	670.38
Внутренний диаметр статора, м	0.805	Кол. параллельных ветвей	3	Кол. параллельных ветвей	1	Масса зубьев ротора, кг	811.26
Наружный диаметр ротора, м	0.8	Число полюсов	6	Число полюсов	6	Масса яра статора, кг	2081.44
Внутренний диаметр ротора, м	0.45	Число пазов на полюс и фазу	5	Число пазов на полюс и фазу	4	Масса яра ротора, кг	1169.08
Количество пазов статора	90	Шаг обмотки	14	Шаг обмотки	12	Масса обмотки статора, кг	633.44
Количество пазов ротора	72	Длина вылета лобовой части, м	0.204	Длина вылета лобовой части, м	0.301	Масса обмотки ротора, кг	512.87
Высота паза статора, м	0.063	Акст. сопротив. фазы обмот. стат., Ом	0.1984	Акст. сопротив. фазы обмот. ротора, Ом	0.0052	Суммарная масса стали, кг	4732.15
Ширина паза статора, м	0.014	Кол. витков в фазе	130	Кол. витков в фазе	24	Суммарная масса меди, кг	1146.31
Высота паза ротора, м	0.08	Сечение эф. проводника, мм ²	18	Сечение эф. проводника, мм ²	300	Полная масса активных частей, кг	5878.47
Ширина паза ротора, м	0.012	Коэф. заполнения паза	0.530612	Коэф. заполнения паза	0.625		
Длина намоточного провода, м	1						
Обобщенные переменные		Вес штрафных коэффициентов		Параметры намоточной цепи		Основные энергетические характеристики	
Коэф. пазово-зуб. слоя ротора (f _{er})	0.527	Штраф по индукции в слепке статора	0	Индукция в зубе статора, Тл	1.422	КПД	0.974765
Коэф. зубчатости ротора (f _{ar})	0.382	Штраф по индукции в слепке ротора	0	Индукция в зубе ротора, Тл	1.483	Номинальный ток обмотки статора, А	222.222
Коэф. пазово-зуб. слоя статора (f _{es})	0.738	Штраф по индукции в зубе статора	0	Индукция в слепке статора, Тл	1.457	Ток возб. в синхронном режиме, А	1540.573
Коэф. зубчатости статора (f _{as})	0.462	Штраф по индукции в зубе ротора	0	Индукция в слепке ротора, Тл	1.373	Магнитный поток, Вб	0.2425
		Штраф по плотности тока в обмот. стат.	0	Индукция в воздушном зазоре, Тл	0.767	ЭДС, В	6600
		Штраф по плотности тока в обмот. ротора	0	Индукция в слепке статора, Тл	1.373	Плотность тока статора, А/мм ²	4.115
		Штраф по КПД	0	Индукция в слепке ротора, Тл	0.767	Плотность тока ротора, А/мм ²	5.135
		Штраф по генерируемой мощности	0	МДС зазора, А	2264.708	Потери в обмотке статора, Вт	25998.26
		Невязка критерия оптимальности	0	МДС намоточной цепи, А	2764.613	Потери в обмотке ротора, Вт	24709.44
				МДС реакции якоря, А	11802.786	Магнитные потери, Вт	11613.6
						Добавочные потери, Вт	18000
						Механические потери, Вт	10000
						Полные потери, Вт	93721.3
						Линейная нагрузка, А/л	68538.773
						Генерируемая мощность, Вт	3620205.5

Рис. 4.1.1. Программы оптимизации геометрии АСГ

Далее результаты расчета оптимальной геометрии и обмоточных данных передаются в программу Ansys Electronics Desktop при помощи предварительно разработанного скрипта.

Дальнейшие действия в программе Ansys Electronics Desktop производятся в следующем порядке.

1. В режиме RMxpprt проводится проверка рассчитанных параметров. Программа Ansys имеет отработанную методику анализа этого типа машин (Generic Rotating Machines). Результаты работы на данном этапе представлены на рисунке 4.1.2.

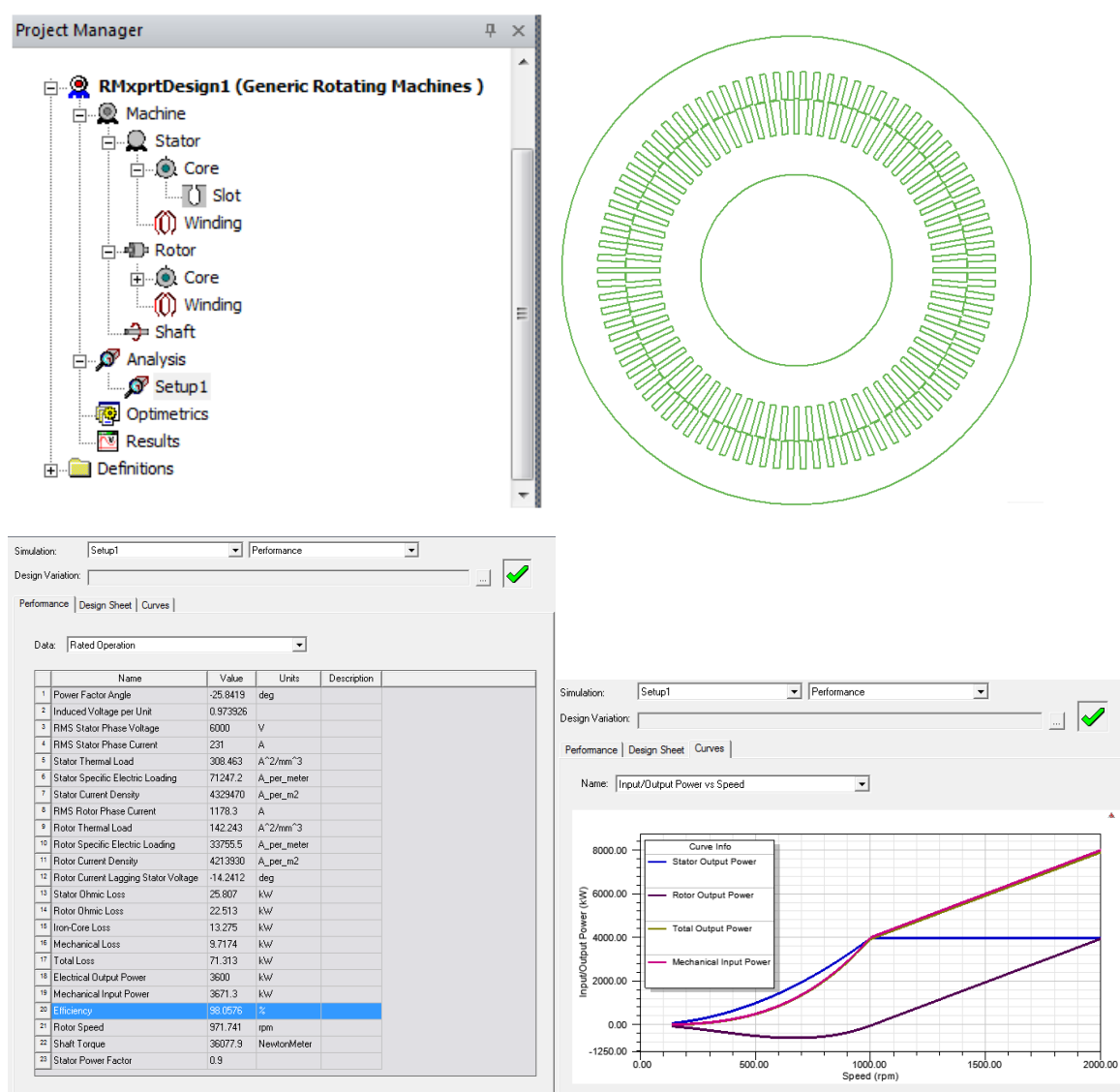


Рис. 4.1.2. Результаты расчета АСГ в Maxwell RMxpprt

На этом этапе анализа проверяется принципиальная возможность получения основных параметров двигателя. При необходимости можно сделать коррекцию результатов оптимизации.

2. Далее расчетная модель экспортируется в режим Maxwell 2D Design, где первоначально решается задача в модуле Magnetostatic. Это выполняется с целью определения правильности расчета величины магнитного потока и настройки сетки конечных элементов. Для этого в обмотке ротора задается ток возбуждения генератора на холостом ходу и определяется кривая распределения индукции в воздушном зазоре. Картина магнитного поля генератора представлена на рисунке 4.1.3. Кривая распределения индукции в воздушном зазоре – на рисунке 4.1.4.

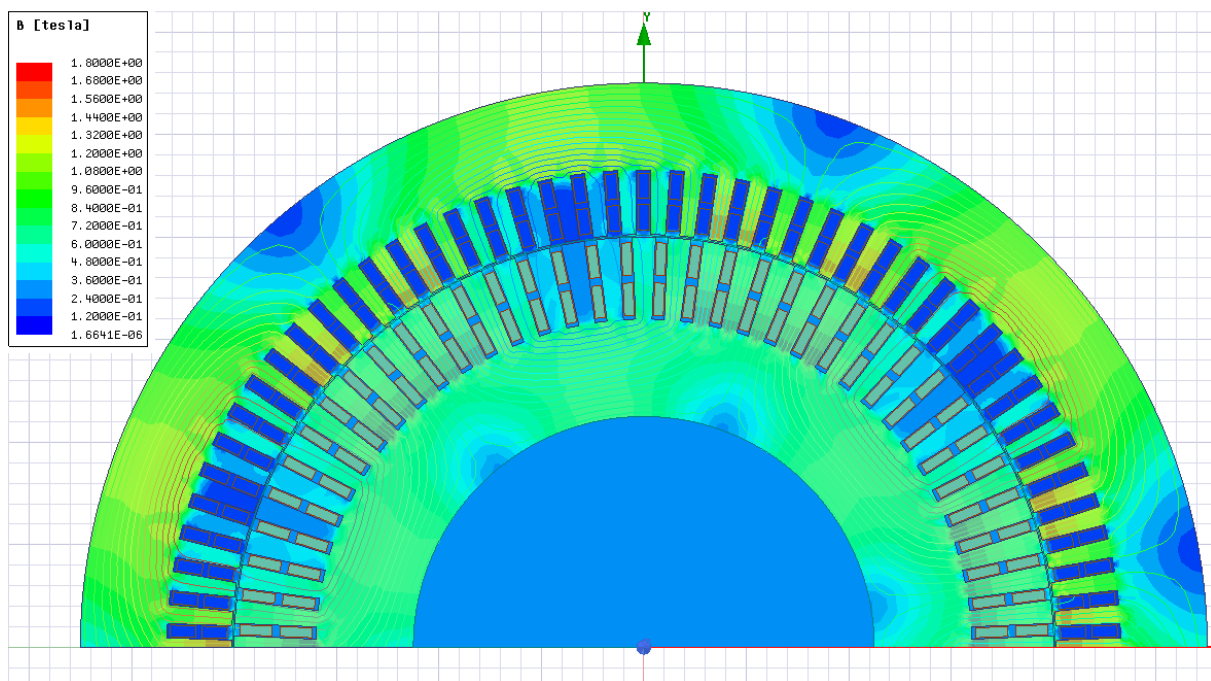


Рис. 4.1.3. Картина магнитного поля генератора на холостом ходу в Ansys Electronics Desktop

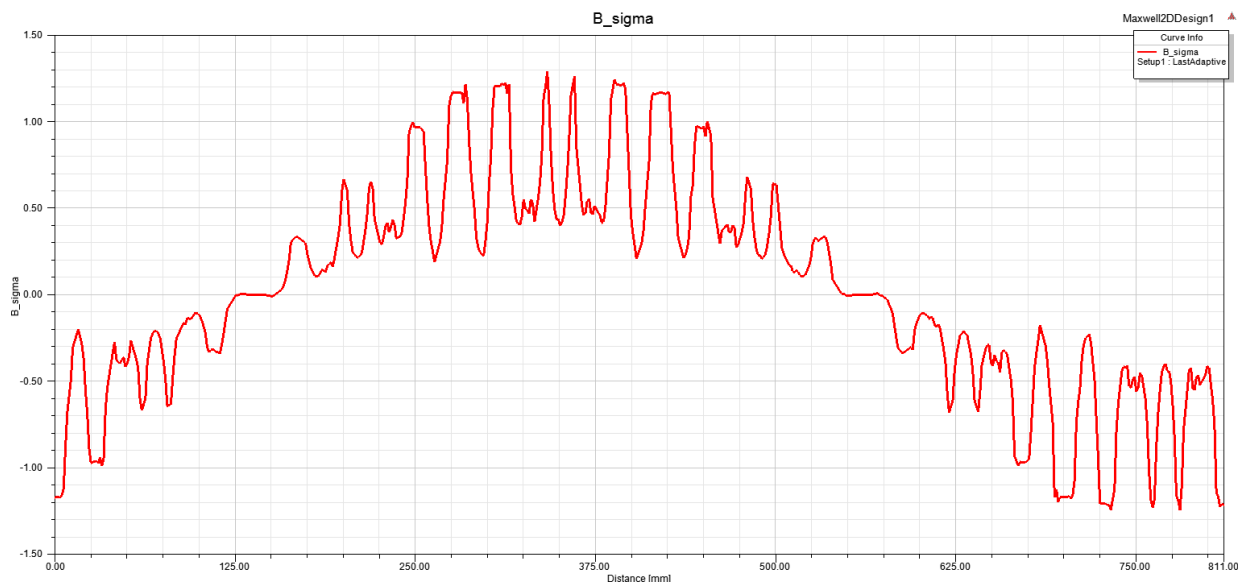


Рис. 4.1.4. Кривая распределения индукции в воздушном зазоре, построенная в Ansys Electronics Desktop

Полученную кривую распределения магнитной индукции в воздушном зазоре можно экспортировать в программный продукт Mathcad, где посредством математических преобразований функцию можно разложить в ряд Фурье и выделить первую гармонику (см. рисунок 4.1.5).

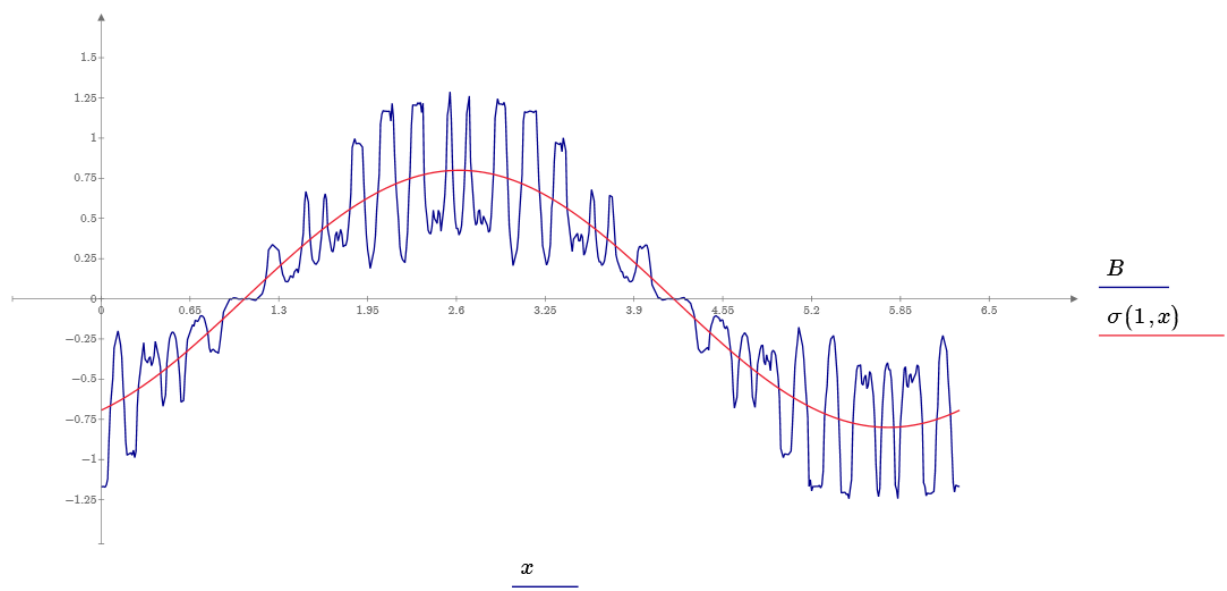


Рис. 4.1.5. Кривая индукции в воздушном зазоре и выделенная первая гармоника индукции в воздушном зазоре в Mathcad

Проведя интегрирование первой гармоники индукции вдоль полюсного деления, определяем по формуле (4.1) функцию магнитного потока (рисунок 4.1.6).

$$\Phi(x) = l_{\delta} \cdot \int_0^{\pi \cdot D / 2p} B_{\delta,1} dx, \quad (4.1)$$

где l_{δ} – активная длина магнитопровода (В); D – средний диаметр по воздушному зазору (м); $B_{\delta,1}$ – функция первой гармоники кривой распределения индукции в воздушном зазоре; p – количество пар полюсов.

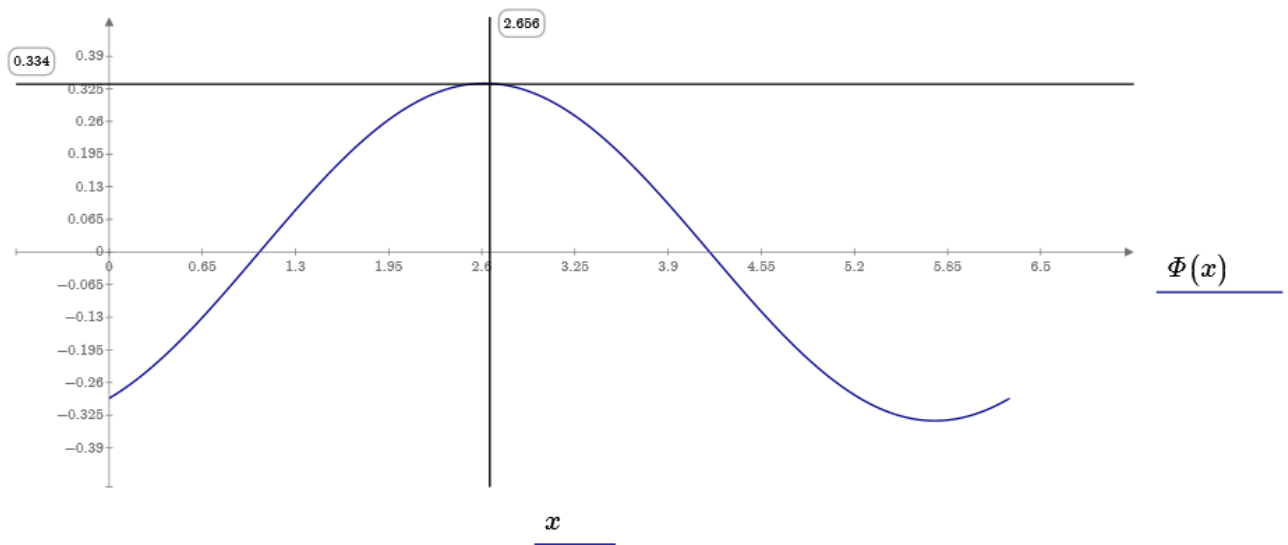


Рис. 4.1.6. Кривая функции магнитного потока в воздушном зазоре от первой гармоники индукции

Разделив амплитудное значение функции магнитного потока на $\pi/2$, получаем среднее значение магнитного потока в воздушном зазоре:

$$\Phi_{\text{сред}} = \frac{\max(\Phi(x))}{\pi/2}, \quad (4.2)$$

где $\max(\Phi(x))$ – амплитудное значение функции магнитного потока (Вб).

Имея на руках все данные по конструктивным параметрам генератора величину магнитного потока можно также вычислить по аналитической формуле:

$$\Phi_{\text{ном}} = \frac{U_f}{4 \cdot k_B \cdot w_1 \cdot k_{ob} \cdot f}, \quad (4.3)$$

где U_f – номинальное фазное напряжение (В), k_B – коэффициент формы поля, w_1 – количество витков в фазе обмотки статора, k_{ob} – обмоточный коэффициент, f – частота напряжения (Гц).

Сравнивая значения потоков $\Phi_{\text{сред}}$ и $\Phi_{\text{ном}}$, а также значения индукций в различных элементах сечения магнитопровода, полученные в Maxwell 2D Design, и значения магнитных индукций, полученные путем аналитического расчета подпрограммы синтеза, можно делать первые выводы о точности аналитического расчета в программе оптимизации. Также производится настройка размеров сетки конечных элементов для последующего экспорта в модуль Transient.

3. На следующем этапе модель подвергается расчету в модуле Transient. Как уже было отмечено в предыдущих главах, машина двойного питания может работать в различных режимах скорости вращения ротора: досинхронной, синхронной и сверхсинхронной. Изначальный расчет в программе оптимизации геометрии производился для синхронного режима. Соответственно, логичным будет первоначально проанализировать в модуле Transient данный режим работы.

С этой целью в двух из трех фаз обмотки ротора задается постоянный ток и в цепи обмотки статора задается номинальная нагрузка (рисунок 4.1.7).

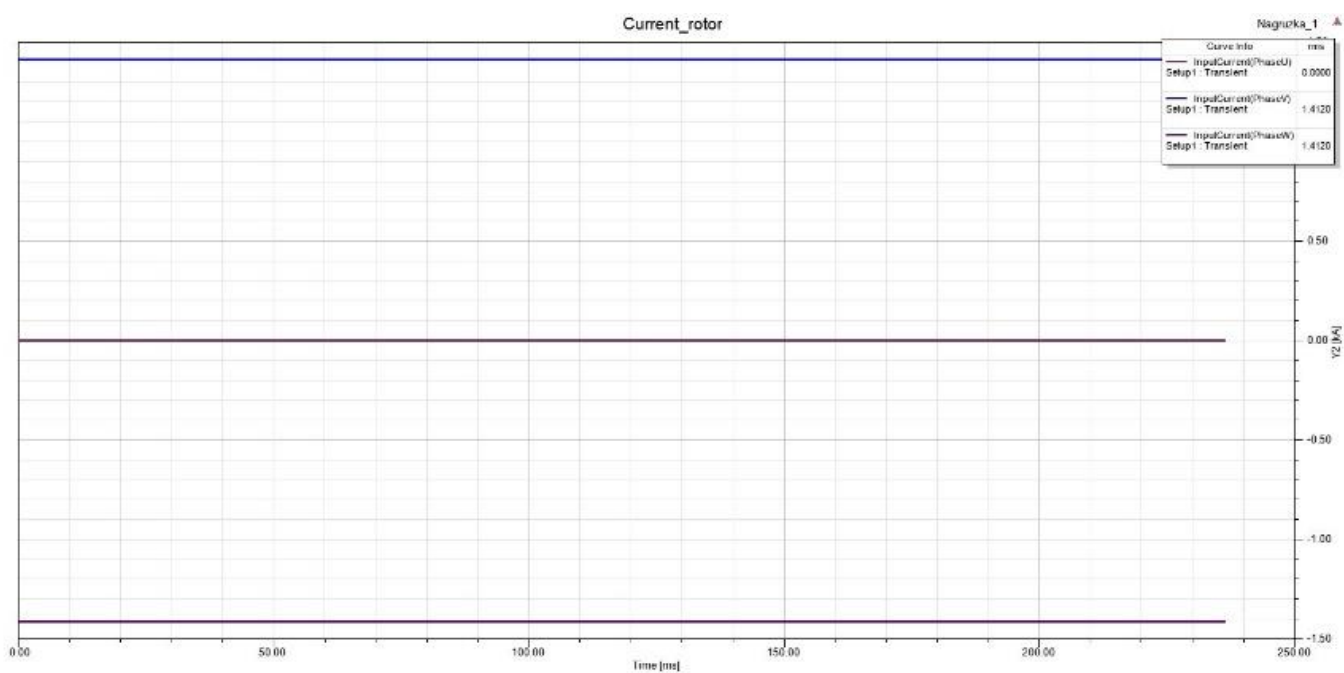


Рис. 4.1.7. График токов, заданных в обмотке ротора при синхронной скорости вращения ротора

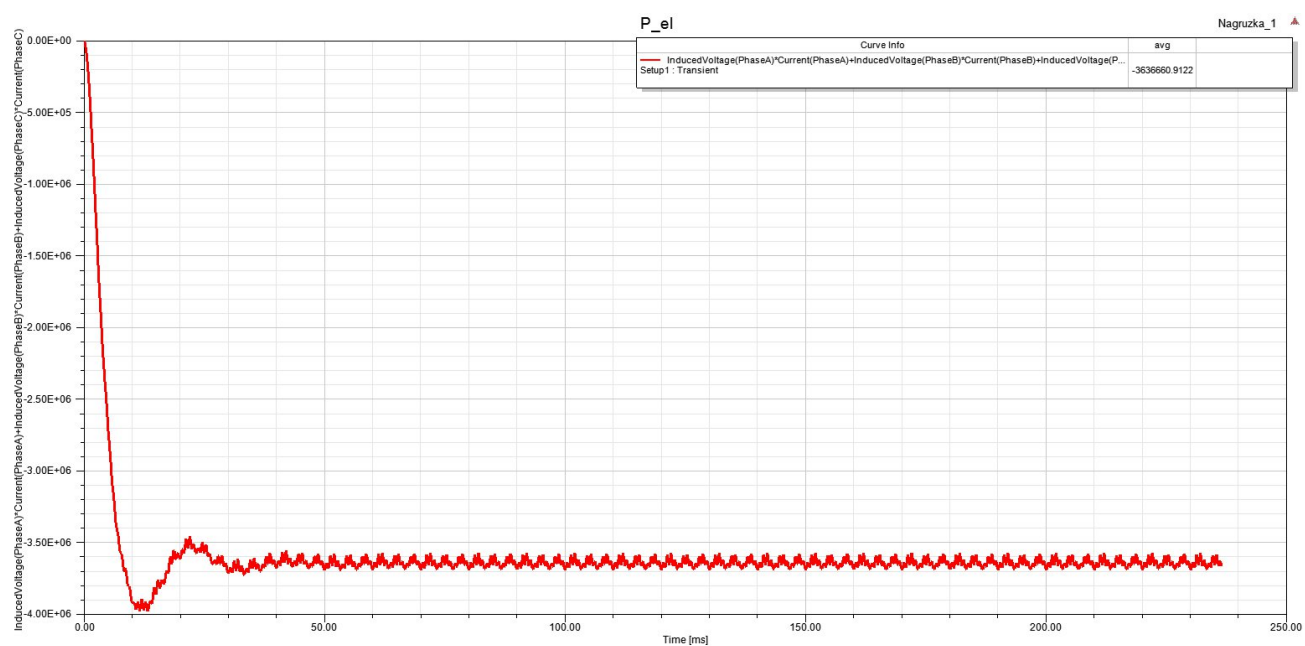


Рис. 4.1.8. Расчёт генерируемой мощности при синхронной скорости вращения ротора

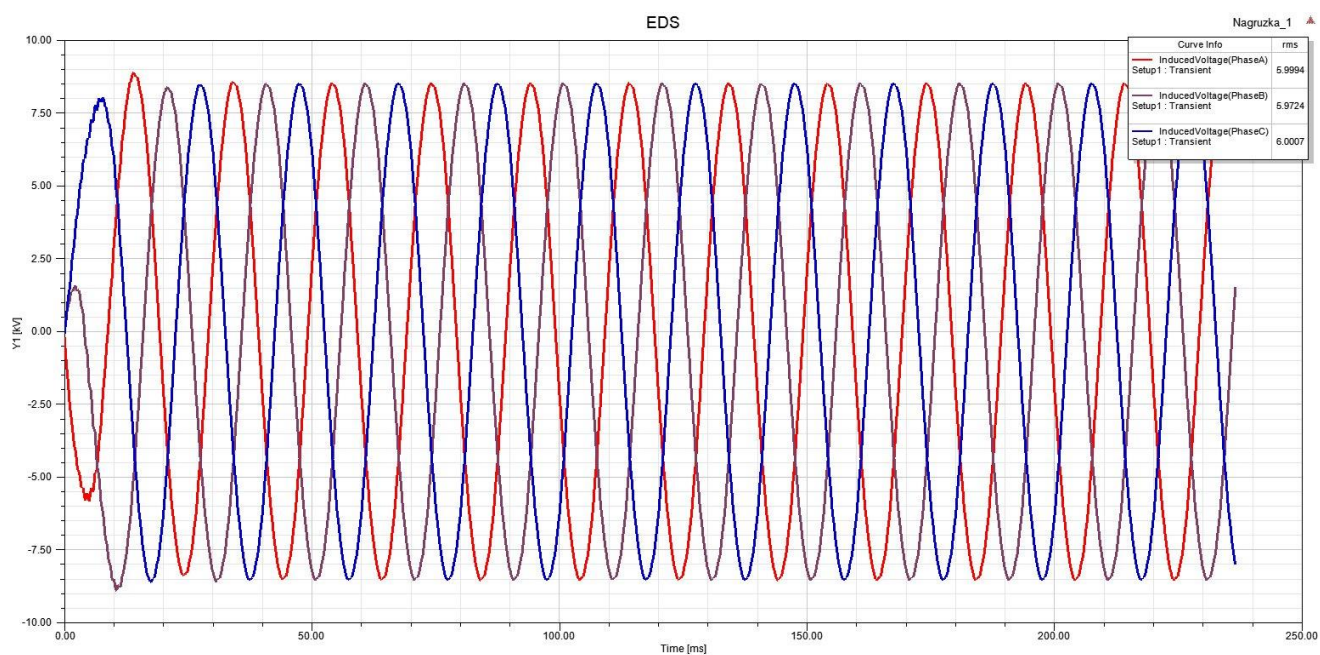


Рис. 4.1.9. Расчёт ЭДС в обмотке статора при синхронной скорости вращения ротора

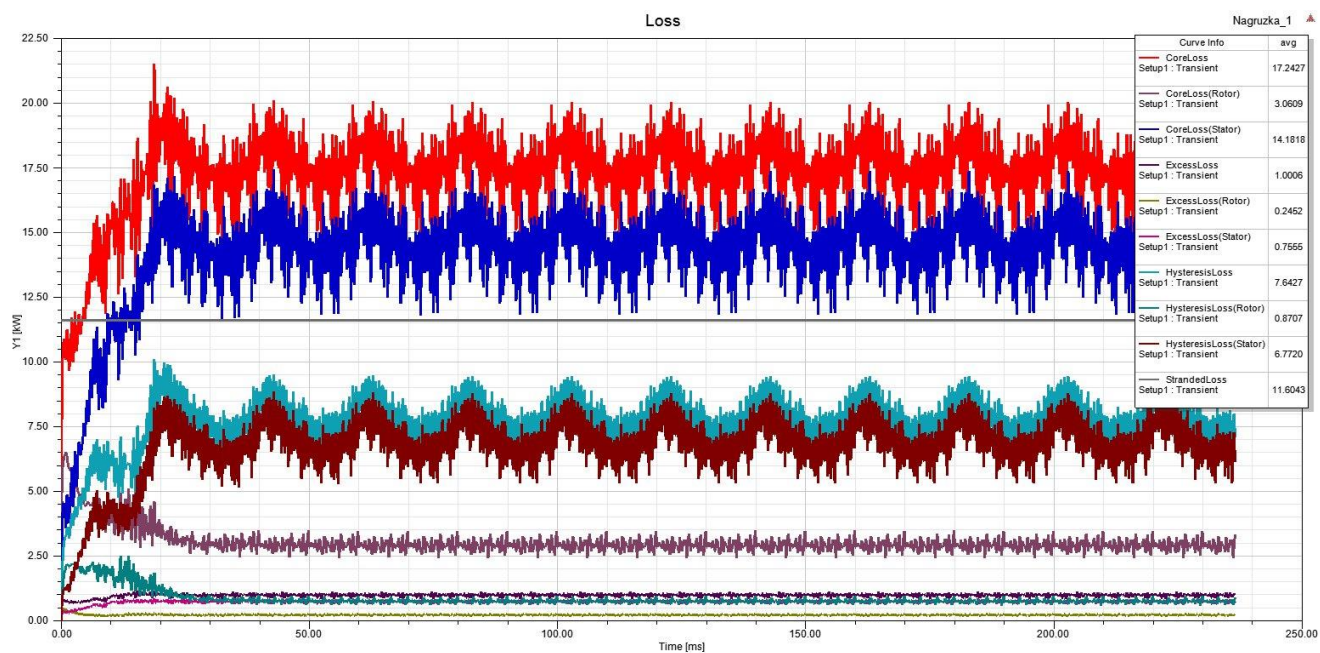


Рис. 4.1.10. Расчёт потерь в генераторе

На данном этапе сравниваются результаты, полученные расчетом по программе оптимизации и методом конечных элементов (рисунки 4.1.8–4.1.10), и производится окончательная отладка расчетной модели.

4. Заключительным этапом анализа электромагнитного состояния в Maxwell 2D Design является анализ генератора в досинхронном и сверхсинхронном режимах работы в модуле Transient. С этой целью в обмотках ротора задается переменное напряжение необходимой частоты и фазы, зависящей от скорости вращения ротора и режима работы (рисунок 4.1.11).

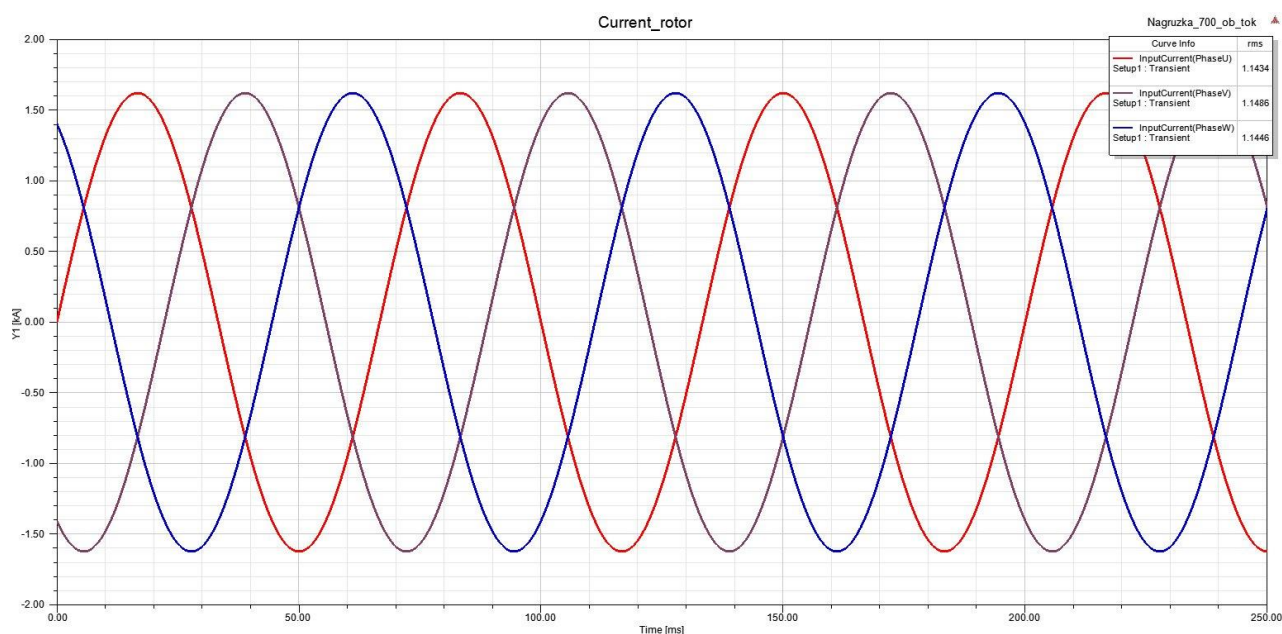


Рис. 4.1.11. График токов, заданных в обмотке ротора при досинхронной скорости вращения ротора

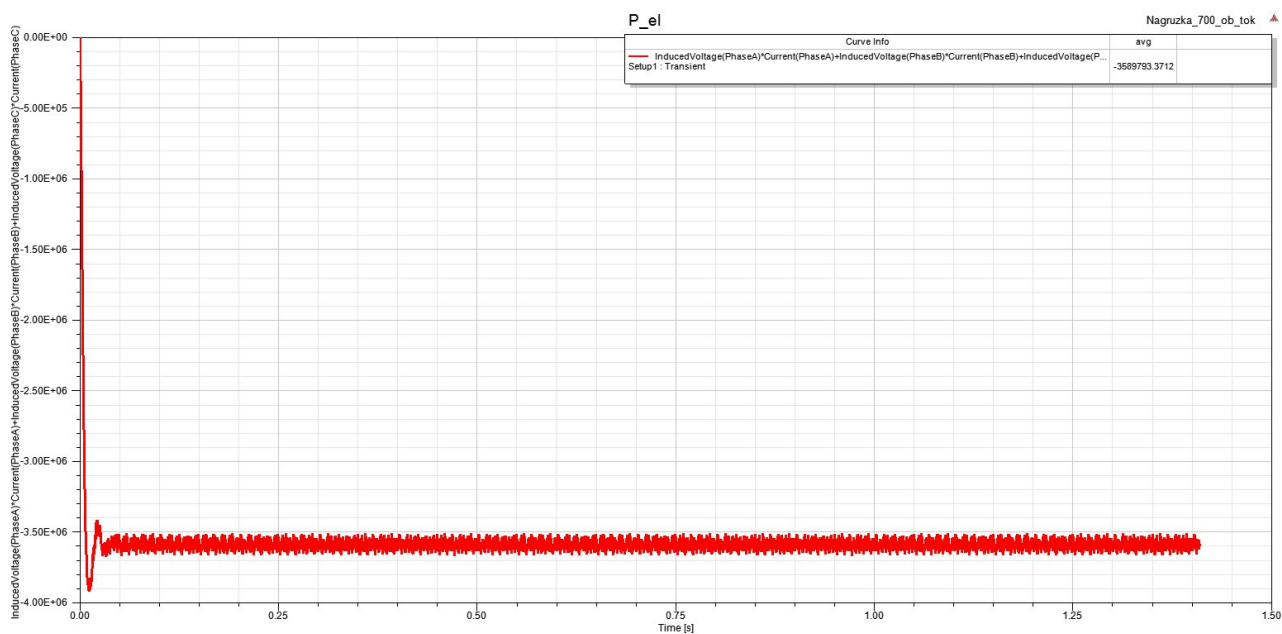


Рис. 4.1.12. Расчёт генерируемой мощности при досинхронной скорости вращения ротора

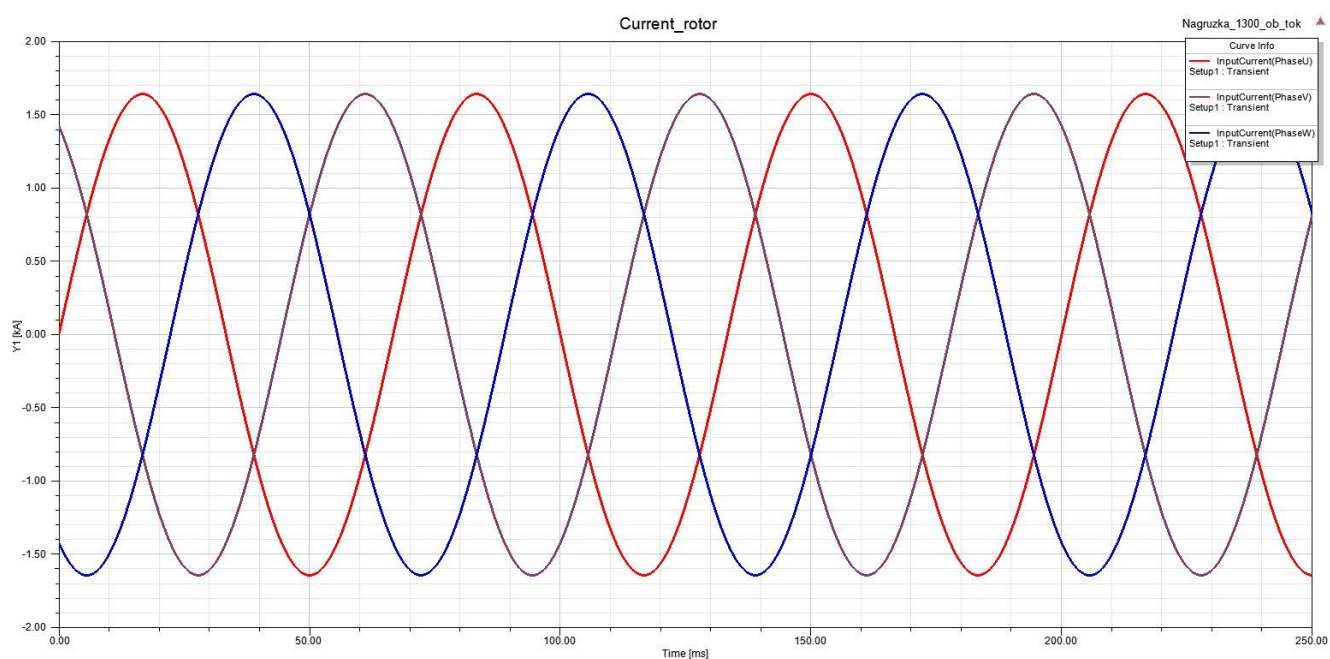


Рис. 4.1.13. График токов заданных в обмотке ротора при сверхсинхронной скорости вращения ротора

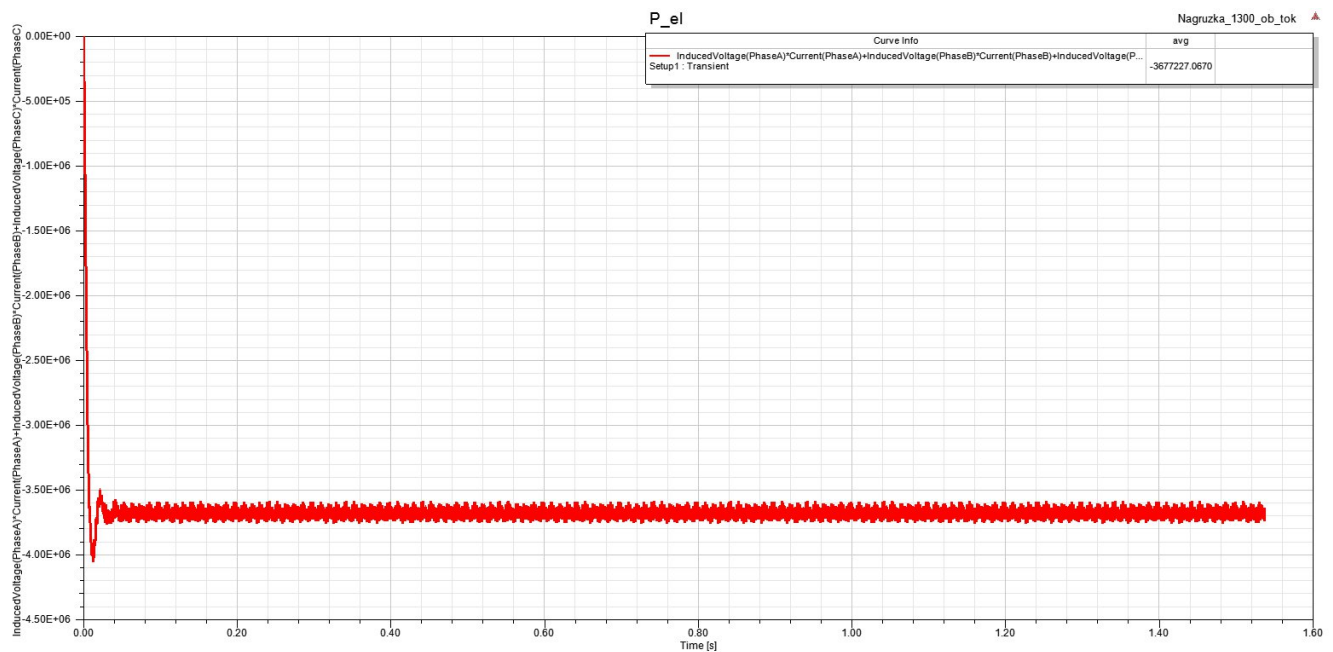
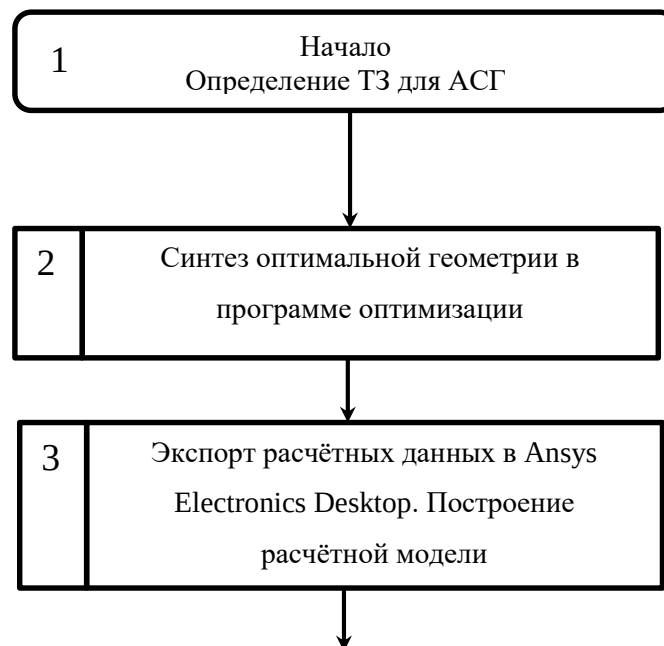


Рис. 4.1.14. Расчёт генерируемой мощности при сверхсинхронной скорости вращения ротора

Представленный порядок действий позволяет в полной мере осуществить точный анализ электромагнитного состояния генератора с минимальными затратами времени (рисунки 4.1.12–4.1.14). Алгоритм такого порядка действий дан на рисунке 4.1.15.



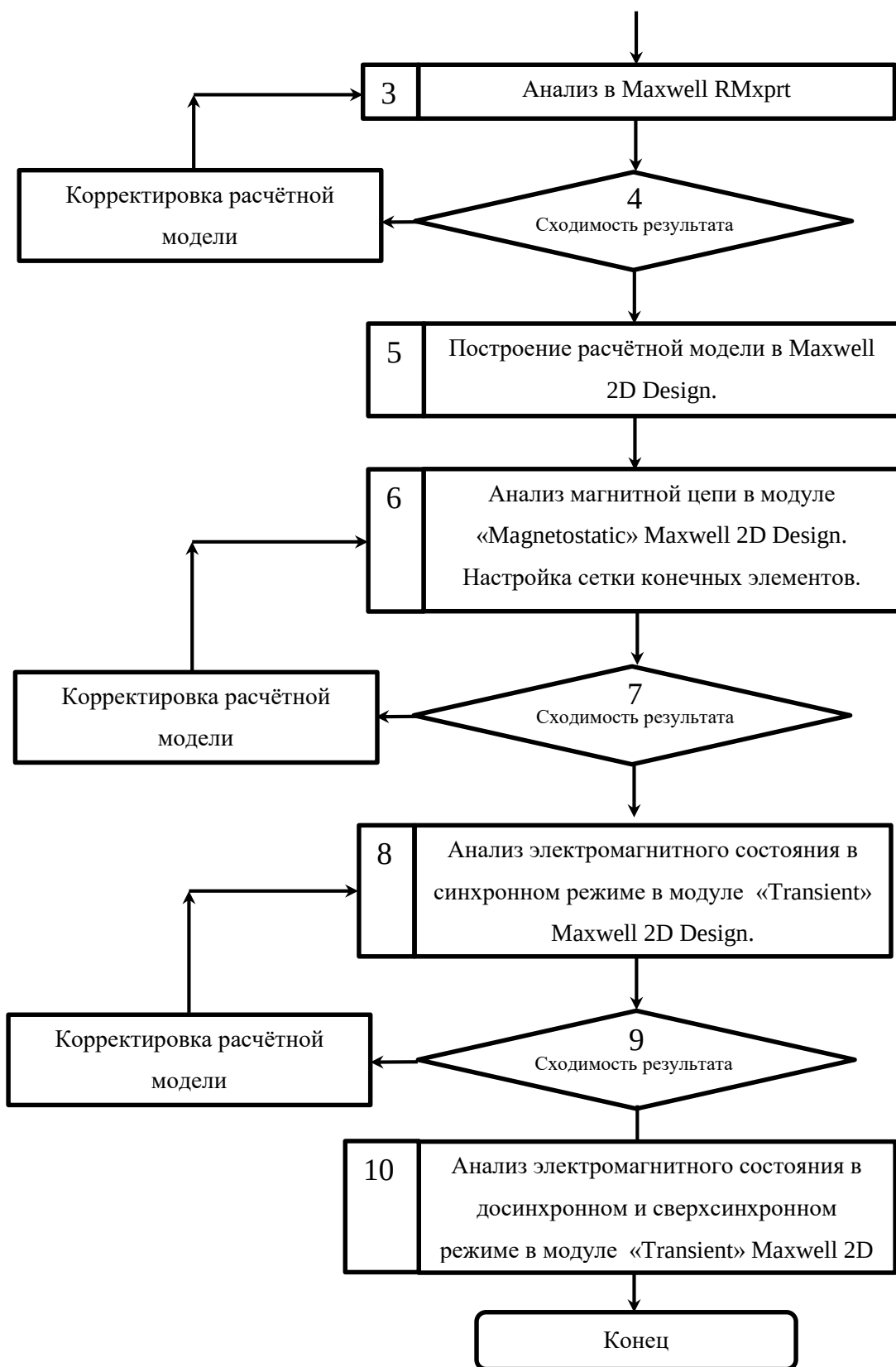


Рис. 4.1.15. Функциональная схема алгоритма анализа электромагнитного состояния

Построение проектной системы производится по данному алгоритму. Стоит отметить, что на этапе проверки проектной системы выполнялось проектирование генератора под технические требования, взятые с имеющегося изделия фирмы АВВ. Перечень технических характеристик представлен ниже:

- номинальная мощность – 3,6 МВт;
- диапазон рабочей скорости вращения ротора – 670–1330 об/мин;
- максимальная скорость вращения ротора – 2 300 об/мин;
- номинальное напряжение – 6 000 В;
- частота питания – 50 Гц;
- требуемый КПД – 97,5 %;
- номинальный коэффициент мощности – 0,9;
- высота оси вращения – 630 мм;
- конструктивная масса – 12 т.

В результате тестирования проектной системы расхождения между результатами расчета (КПД, генерируемая мощность, ток возбуждения потока, ЭДС) в программе оптимизации и анализом синхронного режима в Maxwell 2D Design были минимальны и составили:

- генерируемая мощность – 0,5 %;
- генерируемое фазное напряжение – 3 %;
- магнитный поток – 3 %;
- ЭДС вращения – 3 %;
- КПД – 0,5 %.

Для инженерной практики данную точность следует признать вполне приемлемой.

Проектная система была применена при проектировании АСГ для ветроустановки 3,6 МВт и показала положительные результаты. Информация по данному проекту приведена в приложении В.

4.2. Анализ теплового состояния асинхронизированного синхронного генератора посредством решения связанной задачи теплового и вентиляционного расчёта в программной среде MATLAB SIMULINK

К современным генераторам для ВЭУ предъявляются высокие требования, касающиеся надежности и ресурса. Основной причиной выхода из строя рассматриваемого типа электрических машин является повреждение обмоток вследствие термического воздействия [15, 29]. Работа генератора даже при незначительном превышении класса нагревостойкости значительно сокращает ресурс изоляции. Конечно, изначально в конструкцию можно заложить систему изоляции с низким классом нагревостойкости и постараться обеспечить существенный запас между фактической температурой обмоток и допустимой, но это неизбежно приведет к повышению себестоимости конечного изделия. В связи с этим вопрос оптимизации конструкции электрической машины напрямую затрагивает и выбор класса нагревостойкости изоляции. Поэтому крайне важно проведение теплового анализа проектируемого генератора.

Следует отметить, что тепловой анализ представляет собой сложную техническую задачу. На основе обзора литературы по данному вопросу [7, 8, 31, 32, 55, 57–59, 67, 70, 73–75, 82] и имеющегося опыта по проектированию электрических машин можно сделать вывод, что в расчетной практике на сегодняшний день применяется четыре подхода к расчету теплового состояния (таблица 4.2.1).

Рассматривая представленную в таблице 4.2.1 классификацию, можно отметить, что, преследуя в качестве цели высокую точность расчета, приходится жертвовать расчетным временем и вычислительными ресурсами, поэтому на практике расчет теплового поля при помощи метода конечных элементов стараются производить только на завершающем этапе проектирования изделия. Из всех представленных подходов к расчету решение связанной вентиляционно-тепловой задачи с помощью аналитической схемы замещения выглядит золотой

серединой между точностью, сложностью и временем расчета. Современные программные средства содержат библиотеки стандартных аэродинамических и тепловых элементов, что позволяет не составлять объемных систем уравнений, как этого требует традиционный метод аналитических схем замещения [8, 31, 42, 58, 70]. Подобным программным средством служит MATLAB SIMULINK. В данной программе имеются библиотеки Simscape Gas и Simscape Thermal, содержащие аэродинамические и тепловые элементы, между которыми возможна организация взаимосвязи. Перед построением модели для анализа теплового состояния генератора необходимо определиться с конструкцией и способом охлаждения. Анализ существующих генераторов для ВЭУ показывает, что в подавляющем большинстве из них использованы методы охлаждения IC666 или IC86W по ГОСТ Р МЭК 60034–6–2012.

Таблица 4.2.1

Описание подходов к расчёту теплового состояния

Подход к расчету	Сложность	Точность	Требования к вычислительным ресурсам	Применимость на практике	Длительность расчета	Примечания
Раздельное решение вентиляционной задачи методом схем замещения и раздельное решение тепловой задачи методом схем замещения	Средняя (зависит от количества элементов схемы)	Низкая (абстрактность модели не позволяет разделить ошибки и допущения)	Низкие Метод может быть реализован при любом расчетном программном обеспечении	Используется повсеместно для проектировочных и оптимизационных расчетов, где требуется скорость расчета.	Высокая при составлении модели Низкая при использовании готовой модели	Геометрия твердых тел электрической машины сильно упрощается до элементов тепловых сопротивлений. Результат крайне чувствителен к построению схемы. Требуется отладка схемы по результатам опытных данных.
Решение связанной вентиляционно-тепловой задачи с помощью аналитической схемы замещения	Средняя (зависит от количества элементов схемы)	Средняя (абстрактность модели не позволяет разделить ошибки и допущения)	Средние Метод требует специализированного ПО (Matlab Simulink, Vissim и др.)	Используется редко, поскольку метод появился сравнительно недавно с расширением библиотеки Matlab Simulink и Vissim.	Высокая при составлении модели Низкая при использовании готовой модели	Геометрия твердых тел электрической машины сильно упрощается до элементов тепловых сопротивлений. В построении модели можно использовать готовые блоки тепловых и аэродинамических сопротивлений, которые с хорошей точностью учитывают нелинейность процессов.

Решение вентиляционной задачи с помощью аналитических схем замещения, а тепловой задачи методом конечных элементов трехмерной модели	Высокая	Высокая (при сверке коэффициентов конвекции с опытными данными)	Высокие Решение задачи методом конечных элементов требует больших компьютерных мощностей и специализированного ПО (Ansys Iserak и др.)	Используется часто для проективных и оптимизационных расчетов электрических машин	Высокая при составлении модели Высокая при использовании готовой модели	Точность расчета в большей степени зависит от достоверности коэффициентов конвективного теплообмена
Решение совмещенной трехмерной вентиляционно-тепловой задачи методом конечных элементов	Высокая	Высокая (при условии построения правильной сеточной модели и сходимости результата)	Высокие Требуется специализированное ПО (Ansys fluent или Ansys CFX), а также мощный расчетный сервер. В газодинамике много нелинейностей, которые растягивают расчет МКЭ на месяцы, при этом сходимость не гарантирована	Использование ограничено из-за большой сложности расчета и высоких требований к вычислительным ресурсам. Поэтому используется только в частных случаях.	Крайне высокая при составлении модели. Крайне высокая при использовании готовой модели	Сложность связана с построением сеточной модели. Для точного результата элемент сетки должен быть меньше самого маленького вихря. Из-за сложности геометрии некоторых элементов электрической машины требуется их упрощение, что сводит на нет желаемую точность при использовании данного метода.

Оба метода охлаждения заключаются в перемещении хладагента по замкнутому циклу с помощью установленного на машине устройства, получающего энергию независимо от ее скорости (то есть на машине устанавливается вентилятор с собственным электродвигателем). В качестве основного хладагента выступает воздух. Разница только в том, что для IC666 применяется теплообменник, использующий окружающую среду (воздух), а для IC86W – теплообменник, использующий промежуточную среду (воду). Схемы вентиляции представлены на рисунках 4.2.1 и 4.2.2.

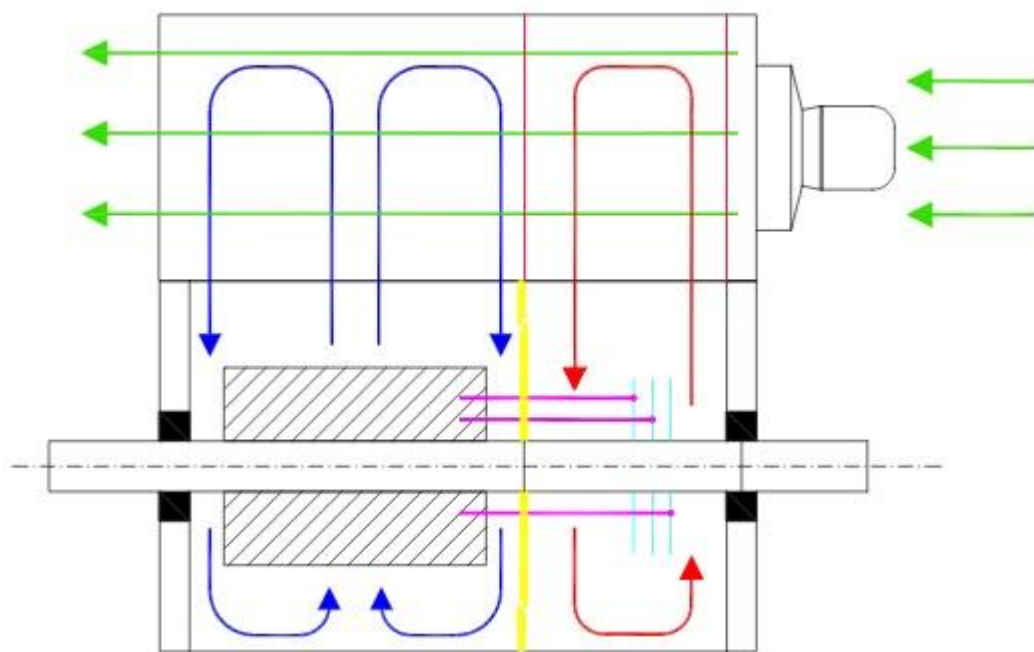


Рис. 4.2.1. Схема метода охлаждения IC666

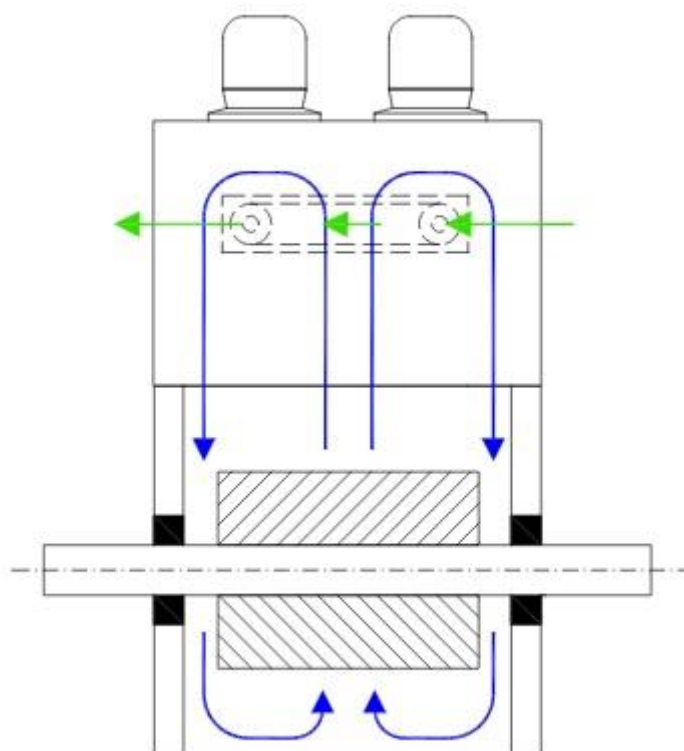


Рис. 4.2.2. Схема метода охлаждения IC86W

Использование для циркуляции воздуха независимого вентилятора вместо вентиляторов, устанавливаемых на роторе генератора, объясняется тем, что ВЭУ должна работать в широком диапазоне скоростей вращения, а характеристики вентилятора зависят от скорости вращения. Применение же независимого вентилятора позволяет обеспечить постоянное значение расхода и давления охлаждающего воздуха.

Также перед построением модели необходимо рассмотреть систему вентиляции активных частей генератора. Как правило, электрические машины переменного тока большой мощности выполняются с радиальной системой вентиляции, то есть сердечники статора и ротора содержат радиальные вентиляционные каналы, предназначенные для циркуляции охлаждающего воздуха. Дополнительно нужно отметить, что при большой активной длине сердечника статора его делят на неравномерные субпакеты: крайние – более толстые, ближе к центру сердечника – более тонкие. Эскиз сердечника разработанного генератора представлен на рисунке 4.2.3.

В многополюсных электрических машинах часто выполняют аксиальные каналы в сердечнике ротора для улучшения охлаждения. Радиальные каналы в сердечнике ротора выгоднее располагать не по всей длине сердечника, как в случае со статором, а только в центре. Эскиз электрической машины с радиальной системой вентиляции и методом охлаждения IC86W представлен на рисунке 4.2.4 (стрелками показано направление движения охлаждающего воздуха).

Стоит отметить, что за счет радиальной системы вентиляции электрическая машина имеет симметрию по поперечной оси, это при построении расчетной модели позволяет учитывать только половину сердечника машины, половину потерь и расхода охлаждающего воздуха.

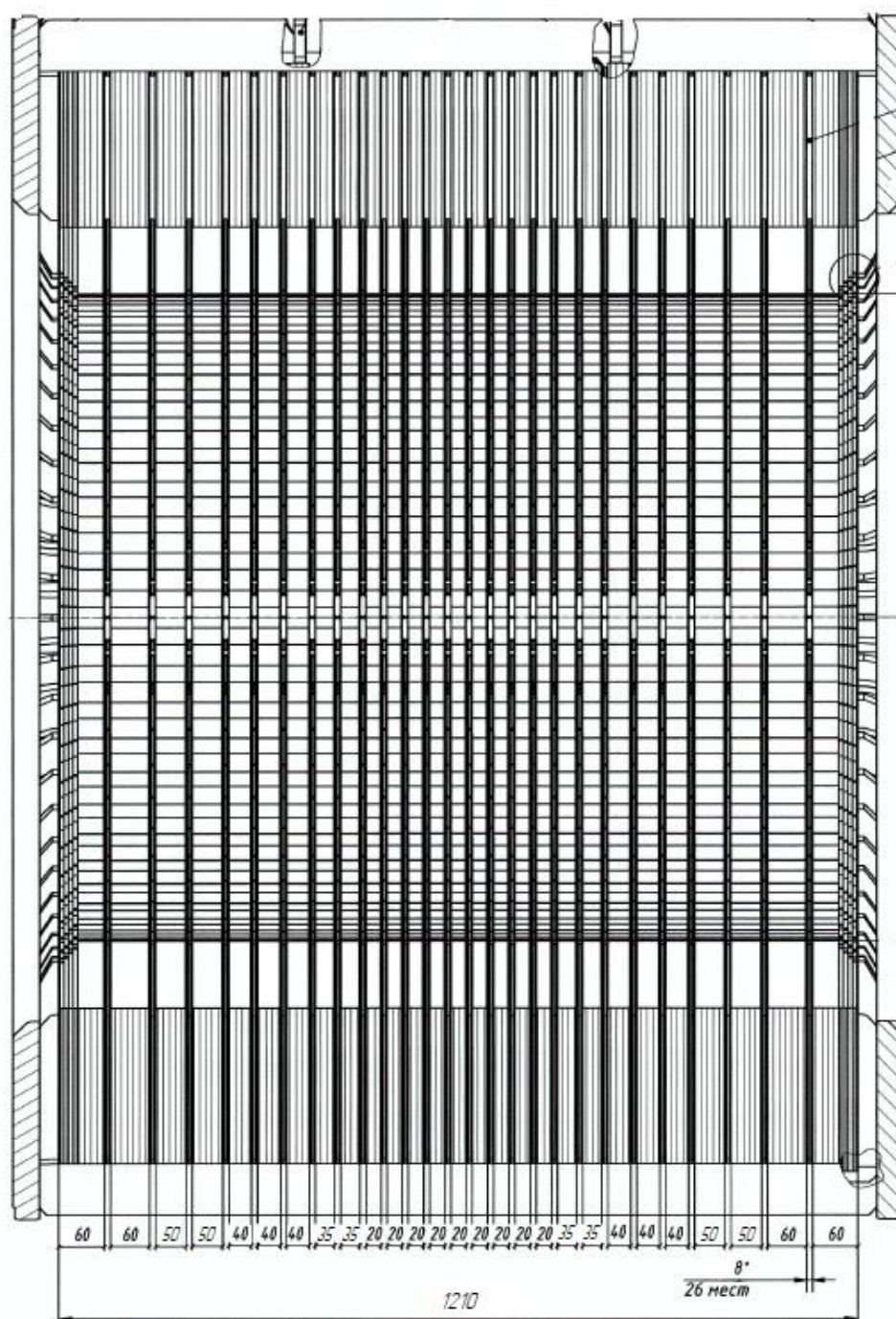


Рис. 4.2.3. Эскиз сердечника статора АСГ

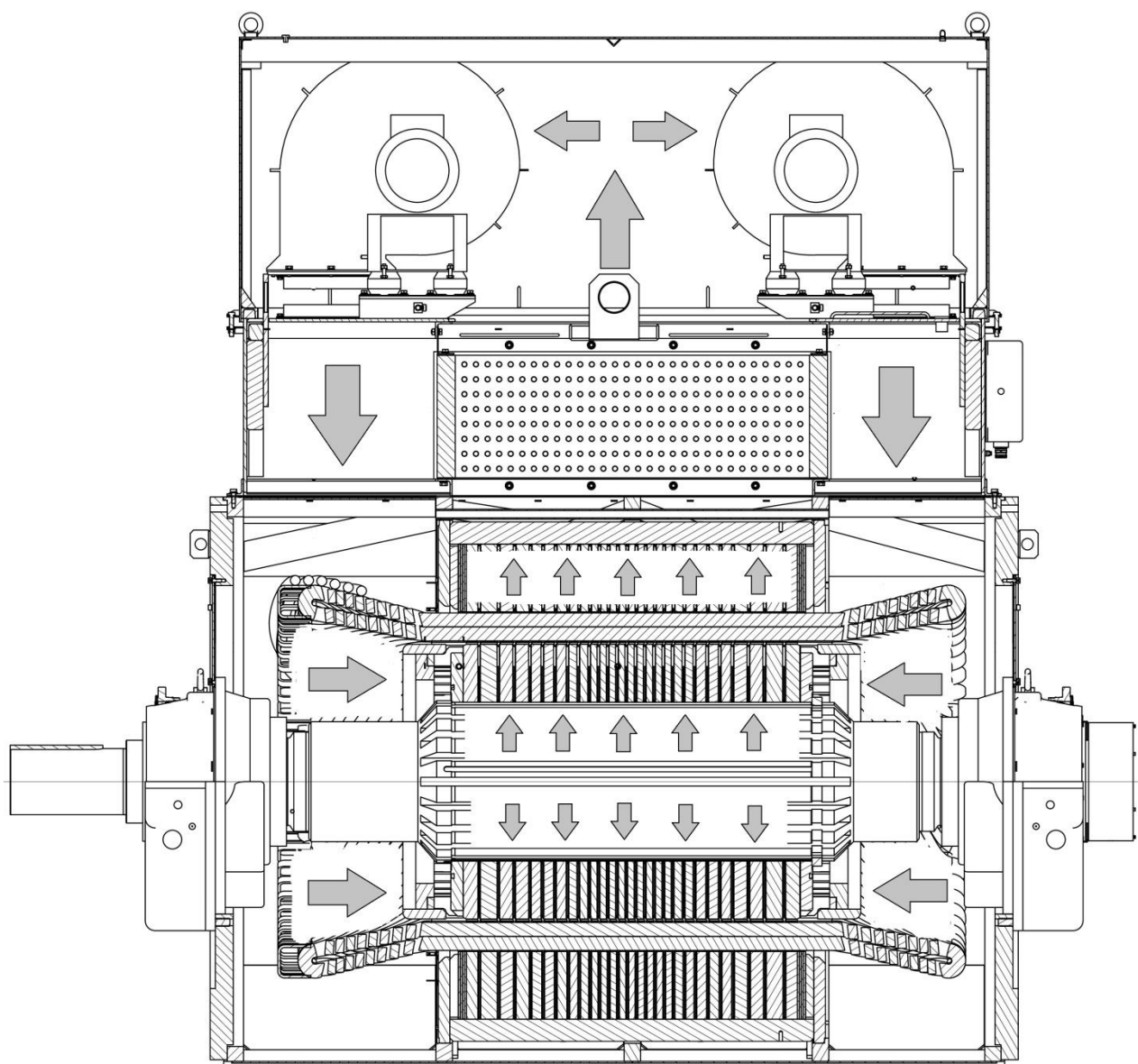


Рис. 4.2.4. Эскиз электрической машины с радиальной системой вентиляции и методом охлаждения IC86W

Имея данные по конструктивному устройству активных частей генератора и системы охлаждения, можно выстроить расчетную модель в MATLAB SIMULINK с использованием блоков библиотек Simscape Gas и Simscape Thermal.

Элементы вентиляционной цепи моделируются блоками Local Restriction (локальное сопротивление) и Pipe (трубка). Элемент Local Restriction учитывает баланс энергии и баланс момента, также учитывает температурные изменения газа

в результате потери давления. Элемент Pipe моделирует динамику потока в газовой сети и позволяет учитывать потери вязкого трения и конвективный теплообмен со стенкой трубы.

Элементы тепловой цепи моделируются блоками Thermal mass (тепловая масса), Thermal resistance (тепловое сопротивление), Conductive Heat Transfer (блок теплообмена), Heat Flow Rate (источник тепла постоянной мощности).

Подробное математическое описание данных блоков приведено в Mathworks help [118].

Разработанная модель генератора для решения задачи теплового и вентиляционного расчета (рисунок 4.2.5) включает пять основных блоков, каждый из которых состоит из более мелких элементов. Фиолетовыми линиями показаны вентиляционные связи, оранжевыми – тепловые.

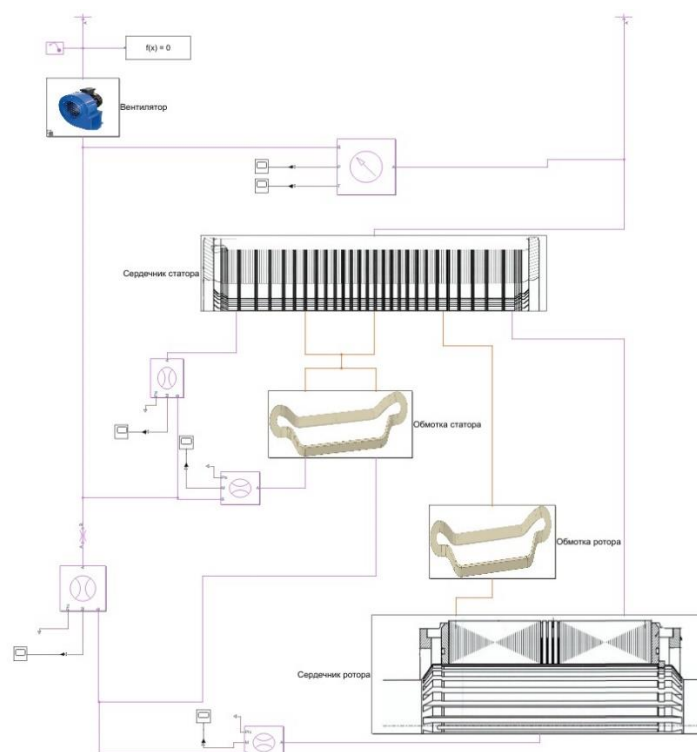


Рис. 4.2.5. Модель для решения связанной задачи для теплового и вентиляционного расчёта построенная в MATLAB SIMULINK с использованием блоков библиотек Simscape Gas и Simscape Termal

Далее по тексту раскрываются блоки и описываются элементы схемы, представленной на рисунке 4.2.6. В дереве модели выделен тот элемент, о котором идёт речь.

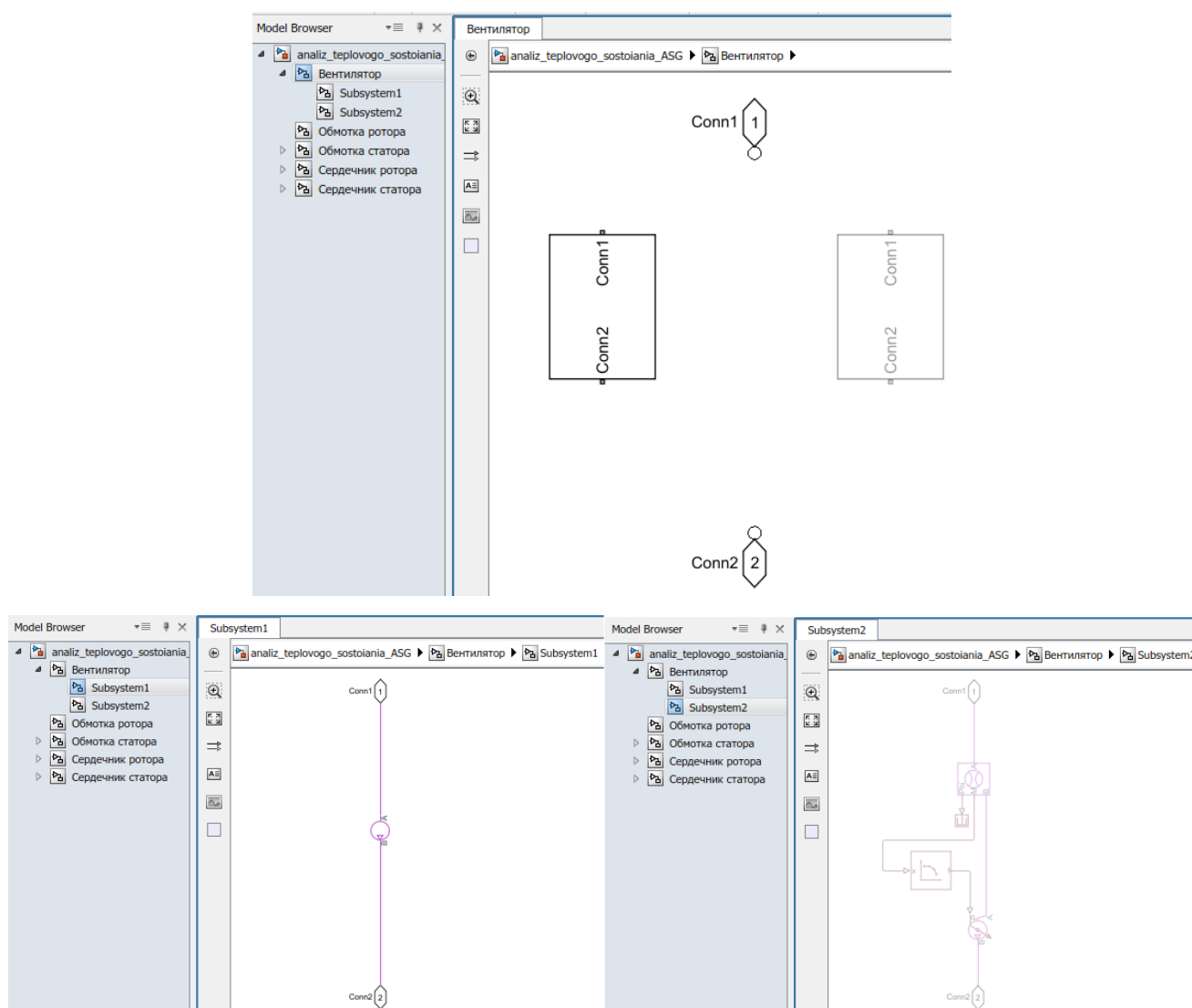


Рис. 4.2.6. Блок «вентилятор»

Расчёт может проводиться с использованием двух вариантов вентилятора: 1 – источник постоянного расхода, 2 – источник давления с реальной вентиляторной характеристикой.

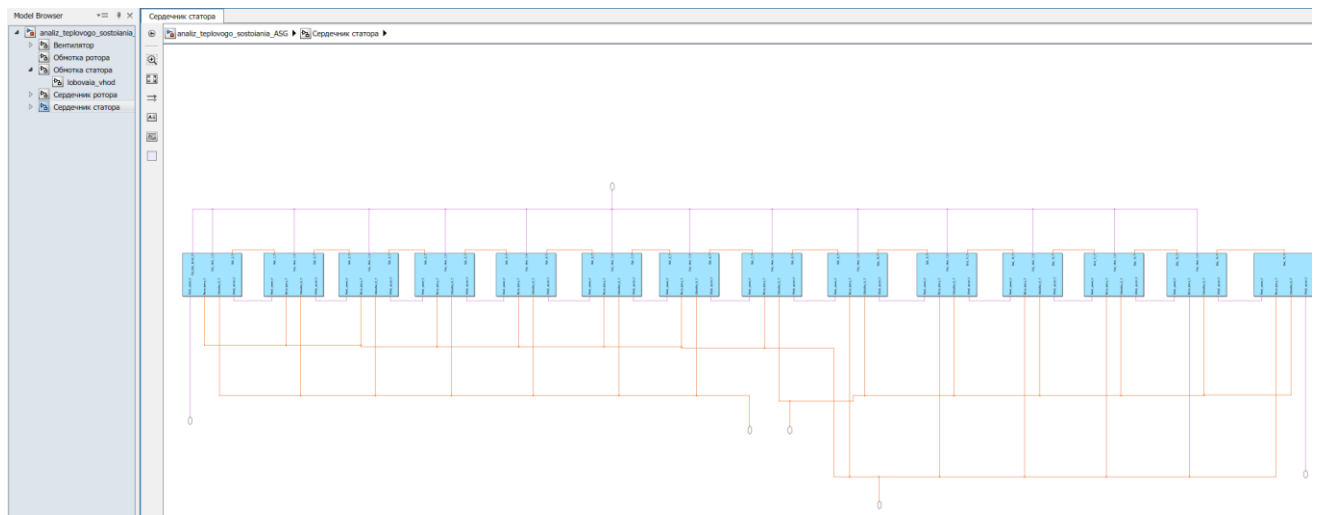


Рис. 4.2.7. Блок «сердечник статора»

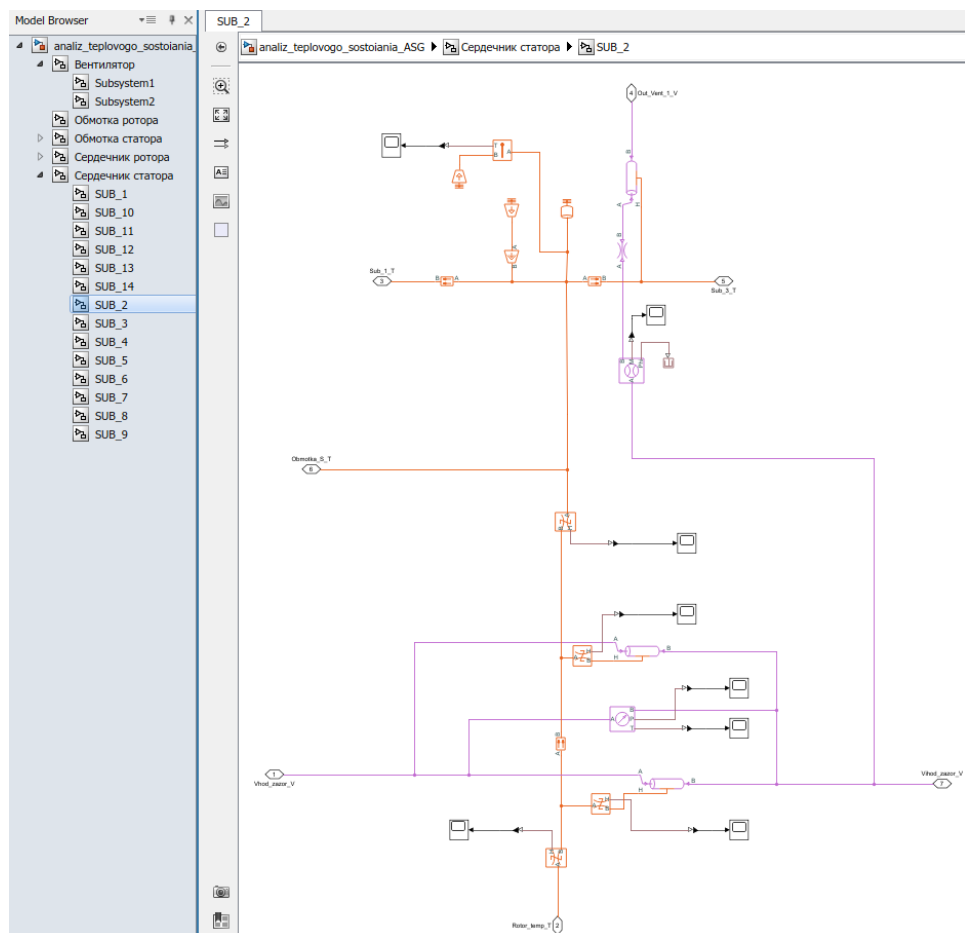


Рис. 4.2.8. Модель субпакета статора

Сердечник статора проектируемого генератора состоит из 27 субпакетов, разделенных между собой радиальными вентиляционными каналами, поэтому блок сердечника разбит на несколько более мелких блоков, каждый из которых моделирует отдельный субпакет, воздушный зазор под субпакетом и радиальный вентиляционный канал.

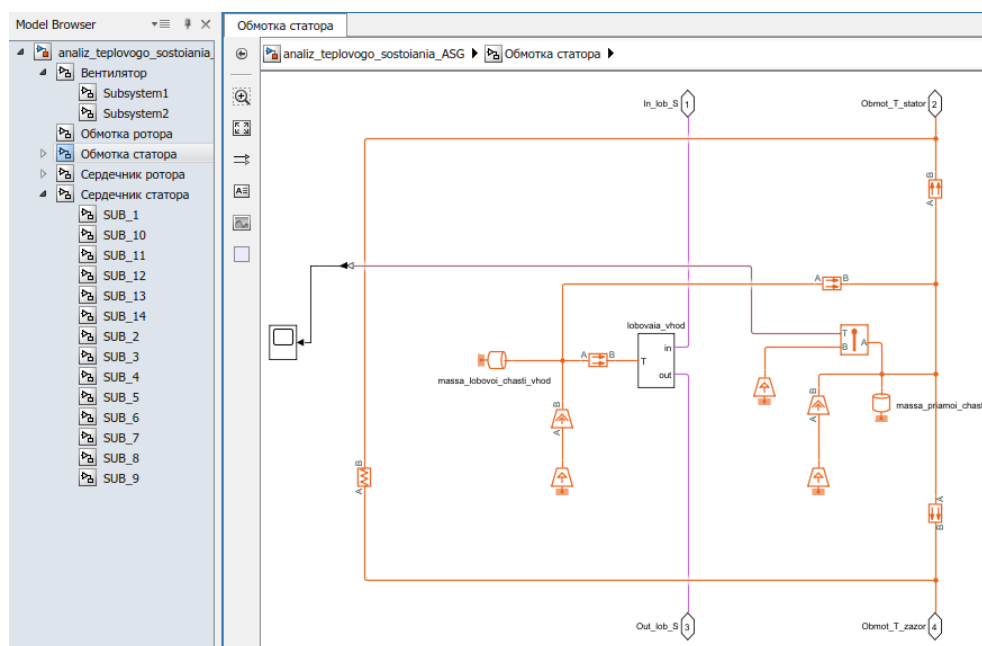


Рис. 4.2.9. Блок «обмотка статора»

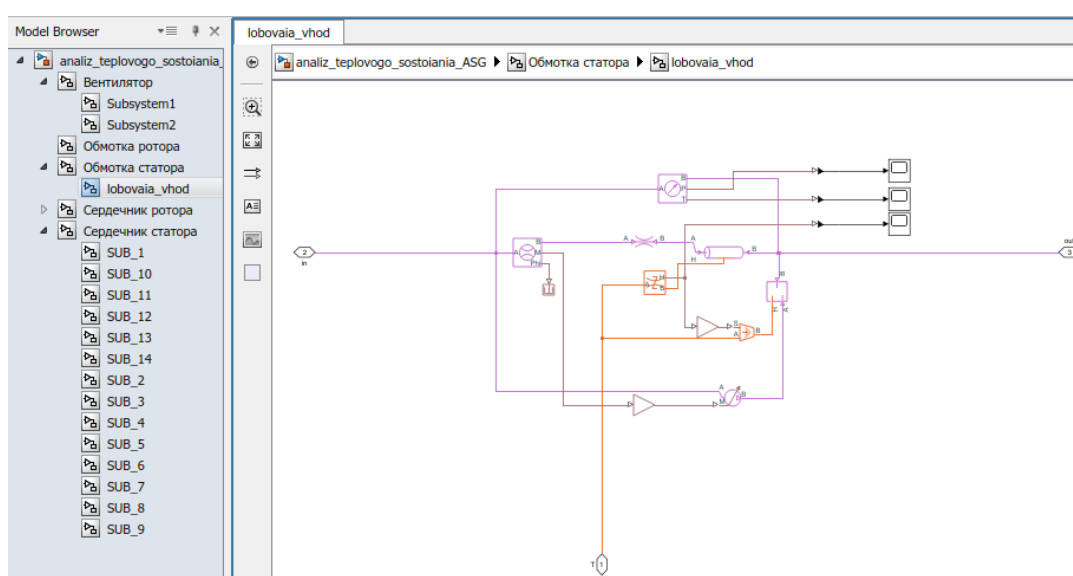


Рис. 4.2.10. Модель учёта прохождения воздуха через лобовую часть обмотки

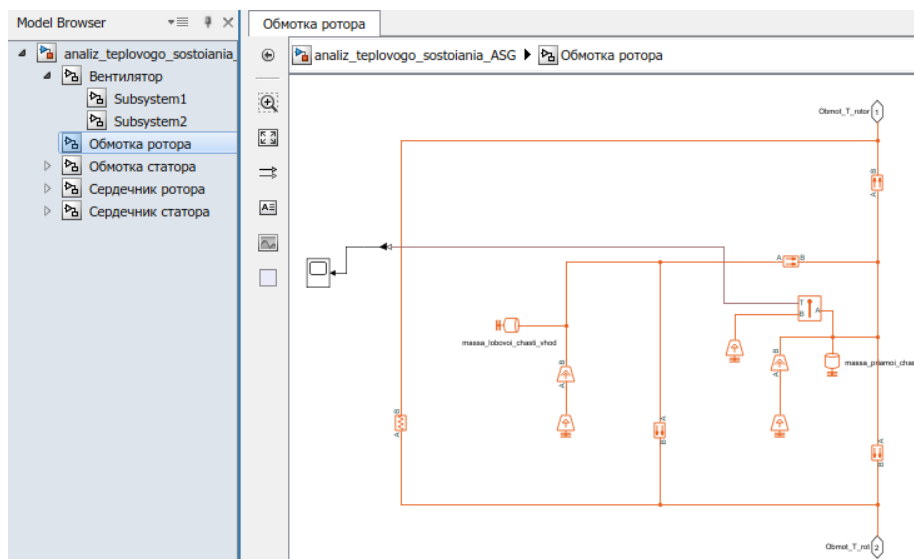


Рис. 4.2.11. Блок «обмотка ротора»

Блоки «обмотка статора» и «обмотка ротора» практически идентичны. Различием является лишь то, что в блок «обмотка статора» добавлены элементы, позволяющие учесть прохождение охлаждающего воздуха через лобовые части, а в блоке «обмотка ротора» данные элементы отсутствуют, потому что лобовые части обмотки ротора, как правило, фиксируются бандажными лентами, которые в свою очередь перекрывают поток воздуха через них.

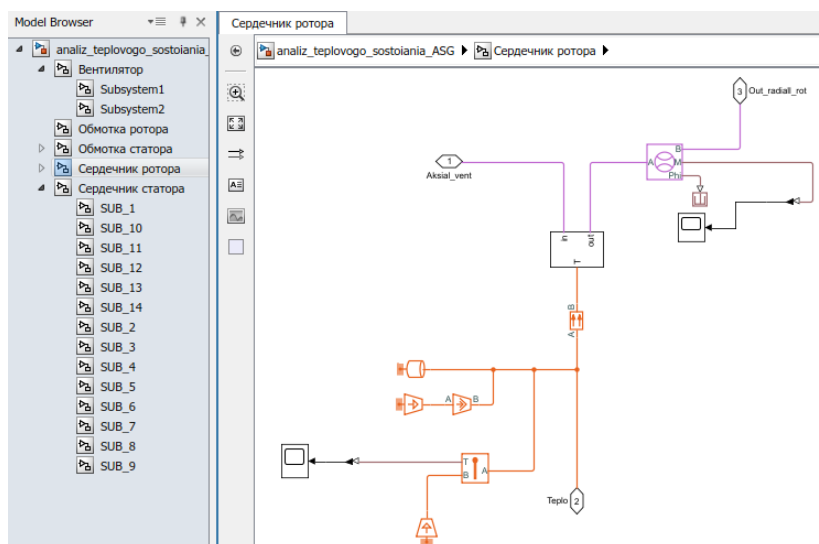


Рис. 4.2.12. Блок «сердечник ротора»

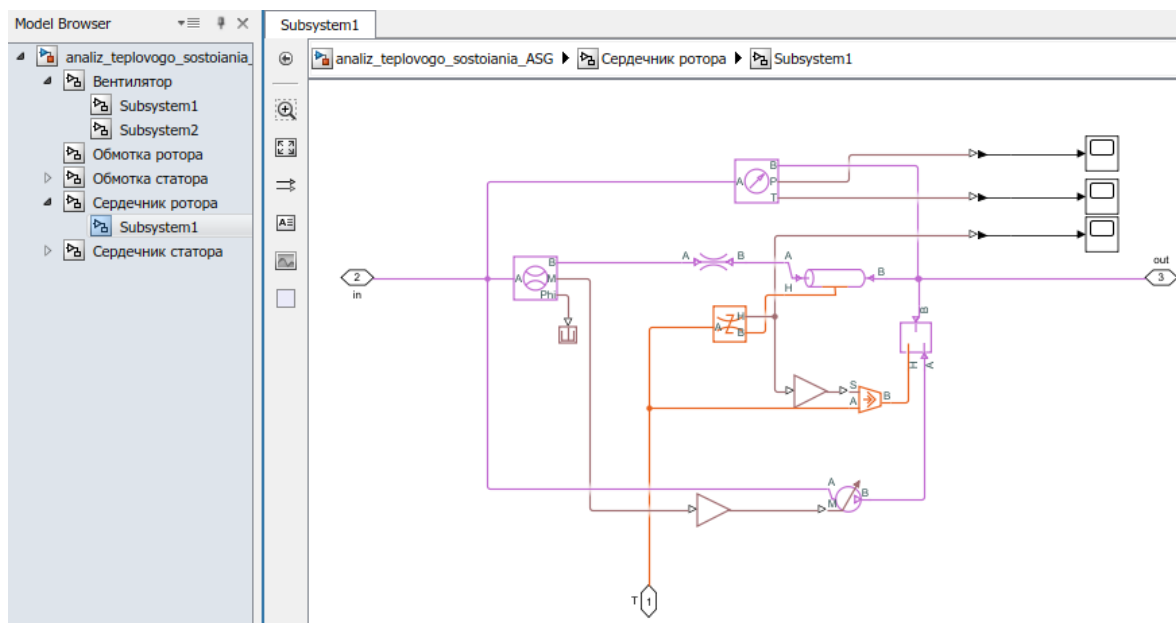


Рис. 4.2.13. Модель учёта аксиальных каналов в роторе

Работоспособность созданной модели тестировалась на параметрах рассчитанного генератора (рисунки 4.2.7–4.2.13). В качестве хладагента был задан воздух с температурой 40°C и расходом $1,3 \text{ м}^3/\text{с}$. В итоге получены следующие значения расчетных температур и давления в установившемся режиме:

- температура сердечника статора – 108°C ;
- температура обмотки статора – 110°C ;
- температура сердечника ротора – 141°C ;
- температура обмотки ротора – 141°C ;
- перепад температуры воздуха между выходом и входом – 36°C ;
- перепад давления воздуха между входом и выходом – $1\,382 \text{ Па}$.

Результаты моделирования представлены на рисунках 4.2.14–4.2.19.

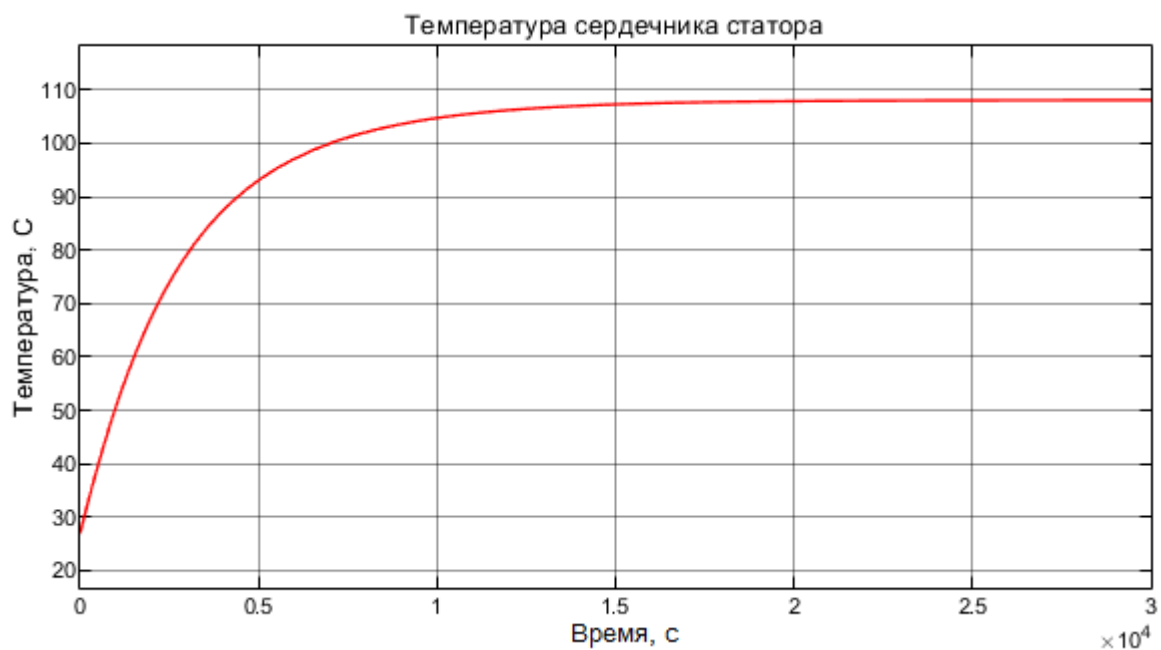


Рис. 4.2.14. Диаграмма температуры сердечника статора (крайний субпакет)

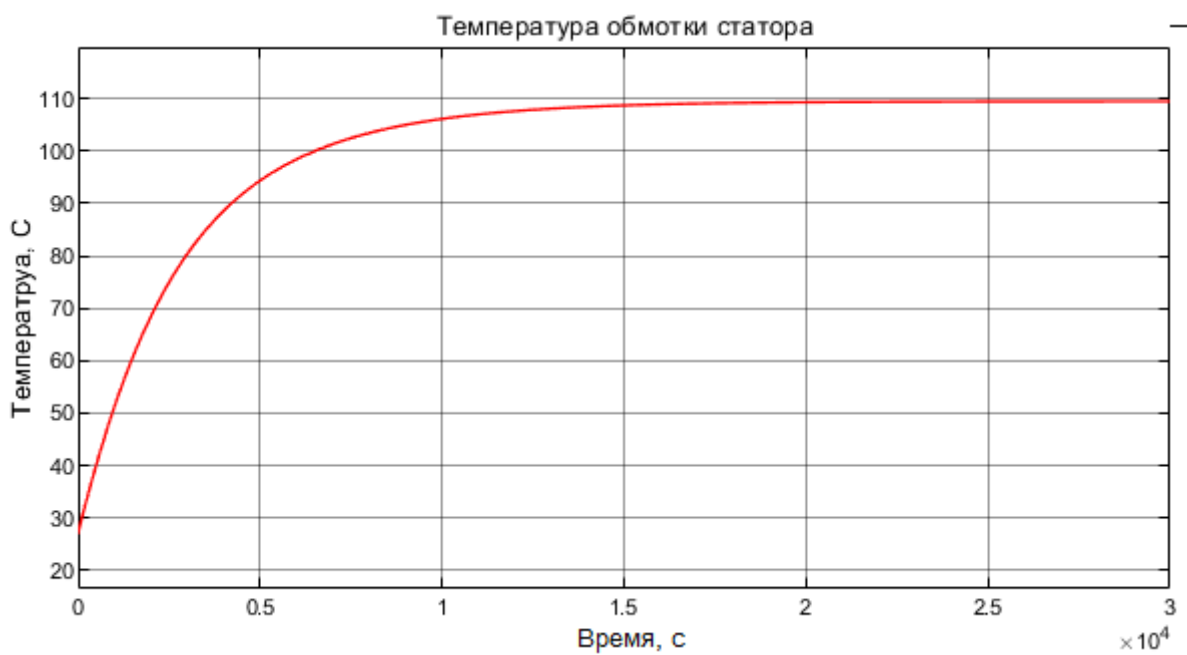


Рис. 4.2.15. Диаграмма температуры обмотки статора

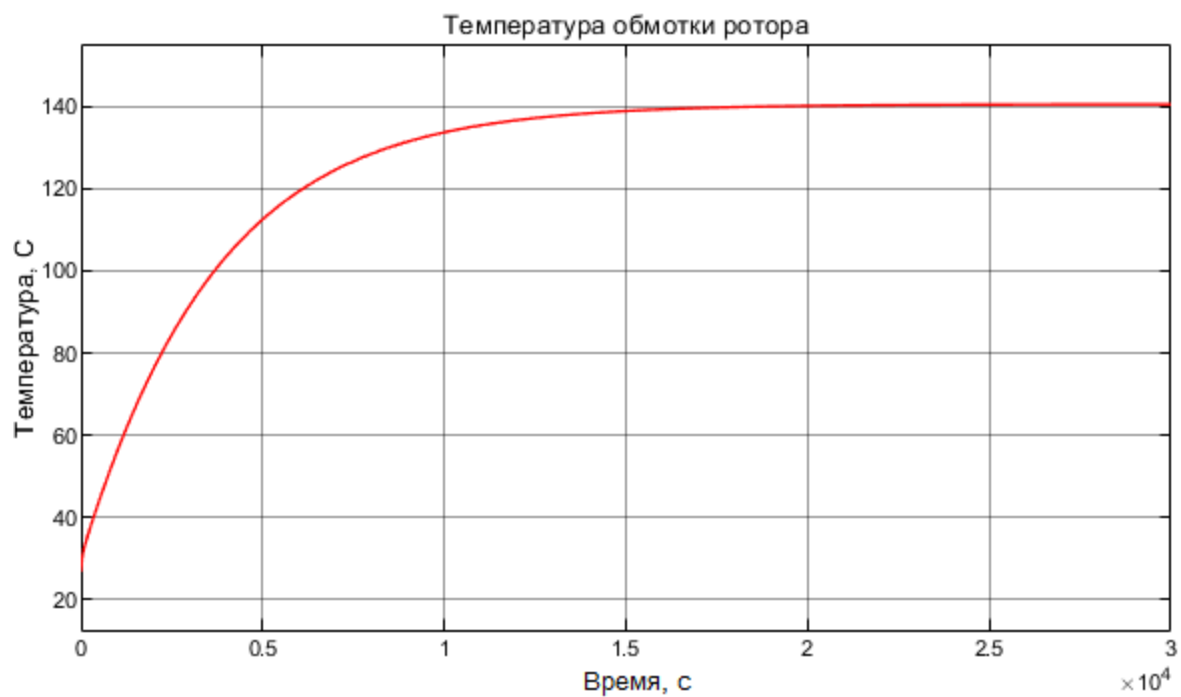


Рис. 4.2.16. Диаграмма температуры обмотки ротора

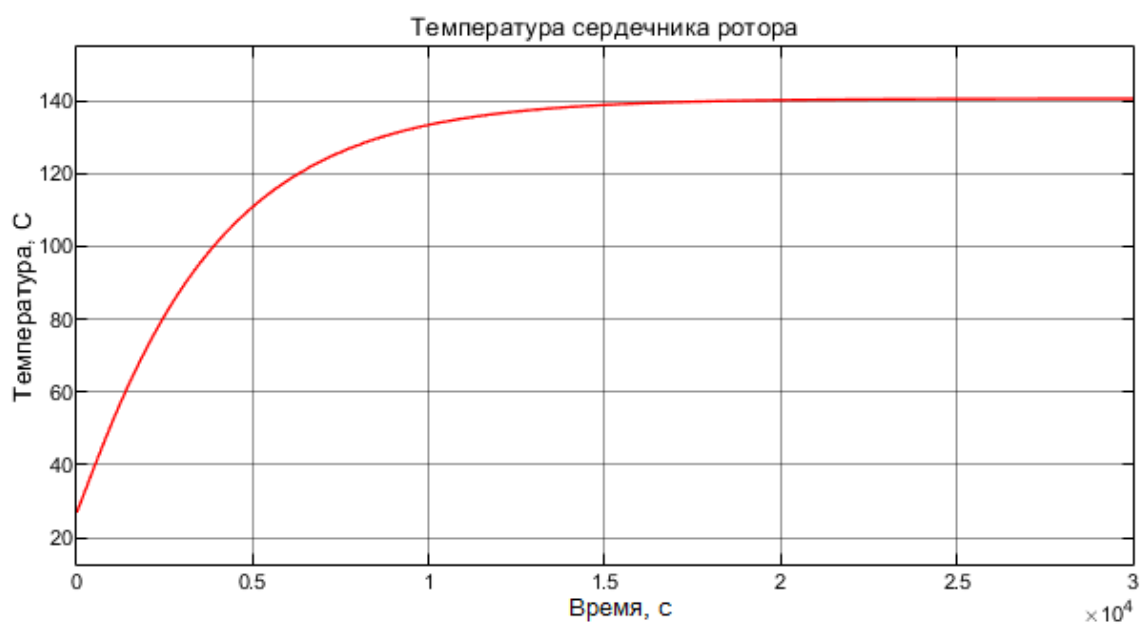


Рис. 4.2.17. Диаграмма температуры сердечника ротора

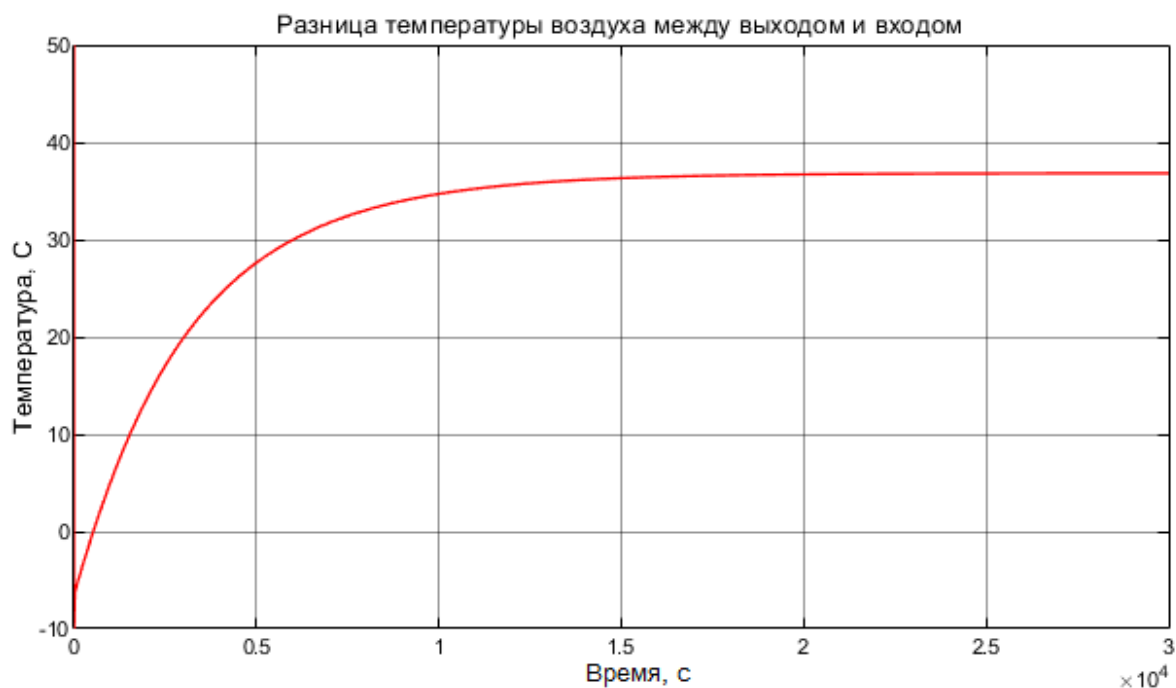


Рис. 4.2.18. Диаграмма разницы температуры воздуха между выходом и входом

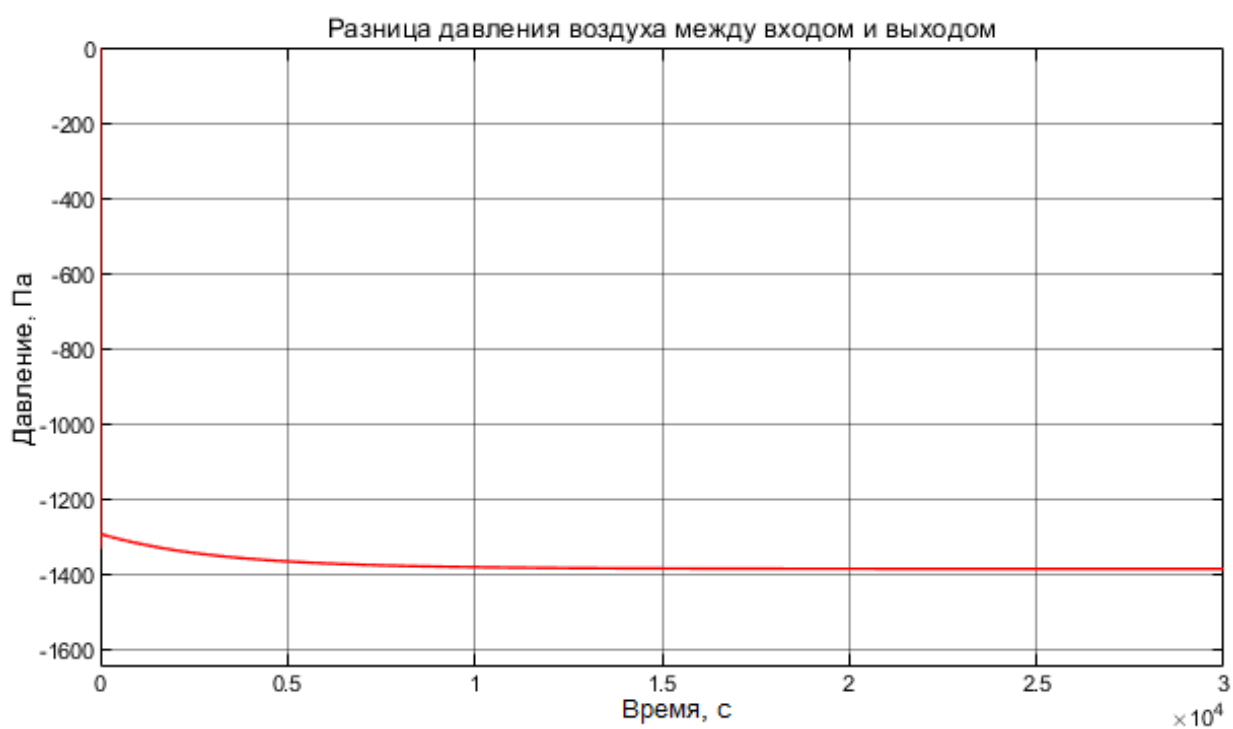


Рис. 4.2.19. Диаграмма разницы давления воздуха между входом и выходом

По результатам моделирования можно сделать вывод, что температура активных частей генератора находится в допустимом пределе для класса изоляции

Г. Наиболее нагретыми частями являются обмотка и сердечник ротора. Их конструкции необходимо уделить особое внимание при производстве реального генератора. Перепад давления воздуха между входом и выходом позволяет применить в качестве нагнетательного устройства стандартные вентиляторы типа В-2, В-3, В-2,5.

Данная модель имеет ряд допущений, а именно: она представляет каждый элемент как однородное тело с заданной массой. Это позволяет определять только среднюю температуру тела и не дает информации о распределении температуры на поверхности. Однако разработанная модель очень удобна для применения в инженерной практике. Она дает возможность быстро и с достаточной точностью определять параметры нагрева электрической машины и подбирать необходимые параметры системы охлаждения.

Выводы по главе

1. С учетом больших рисков, связанных с изготовлением реального образца, в проектную систему введена подсистема подробного анализа электромагнитного и теплового состояния АСГ. В качестве программного обеспечения для электромагнитного анализа выбрана программа Ansys Electronics Desktop, позволяющая проводить точное моделирование методом конечных элементов. Для анализа теплового состояния выбрана программа MATLAB SIMULINK.

2. Представлена подсистема анализа электромагнитного состояния, построенная на основе САЕ-системы Ansys Electronics Desktop и включающая два этапа. На первом этапе геометрия, полученная от подсистемы синтеза, передается с помощью заранее сформированных скриптов в модуль Ansys RMXprt. Данный модуль реализует расчеты по методу схем замещения. На этом этапе происходит предварительный анализ результатов оптимизации и при необходимости их корректировка. На втором этапе данные передаются в модуль Ansys Maxwell 2D Design, построенный на основе метода конечных элементов. На этом этапе

производится решение плоскопараллельной задачи и окончательный расчет всех параметров и энергетических характеристик АСГ.

3. Для теплового анализа выбрана программная среда MATLAB SIMULINK, которая позволяет решать связанную задачу теплового и вентиляционного расчета методом эквивалентных схем замещения. Комплекс дает возможность рассчитать динамику нагрева от пуска до установившегося режима. Разбиение реальной конструкции на большое количество однородных тел позволяет получить требуемую точность расчета. Используемая программа взаимосвязана с подсистемой синтеза и подсистемой анализа электромагнитного состояния, что облегчает проектирование на всех стадиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе содержатся научно доказанные теоретические положения оптимального проектирования и подробного анализа асинхронизированных синхронных генераторов, нашедших широкое применение в составе ВЭУ. В результате расширена существующая теоретическая база по проектированию электрических машин этого класса. 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. В качестве основного варианта для ВЭУ большой мощности выбран АСГ (машина двойного питания). Этот тип электрических машин позволяет без дополнительных ступеней преобразования непосредственно генерировать стандартную энергию при изменении частоты вращения ротора в широком диапазоне от 0 до сверхсинхронной скорости, что обеспечивает высокий КПД преобразования. Она не потребляет реактивную энергию из сети и сама может быть источником реактивной мощности. Преобразование идет по цепи возбуждения, что позволяет снизить габариты и стоимость электронного оборудования. Для обеспечения бесконтактного токоподвода к цепи ротора для тихоходных ВЭУ с вертикальной осью вращения применяется АКБ, обеспечивающая дополнительно функцию накопления, для быстроходных ВЭУ используется БВУ и вращающийся трансформатор.

2. Разработана математическая модель расчета максимальных габаритов ротора при условии отсутствия критических частот в рабочем диапазоне скоростей вращения. Модель, исходя из условий механической прочности и стабильности, рассчитывает минимально допустимый внутренний диаметр сердечника ротора, максимально допустимый наружный диаметр ротора и максимально допустимую длину активных частей ротора. Данная математическая

модель дает возможность связать параметры механической стабильности ротора и электромагнитные параметры. Отличие этой модели от существующих методик заключается в том, что она позволяет производить не анализ проектных решений, а является методикой синтеза проектных решений.

3. Разработана математическая модель электромагнитного расчета АСГ для оптимизации геометрии активных частей. В качестве независимых переменных выведены и применены обобщенные переменные, представляющие собой соотношения площадей активных зон электрической машины. В математической модели определены основные аналитические зависимости и формализованы показатели качества.

4. На основе проведенного анализа разработана подсистема синтеза АСГ, реализующая многоуровневую однокритериальную оптимизацию для различных проектных ситуаций. Система позволяет реализовать до пяти проектных ситуаций, учитывая практически все потребности реального проектирования АСГ.

5. Разработана подсистема анализа электромагнитного состояния, построенная на основе САЕ-системы Ansys Electronics Desktop и включающая два этапа. На первом этапе проводятся расчеты в модуле Ansys RMxpert, который реализует метод схем замещения. На втором этапе данные передаются в модуль Ansys Maxwell 2D Design, использующий метод конечных элементов. При этом производится решение плоскопараллельной полевой задачи и окончательный расчет всех параметров и энергетических характеристик АСГ.

6. В подсистеме анализа выполнена оценка теплового состояния АСГ в программной среде MATLAB SIMULINK, при этом решается связанная задача теплового и вентиляционного расчета методом схем замещения. Комплекс позволяет рассчитать динамику нагрева от пуска до установившегося режима. Разбиение реальной конструкции на большое количество однородных тел дает возможность получить требуемую точность расчета.

7. На основе проведенного исследования создана система проектирования АСГ большой мощности. Система позволяет, начиная с технического задания, определить допустимые габариты ротора для дальнейшего учета в оптимизационном цикле, провести оптимизацию геометрии по заданным критериям и сделать подробный анализ электромагнитного и теплового состояния на основе современных CAE-систем. Данную проектную систему можно использовать для создания генераторов этого класса другого назначения.

Дальнейшее направление исследования

В диссертационном исследовании поднята проблема разработки мощных габаритных электрических машин, функционирующих в широком диапазоне скоростей. Решен ряд проблем по проектированию асинхронизированного синхронного генератора. Дальнейшее направление данного исследования видится в создании точной методики анализа критических частот ротора с помощью метода конечных элементов. В перспективе разработанную проектную систему можно включить в комплекс сквозного проектирования АСГ для мощных ветроустановок.

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 чисто механически рассчитывать геометрию, параметры и характеристики электрической машины.

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 оптимизация – оптимизация, позволяющая в процессе перебора независимых переменных фиксировать одну или несколько из них.

Метод оптимизации – метод перебора независимых переменных при поиске экстремума целевой функции.

Метод покоординатного спуска (Гаусса – Зейделя) – метод многомерной оптимизации, при котором последовательно друг за другом перебираются все независимые переменные в заданных для них границах.

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 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.

Программный комплекс – набор программных средств, работающих совместно для выполнения одной или нескольких сходных задач.

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

Ток возбуждения генератора на холостом ходу – величина тока в обмотке возбуждения, при котором в разомкнутой якорной обмотке индуцируется номинальное напряжение.

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

Функциональная модель – модель показывающая принцип действия устройства.

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.

Электромагнитная мощность – мощность, развиваемая электромагнитным моментом на роторе электрической машины.

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

ABB - швейцарская корпорация, специализирующаяся в области электротехники и энергетического машиностроения.

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

Delphi – язык программирования высокого уровня.

Global Wind Energy Council – Всемирный совет по ветроэнергетике (GWEC), созданный в 2005 году в целях обеспечения надежного и представительного форума для всего сектора ветроэнергетики на международном уровне.

Lagerwey – голландская фирма производитель ветрогенераторов.

Siemens – немецкая компания, работающая в области электротехники, электроники, энергетического оборудования

Siemens Gamesa Renewable Energy S.A. – испано-немецкая ветроэнергетическая компания, базирующаяся в Замудио (Испания, провинция Бискайя). Компания производит ветряные турбины и предоставляет услуги по

ветроэнергетике на суше и в море. Это второй в мире по величине производитель ветряных турбин.

Statistical Review of World Energy – агентство, проводящее статистический обзор и анализ мировой энергетики, собирает данные о мировых энергетических рынках. Обзор обеспечивает своевременные, всеобъемлющие и объективные данные для энергетического сообщества с 1952 года.

Vestas – датская фирма производитель ветряных турбин, основанная в 1945 году. Компания управляет производственными заводами в Дании, Германии, Нидерландах, Тайване, Индии, Италии, Румынии, Великобритании, Испании, Швеции, Норвегии, Австралии, Китае, Бразилии, Польше и Соединенных Штатах и насчитывает более 25 000 сотрудников по всему миру. По состоянию на 2013 год это крупнейшая ветротурбинная компания в мире.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

АГ – асинхронный генератор

АКБ – аккумуляторная батарея

АСГ – асинхронизированный синхронный генератор

БВУ – бесщеточное возбуждающее устройство

ВИЭ – возобновляемые источники энергии

ВИЭСХ – Всесоюзный институт электрификации сельского хозяйства

ВЭС – ветроэнергетическая станция

ВЭУ – ветроэнергетическая установка

ГПТ – генератор постоянного тока

КПД – коэффициент полезного действия

МКЭ – метод конечных элементов

МДП – машина двойного питания

МДС – магнитодвижущая сила

НИОКР – научно-исследовательская и опытно-конструкторская работа

НПО – научно-производственное объединение

ПЧ – преобразователь частоты

РУСЭЛПРОМ – Российский электротехнический концерн, ведущий в России разработчик, производитель и поставщик электрических машин для всех отраслей промышленности и сельского хозяйства, лидер по экспорту электродвигателей, входит в топ-400 крупнейших предприятий страны

РФ – Российская Федерация

САПР – система автоматизированного проектирования

СГ – синхронный генератор

ТЗ – техническое задание

ТОЭ – кафедра теоретических основ электротехники

ЦАГИ – Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского, Авиационный государственный научный центр России

ЦВЭИ – Центральный ветроэнергетический институт

ШИМ – широтно-импульсная модуляция

ЭДС – электродвижущая сила

ЮУрГУ – Южно-Уральский государственный университет

CAD-система (англ. *computer-aided design*) – система автоматизированного проектирования

CAE-система (англ. *computer-aided engineering*) – программы предназначенных для решения различных инженерных задач: расчётов, анализа и симуляции физических процессов

DFIG (англ. *double-fed induction generator*) – генератор двойного питания

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аминов, Д. С. Теоретические основы разработки водопогружных гидрогенераторов, используемых в качестве возобновляемых источников электроэнергии малых и средних рек: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01 / Аминов Дилшод Саидович. – Челябинск, 2020. – 166 с.
2. Андреева, Е. Г. Исследование переменного магнитного поля провода с током с помощью программы ANSYS / Е. Г. Андреева, Д. В. Колмогоров, С. П. Шамец // Сборник трудов Пятой конференции пользователей программного обеспечения CAD_FEM GmbH, 21–22 апреля 2005 г. – М., 2005. – С. 358-362.
3. Андриянов, В. Н. Ветроэлектрические станции / В. Н. Андриянов, Д. Н. Быстрицкий, К. П. Вашкевич, В. Р. Секторов. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 320 с.
4. Афоничев, Д. Н. Математическая модель управляемого асинхронного электродвигателя/ Д. Н. Афоничев, С. Н. Пиляев, М. А. Степин // Повышение эффективности использования мобильных энергетических средств в различных режимах движения. Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 115-й годовщине со дня рождения профессора Харитончика Ефима Мироновича. / Воронеж, 2017. – С.10-15.
5. Басов, К. А. ANSYS: справочник пользователя / К. А. Басов. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с.: ил.
6. Басов, К. А. Графический интерфейс комплекса ANSYS / К. А. Басов. – М.: ДМК Пресс, 2006. – 248 с.: ил.
7. Борисенко, А. И. Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах / А. И. Борисенко. – М.: Энергия, 1974. – 580 с.
8. Борисенко, А. И. Охлаждение промышленных электрических машин / А. И. Борисенко, О. Н. Костилов, А. И. Яковлев. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.

9. Ботвинник, М. М. Асинхронизированная синхронная машина / М. М. Ботвинник. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 70 с.
10. Ботвинник, М. М. Управляемая машина переменного тока / М. М. Ботвинник, Ю. Г. Шакарян. – М.: Изд-во «Наука», 1969. – 140 с.
11. 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.
12. Буль, О. Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Магнитные цепи, поля и программа FEMM: Учебное пособие для вузов. – М.: Изд-во «Academia», 2005. – 336 с.
13. Буяльский, В. И. Методы повышения стабильности скорости вращения ротора ветротурбины / В. И. Буяльский, Н. М. Шайтор // Вестник ИЖГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2018. – Т. 21, № 4. – С. 166-173.
14. Вольдек, А. И. Электрические машины: учеб. для студентов высш. техн. учеб. заведений / А. И. Вольдек. – 3-е изд., перераб. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
15. Галушко, А. И. Надежность изоляции электрических машин / А. И. Галушко, И. С. Максимова, Р. Г. Оснач, П. М. Хазановский – М.: Энергия, 1979. – 176 с.
16. 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. ун-т (УПИ). – Екатеринбург, 2007. – С.73-76.
17. Ганджа, С. А. Генератор для автономных источников питания // Вестн. Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер. «Энергетика». – 2005. – Вып. 6, № 9. – С. 100-102.

18. 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.
19. 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.
20. Ганджа, С. А. Оптимальное проектирование электроприводов на базе вентильных электрических машин с аксиальным зазором // Вестник Юж.-Урал. гос. ун-та. Серия «Энергетика». – 2009. – Вып. 12, № 34. – С. 68-72.
21. 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.
22. 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.
23. Ганджа, С. А. Разработка мотор-колеса на базе вентильного двигателя комбинированного возбуждения для гибридных транспортных средств и транспортных средств на электрической тяге / С. А. Ганджа, **А. А. Котов** // Сборник докладов научно-практической конференции: «Эффективность, надежность и безопасность энергетического оборудования». – 2014. – С. 13-16.

24. 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.
25. Ганджа, С. А. Вентильные электрические машины с аксиальным магнитным потоком. Анализ, синтез, внедрение в производство: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.09.01 / Сергей Анатольевич Ганджа. – Челябинск, 2010. – 248 с. [61]
26. Ганджа, С. А. Оптимизация параметров вентильного моментного двигателя постоянного тока : дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01 / Сергей Анатольевич Ганджа. – Челябинск, 1984. – 203 с.
27. Ганджа, С. А. Применение водопогружного гидрогенератора комбинированного возбуждения в качестве альтернативного источника энергии для малых и средних рек / С. А. Ганджа, Д. С. Аминов, Б. И. Косимов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2019. – Т. 19, № 4. – С. 102-111. DOI: 10.14529 / power190412.
28. Герман-Галкин, С. Г. Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в среде Matlab Simulink: Учебник / С. Г. Герман-Галкин. – СПб.: Изд-во «Лань», 2013. – 448 с.
29. Гольдберг О. Д., Свириденко И. С. Инженерное проектирование и САПР электрических машин. – М.: Академия, 2008. – 560 с.
30. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014.
31. Готтер, Г. Нагревание и охлаждение электрических машин / Г. Готтер. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 480 с.

32. Гуревич, Э. И. Тепловые испытания и исследования электрических машин / Э. И. Гуревич. – Л.: Энергия, 1997. – 296 с.
33. Домбровский, В. В. Основы проектирования электрических машин переменного тока / В. В. Домбровский, Г. М. Хуторецкий. – Л.: «Энергия», 1974. – 504 с.
34. Забудский, Е. И. Электрические машины: учебное пособие для вузов / В 4 частях. Ч. 4. Коллекторные машины постоянного и переменного тока / Е. И. Забудский. – М.: ООО «Мегаполис», 2020. – 294 с.
35. Зангвилл, У. И. Нелинейное программирование. Единый подход / У. И. Зангвилл. – М.: Издательство «Советское радио». – 1973. – 312 с.
36. Зильберман, С. З. Разработка и исследование бесконтактных моментных двигателей постоянного тока : автореф. дис... канд. техн. наук : 05.09.01 / С. З. Зильберман. – Свердловск, 1978. – 14 с.
37. 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.
38. Клоков, Б. К. Обмотчик электрических машин: учеб. для сред. проф.-техн. училищ / Б. К. Клоков. – М.: Высш. школа, 1982. – 280 с.
39. Колесников, В. В. Моделирование вентильных двигателей в среде MATLAB SIMULINK / В. В. Колесников // Завалишинские чтения: молодежная секция. Сб. докл. / СПб.: ГУАП., 2012. – С. 118-122.
40. Колесников, В. В. Моделирование дефектов асинхронных двигателей в среде MATLAB SIMULINK / В. В. Колесников // Завалишинские чтения: молодежная секция. Сб. докл. / СПб.: ГУАП., 2014. – С. 3-5.
41. Конаков, С. А. Повышение эффективности ветроэнергетических установок / С. А. Конаков, Д. В. Гринько // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2014. – № 5. – С. 77-80.

42. Копылов, И. П. Проектирование электрических машин: учебник для бакалавров / под ред. И. П. Копылова – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2014. – 767 с. – Серия: Бакалавр. Углубленный курс.
43. Копылов, И. П. Справочник по электрическим машинам. Том 1. / И. П. Копылов, Б. К. Клоков. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.
44. Копылов, И. П. Электрические машины / И. П. Копылов. – 5-е изд. – М.: Высш. шк., 2006. – 607 с.
45. Косимов, Б. И. Разработка и исследование вентильного двигателя с когтеобразными полюсами привода пыльгерстана для изготовления бесшовных труб: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01 / Косимов Бахтиер Исматуллоевич. – Челябинск, 2020. – 147 с.
46. **Котов, А. А.** Применение генератора двойного питания для ветроэнергетических установок малой, средней и большой мощности / **А. А. Котов, Н. И. Неустроев** // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017. – Т. 17, № 4. – С. 80-89.
47. **Котов, А. А.** Разработка математической модели асинхронизированного синхронного ветрогенератора для задачи оптимизации основных геометрических размеров на основе обобщенных переменных / **А. А. Котов, Н. И. Неустроев, И. А. Чуйдук** // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2020. – № 33. – С. 78-98. DOI: 10.15593/2224-9397/2020.1.05.
48. Кривцов, В. С. Неисчерпаемая энергия. Кн. 1. Ветрогенераторы / В. С. Кривцов, А. М. Олейников, А. И. Яковлев. – Учебник. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», Севастополь: Севаст. нац. техн. ун-т, 2003. – 400 с.
49. Кривцов, В. С. Неисчерпаемая энергия. Кн. 2. Ветроэнергетика / В. С. Кривцов, А. М. Олейников, А. И. Яковлев. – Учебник. – Харьков: Нац.

аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», Севастополь: Севаст. нац. техн. ун-т, 2004. – 519 с.

50. Курочка, А. Л. Новые стратегии синтеза – основа автоматизации проектирования электрических машин // Автоматизация проектирования в электротехнике и энергетике: сб. науч. трудов. – Иваново, 1978.

51. Курочка, А. Л. Синтез оптимальных машин постоянного и пульсирующего тока на основе агрегированных переменных // Известия высш. учебных заведений. Электромеханика. – 1976. – № 6. – С. 608-617.

52. Лопухина, Е. М. Автоматизированное проектирование электрических машин малой мощности: учеб. пособие / Е. М. Лопухина, Г. А. Семенчуков. – М.: Высш. шк., 2002. – 511 с.: ил.

53. Лопухина, Е. М. Проектирование асинхронных микродвигателей с применением ЭВМ: учеб. пособие / Е. М. Лопухина, Г. А. Семенчуков. – М.: Высш. шк., 1980. – 359 с.: ил.

54. Мармелев, Г. Н. Разработка и исследование моментных микродвигателей постоянного тока: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.01 / Г. Н. Мармелев. – Челябинск, 1972. – 12 с.

55. Метельков, В. П. Развитие теории и разработка методов оценки теплового состояния электродвигателей при проектировании и эксплуатации асинхронных электроприводов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.01, 05.09.03 / Метельков Владимир Павлович. – Екатеринбург, 2019. – 437 с.

56. Мещеряков, В. Н. Управление машиной двойного питания, генерирующей электроэнергию при переменной частоте вращения: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Мещеряков Виктор Николаевич. – Липецк, 2018. – 168 с.

57. Милешкина, М. А. Моделирование тепловых расчетов электродвигателей с использованием современных программных компонентов / М. А. Милешкина, Л. Н. Ишунова, А. А. Малютина // Фундаментальные и

прикладные исследования в современном мире. Материалы международной (заочной) научно-практической конференции. – Астана, 2016. – С.16-20.

58. Монюшко, Н. Д. Тепловой расчет закрытых электрических машин: учебное пособие/ Н. Д. Монюшко, Г. В. Помогаев. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2009. – 63 с.

59. Москвитин, А. И. Непосредственное охлаждение электрических машин / А. И. Москвитин. – М.: АН СССР, 1962. – 284 с.

60. Неустроев, Н. И. Применение системы автоматического проектирования Ansys Maxwell для количественной оценки влияния эффекта вытеснения тока в электрических машинах переменного тока / Н. И. Неустроев, **А.А. Котов**, И. Е. Киесш // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2018. – Т. 18, № 1. – С. 112-121.

61. Обозов, А. Дж. Возобновляемые источники энергии: учебное пособие для вузов / А. Дж. Обозов, Р. М. Ботпаев. – Бишкек, 2010. – 221 с.

62. Ожегов, С. И. Толковый словарь русского языка: 80 000 слов и фразеологических выражений/ С. И. Ожегов, Н. Ю. Шведова. – 4-е изд. – М., 1997. – 944 с.

63. Онищенко, Г. Б. Асинхронные вентильные каскады и двигатели двойного питания / Г. Б. Онищенко, И. Л. Локтева. – М.: Энергия, 1979. – 200 с.

64. Пахомин, С. А. Оптимизационное проектирование вентильных машин с постоянными магнитами на основе пакета FEMM / С. А. Пахомин, Л. С. Пахомин // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2018. – Т. 61, № 6. – С. 26-31.

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

66. Поляк, Б. Т. Введение в оптимизацию. – М.: Наука, 1983. – 384 с.

67. Попичев, В. В. Методы расчета тепловых процессов в электродвигателях / В. В. Попичев // Исследования и разработки в области

машиностроения, энергетики и управления. Материалы XIII международной научно-практической конференции студентов, магистрантов и молодых ученых. – Гомель, 2013. – С. 191-193.

68. Российская Ассоциация Ветроиндустрии. – URL: www.rawi.ru (дата обращения [10.02.2020]).

69. Сергеев, П. С. Проектирование электрических машин / П. С. Сергеев, Н. В. Виноградов, Ф. А. Горяинов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1969. – 632 с.

70. Счастливый, Г. Г. Математические модели теплопередачи в электрических машинах / Г. Г. Счастливый, В. В. Бандурин, В. Н. Остапенко, С. Н. Остапенко. – К.: Наук. думка, 1986. – 181 с.

71. 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-летию со дня рождения Н. Н. Бенардоса / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2003. – С. 81-84.

72. Усольцев, А. А. Электрические машины / Учебное пособие. – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 416 с.

73. Филиппов, И. Ф. Вопросы охлаждения электрических машин / И. Ф. Филиппов. – М.-Л.: Энергия, 1964. – 339 с.

74. Филиппов, И. Ф. Основы теплообмена в электрических машинах / И. Ф. Филиппов. – М.: Энергия, 1974. – 384 с.

75. Филиппов, И. Ф. Теплообмен в электрических машинах / И. Ф. Филиппов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 259 с.

76. Хуторецкий, Г. М. Проектирование турбогенераторов / Г. М. Хуторецкий, М. И. Токов, Е. В. Толвинская. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1987. – 256 с.

77. Цгоев, Р. С. Повышение эффективности ветроэнергетического агрегата регулированием угла установки лопастей ветроколеса/ Р. С. Цгоев, А. В. Погосян, Г. А. Яковенко// Электричество. – 2014. – № 3. – С. 25-30.
78. Шайбеков, А. Ф. Основные характеристики асинхронизированного синхронного генератора на базе машины двойного питания / А. Ф. Шайбеков, Л. Э. Рогинская // Электротехнические комплексы и системы. – 2015. – С. 112–117.
79. Шишкин, С. В. Исследование магнитного поля в электрических аппаратах с помощью программного комплекса FEMM / С. В. Шишкин, К. Э. Коратаев, Г. В. Плеханов// Труды Рубцовского индустриального института. – 2007. – С. 143-151.
80. Ясон, Р. А. Ветроустановки: Учеб. пособие по курсам «Ветроэнергетика», «Энергетика нетрадиционных и возобновляемых источников энергии», «Введение в специальность» / Под ред. М. И. Осштова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. – 36 с: ил.
81. Adams, A.S.; Keith, D.W. (2013). "Are global wind power resource estimates overstated?" (PDF). *Environmental Research Letters*. 8(1): 015021. Bibcode:2013ERL..8a5021A. doi:10.1088/1748-9326/8/1/015021.
82. Ahmad Y Hassan, Donald Routledge Hill (1986). *Islamic Technology: An illustrated history*, p. 54. Cambridge University Press. ISBN 0-521-42239-6.
83. ANSYS Manual. Revision 6.0. ANSYS Inc/2002.-2567 p.
84. ANSYS Maxwell Help 19.1. ANSYS Inc/2018.-2681 p.
85. Armaroli, Nicola; Balzani, Vincenzo (2011). "Towards an electricity-powered world". *Energy & Environmental Science*. 4 (9): 3193. doi:10.1039/c1ee01249e.
86. B. Trueb, Lucien (2015), *Astonishing the Wild Pigs, Highlights of Technology*, ATHENA-Verlag, p.119, ISBN 9783898967662.
87. Burton, Tony, et al., (ed). *Wind Energy Handbook*, John Wiley and Sons, 2001, ISBN 0-471-48997-2, p. 65.

88. Cheng, Ming; Zhu, Ying (2014). "The state of the art of wind energy conversion systems and technologies: A review". *Energy Conversion and Management*. 88: 332. doi:10.1016/j.enconman.2014.08.037.
89. Demeo, E.A.; Grant, W.; Milligan, M.R.; Schuerger, M.J. (2005). "Wind plant integration". *IEEE Power and Energy Magazine*. 3 (6): 38–46. doi:10.1109/MPAE.2005.1524619.S2CID 12610250.
90. Falahi, G.; Huang, A. (1 October 2014). Low voltage ride through control of modular multilevel converter based HVDC systems. *IECON 2014 – 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. pp. 4663–68. doi:10.1109/IECON.2014.7049205. ISBN 978-1-4799-4032-5. S2CID 3598534.
91. Gandzha S, **Kotov A**. Application of an Asynchronous Synchronous Alternator for Wind Power Plant of Low, Medium and High Power. Chapter in open access book *Winding Engineering*. IntechOpen. – URL: <https://www.intechopen.com/online-first/application-of-an-asynchronous-synchronous-alternator-for-wind-power-plant-of-low-medium-and-high-po>. DOI: 10.5772/intechopen.89255.
92. Gandzha S.A. Optimization of parameters of brushless electric machines of a direct current with an axial air gap. State and prospects of development of Electrotechnology (XII Benardos readings): TEZ. Doc. Inter-national. scientific.-tech. conf., 1-3 June 2005. Ivan. State Energy. Univ. Ivanovo, 2005, vol. 2, 82 p.
93. Gandzha S.A., Erlishcheva A.V. [Starter-generator for autonomous source of energy supply] Starter-generator dly avtonomnih istochnikov pitaniy. *Vestnik Uzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria "Energetika"*, 2005, Vipusk 6. no 9, pp.84-86. (In Russian).
94. Gandzha S.A., Sogrin A.I., Kiessh I.E. The Comparative Analysis of Permanent Magnet Electric Machines with Integer and Fractional Number of Slots per Pole and Phase. *Procedia Engineering* 129:408-414, December 2015.

95. Gandzha, S. A. [The application of synchronous induction generator for windmill] *Primenenie acinhronisirovanih sinhronih generatorov dly vetroenergeticheskikh ustanovok*. ELMASH-2009. Elektroenergetika I electrotehnika. Problemi i perspektivi. Trudi simposiuma. Moskva, 2009, tom1, str 168-170. (In Russian).
96. Gandzha, S. A. Optimal design of brushless axial gap electric machines for low power windmills / S. A. Gandzha, R. L. Halstead // *Design World (engineering solution for product manufactures)*. – 2012. – № 1. – www.designworldonline.com.
97. Gandzha, S. Kosimov, B. Aminov, D. Application of the Ansys Electronics Desktop Software Package for Analysis of Claw-Pole Synchronous Motor. *Machines* 2019, 7, 65.
98. Gandzha, S.A. Geometry Optimization of Asynchronous Synchronous Alternator with Using Generalized Variables / S. Gandzha, **A. Kotov**, N. Neustroev // 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineerings (UralCon). – 2019. – P. 373–377. DOI: 10.1109/URALCON.2019.8877634.
99. Gandzha, S.A. Variable speed power / S.A. Gandzha, I.E. Kiessh // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 129. – P. 731–735. DOI:10.1016/j.proeng.2015.12.095.
100. Garvine, Richard; Kempton, Willett (2008). "Assessing the wind field over the continental shelf as a resource for electric power"(PDF). *Journal of Marine Research*. 66 (6): 751–773. doi:10.1357/002224008788064540. ISSN 0022-2402. Archived from the original (PDF) on 20 July 2011. Retrieved 30 November 2009.
101. "Generators for wind turbines Standard slip ring generator series for doubly-fed concept from 1.5-3.5 MW" (PDF). ABB. 2014. Retrieved April 24, 2018.
102. Gipe, Paul (1995). *Wind Energy Comes of Age*. John Wiley & Sons. pp. 376–380. ISBN 978-0-471-10924-2.
103. Global Wind Energy Council. – URL: <http://gwec.net> (дата обращения 29.01.2020).

104. Gohlke JM et al. Environmental Health Perspectives (2008). "Health, Economy, and Environment: Sustainable Energy Choices for a Nation". Environmental Health Perspectives. 116 (6): A236–A237. doi:10.1289/ehp.11602. PMC 2430245. PMID 18560493.
105. Guezuraga, Begoña; Zauner, Rudolf; Pölz, Werner (2012). "Life cycle assessment of two different 2 MW class wind turbines". Renewable Energy. 37: 37. doi:10.1016/j.renene.2011.05.008.
106. Haapala, Karl R.; Prempreeda, Preedanood (2014). "Comparative life cycle assessment of 2.0 MW wind turbines". International Journal of Sustainable Manufacturing. 3 (2): 170. doi:10.1504/IJSM.2014.062496. Lay summary.
107. Haiying, D. Wind Turbine Active Power Control Based on Multi-Model Adaptive Control/ D.Haiying, Y. Lixia, Y. Guohan, L. Hongwei // International Journal of Control and Automation – 2015. - no. 8. - P. 273-284.
108. "History of Wind Energy" in Cutler J. Cleveland (ed.) Encyclopedia of Energy. Vol. 6, Elsevier, ISBN 978-1-60119-433-6, 2007, pp. 421–22.
109. Huang, Junling; McElroy, Michael B (2015). "A 32-year perspective on the origin of wind energy in a warming climate"(PDF). Renewable Energy.77: 482–92.doi:10.1016/j.renene.2014.12.045.
110. Jones, Christopher R.; Richard Eiser, J. (2010). "Understanding 'local' opposition to wind development in the UK How big is a backyard?" (PDF). Energy Policy. 38 (6): 3106. doi:10.1016/j.enpol.2010.01.051.
111. Kaspar, F., Borsche, M., Pfeifroth, U., Trentmann, J., Drücke, J., and Becker, P.: A climatological assessment of balancing effects and shortfall risks of photovoltaics and wind energy in Germany and Europe, Adv. Sci. Res., 16, 119–128, <https://doi.org/10.5194/asr-16-119-2019>, 2019.
112. Kiessh, I.E. Application brushless machines with combine excitation for a small and medium power windmills / I.E. Kiessh, S.A. Gandzha // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 129. – P. 191–194. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.03118.

113. **Kotov A.A.** Mathematical Modeling Asynchronized Synchronous wind Turbine Generator on the Basis of Generalized Variables with the Purpose of main Machine Geometrical Parameters Optimization/ **A. Kotov**, N. Neustroev, I. Chydyk // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) -2020 – P. 1-7. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111967
114. L. Wei, R. J. Kerkman, R. A. Lukaszewski, H. Lu and Z. Yuan, "Analysis of IGBT power cycling capabilities used in Doubly Fed Induction Generator wind power system," 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Atlanta, GA, 2010, pp. 3076-3083, doi:10.1109/ECCE.2010.5618396.
115. Leonhard, W.: Control of Electrical Drives. 2nd Ed. Springer 1996, 420 pages. ISBN 3-540-59380-2.
116. Liwschitz, M. M.; Kilgore, L. A. (1942). "A Study of the Modified Kramer or Asynchronous-Synchronous Cascade Variable-Speed Drive". Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. 61 (5): 255–260. doi:10.1109/T-AIEE.1942.5058524.
117. Lucas, Adam (2006), Wind, Water, Work: Ancient and Medieval Milling Technology, Brill Publishers, p. 65, ISBN 90-04-14649-0.
118. Mathworks help [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mathworks.com/help/phymod/simscape/ref/localrestrictiong.html>. (дата обращения: 10.09.2020).
119. M. J. Harandi, S. G. Liasi and M. T. Bina, "Compensating Stator Transient Flux during Symmetric and Asymmetric Faults using Virtual Flux based on Demagnetizing Current in DFIG Wind Turbines," 2019 International Power System Conference (PSC), Tehran, Iran, 2019, pp. 181-187, doi:10.1109/PSC49016.2019.9081565.
120. M. J. Harandi, S. Ghaseminejad Liasi, E. Nikraves and M. T. Bina, "An Improved Control Strategy for DFIG Low Voltage Ride-Through Using Optimal Demagnetizing method," 2019 10th International Power Electronics, Drive Systems and

Technologies Conference (PEDSTC), Shiraz, Iran, 2019, pp. 464-469, doi:10.1109/PEDSTC.2019.8697267.

121. M. Niraula and L. Maharjan, "Variable stator frequency control of stand-alone DFIG with diode rectified output", 5th International symposium on environment-friendly energies and applications (EFEA), 2018.

122. MacKen, K.J.P.; Green, T.C.; Belmans, R.J.M. (2002). "Active filtering and load balancing with small wind energy systems". 10th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Proceedings (Cat. No.02EX630). 2. p. 776. doi:10.1109/ICHQP.2002.1221533. ISBN 978-0-7803-7671-7. S2CID 114471306.

123. Mehmet Cunkas. Design optimization of electric motors by multiobjective fuzzy genetic algorithms/ Mehmet Cunkas. // Mathematical and Computational Applications. – 2008. – Vol. 13. – No. 3. – P. 153–163.

124. Miller, S. Doubly fed induction generator systems for wind turbines/ S. Miller, M. Deicke, W. De Doncker Rik // IEEE Industry Applications Magazine – 2002. - no. 8. - P. 26-33 DOI: 10.1109/2943.999610.

125. Mohanrajan, S.R., A Study of Motor - Generator Topologies for Pumped Storage Applications/ S.R. Mohanrajan, S. Vamsi Krishna, L. Narayana Reddy, A. Surya Teja, B. Vishal // Conf. on Advances In Engineering And Technology -ICAET-2014, - 2014. - P. 627-335. DOI: 10.15224/ 978-1-63248-028-6-02-132.

126. Neustroev N. Starter generator Design Development for Modern Micro Gas Turbine Plant/ N. Neustroev, **A. Kotov** I. Chyidyk // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) -2020 – P. 1-7. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111922.

127. Niiranen, Jouko (2008). "About the active and reactive power measurements in unsymmetrical voltage dip ride-through testing". Wind Energy. 11 (1): 121–131. Bibcode:2008WiEn...11..121N. doi:10.1002/we.254. [133]

128. O’Keeffe, Aoife; Haggett, Claire (2012)."An investigation into the potential barriers facing the development of offshore wind energy in Scotland: Case

study – Firth of Forth offshore wind farm" (PDF). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16 (6): 3711. doi:10.1016/j.rser.2012.03.018.

129. Overland, Indra (1 March 2019). "The geopolitics of renewable energy: Debunking four emerging myths". *Energy Research & Social Science*. 49: 36–40. doi:10.1016/j.erss.2018.10.018. ISSN 2214-6296.

130. Overview of research and development status of brushless doubly-fed machine system". *Chinese Journal of Electrical Engineering*. Chinese Society for Electrical Engineering. 2 (2). December 2016.

131. Parker, M.A. Comparison of power electronics lifetime between vertical- and horizontal-axis wind turbines / M.A. Parker, C. Soraghan, A. Giles // *IET Renewable Power Generation*. –2016. – vol. 10. – P. 679–686. DOI: 10.1049/iet-rpg.2015.0352.

132. Patel, Mukund R. (2006). *Wind and Solar Power Systems – Design, analysis and Operation* (PDF) (2nd ed.). CRC Press. p. 303. ISBN 978-0-8493-1570-1.

133. Pernick, Ron and Wilder, Clint (2007). *The Clean Tech Revolution: The Next Big Growth and Investment Opportunity*. Collins. p. 280. ISBN 0-06-089623-X.

134. Pfeiffer, A.; Scheidl, W.; Eitzmann, M.; Larsen, E. (1997). "Modern rotary converters for railway applications". *Proceedings of the 1997 IEEE/ASME Joint Railroad Conference*. pp. 29–33. doi:10.1109/RRCON.1997.581349. ISBN 0-7803-3854-5.

135. "Power electronics - Engineering and Technology History Wiki". ethw.org.

136. Price, Trevor J (3 May 2005). "James Blyth – Britain's First Modern Wind Power Engineer". *Wind Engineering*. 29(3): 191–200. doi:10.1260/030952405774354921. S2CID110409210.

137. Ramirez Camargo, Luis; Nitsch, Felix; Gruber, Katharina; Valdes, Javier; Wuth, Jane; Dorner, Wolfgang (January 2019). "Potential Analysis of Hybrid Renewable Energy Systems for Self-Sufficient Residential Use in Germany and the Czech Republic". *Energies*. 12 (21): 4185. doi:10.3390/en12214185.

138. Renewable Power Generation Costs in 2017 (PDF). International Renewable Energy Agency. January 2018. p. 11. ISBN 978-92-9260-040-2. Figure ES.4.
139. Romanuke, Vadim (2018). "Wind Farm Energy and Costs Optimization Algorithm under Uncertain Parameters of Wind Speed Distribution" (PDF). *Studies in Informatics and Control*. 27 (2): 155–164.
140. Rubin, GJ; Burns, M; Wessely, S (7 May 2014). "Possible psychological mechanisms for "wind turbine syndrome". On the windmills of your mind". *Noise & Health*. 16 (69): 116–122. doi:10.4103/1463-1741.132099. PMID 24804716.
141. Ruviaro, M. Wound Rotor Doubly Fed Induction Machine with Radial Rotary transformer/ Ruviaro M., Runcos F. //Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications. – 2013. – vol.12. - n.2 – P. 411-426.
142. Ruviaro, M., A brushless doubly fed induction machine with flat rotary transformers. / Ruviaro M., Runcos F.//IEEE 2012 XXth International Conference on Electrical Machines, 2012, pp. 23-29, DOI: 10.1109/ICElMach.2012.6349832.
143. S. MÜLLER; S.; et al. (2002). "Doubly Fed Induction Generator Systems for Wind Turbines" (PDF). *IEEE Industry Applications Magazine*. IEEE. 8 (3): 26–33. doi:10.1109/2943.999610.
144. S.A. Gandzha, Modelling of Permanent Magnet Direct Current Motor with Electromagnetic Reduction, S.A. Gandzha, Collection of papers of Software Users Sixth Conference CAD_FEMGmbH (20–21 April 2006), Moscow, 2006, pp. 358–360.
145. Santhosh, Madasthu; Venkaiah, Chintham; Kumar, D. M. Vinod (2020). "Current advances and approaches in wind speed and wind power forecasting for improved renewable energy integration: A review". *Engineering Reports*. 2 (6): e12178. doi:10.1002/eng2.12178. ISSN 2577-8196.
146. Seman, Slavomir; Niiranen, Jouko; Virtanen, Reijo; Matsinen, Jari-Pekka (2008). "Low voltage ride-through analysis of 2 MW DFIG wind turbine - grid code compliance validations". 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting -

Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. pp. 1–6. doi:10.1109/PES.2008.4596687. ISBN 978-1-4244-1905-0.

147. Sharman, Hugh (May 2005). "Why wind power works for Denmark". Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Civil Engineering. 158 (2): 66–72. doi:10.1680/cien.2005.158.2.66.

148. Shen, Shiran Victoria; Cain, Bruce E.; Hui, Iris (2019). "Public receptivity in China towards wind energy generators: A survey experimental approach". Energy Policy. 129: 619–627. doi:10.1016/j.enpol.2019.02.055.

149. Shively, E. K.; Whitlow, Geo. S. (1932). "Automatic Control for Variable Ratio Frequency Converters". Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. 51: 121–127. doi:10.1109/T-AIEE.1932.5056029.

150. Siemens. Wind Generators from Siemens. – URL: <https://new.siemens.com/global/en/markets/wind/equipment/energy-generation/windgenerators.html> (дата обращения 29.01.2020).

151. Staffell, Iain; Pfenninger, Stefan (1 November 2016). "Using bias-corrected reanalysis to simulate current and future wind power output". Energy. 114: 1224–39. doi:10.1016/j.energy.2016.08.068.

152. Subbaian, V. Maximum energy capture of variable speed variable pitch wind turbine by using RBF neural network and fuzzy logic control/ V. Subbaian, S. Sasidhar //. International Research Journal of Engineering and Technology – 2015. - no. 2. - P. 493-500.

153. The Australia Institute (October 2006) Wind Farms: The facts and the fallacies Archived 25 February 2012 at the Wayback Machine Discussion Paper No. 91, ISSN 1322-5421, p. 28.

154. Ushakov, V.Y. Electric power engineering on the basis of renewable energy sources / V.Y. Ushakov // Springer Verlag. – 2018. – P. 89–140. DOI: 10.1007/978-3-319-62301-6_5.

155. Wenping C., Ying X., Zheng T. Wind Turbine Generator Technologies. Chapter in open access book Winding Engineering. IntechOpen. <https://www.intechopen.com/books/advances-in-wind-power/wind-turbine-generator-technologies>. DOI: 10.5772/51780.

156. Wind Turbines in Denmark (PDF). section 6.8, p. 22, Danish Energy Agency. November 2009. ISBN 978-87-7844-821-7. Archived from the original (PDF) on 23 October 2013.

157. Zavadil, R.; Miller, N.; Ellis, A.; Muljadi, E. (2005). "Making connections". IEEE Power and Energy Magazine. 3 (6): 26–37. doi:10.1109/MPAE.2005.1524618. S2CID 3037161.

Приложение А. Классификация ветроэнергетических установок по мощности и конструктивному исполнению

По выходной мощности ветрогенераторы можно разделить на типы:

- ветрогенераторы малой мощности (до 10 кВт);
- ветрогенераторы средней мощности (от 10 до 100 кВт);
- ветрогенераторы большой мощности (более 100 кВт).

ВЭУ имеют много вариантов исполнения, но их можно разделить на два основных типа: ветрогенераторы с горизонтальной и вертикальной осью вращения.

КПД ветроколеса ветротурбины определяется как отношение механической мощности на валу к мощности ветрового потока и зависит от скорости ветра и конструкции ветроколеса. Максимальный КПД для различных ветрогенераторов показан на рисунке П.1.

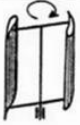
 0.35	 0.4	 0.3
 0.45	 0.5	 0.25
 0.25	 0.35	
 0.3	 0.35	
 0.2	 0.4	

Рис. П.1. Различные конструкции ветроколес и их эффективность

Приложение Б. Конструкция асинхронной машины с фазным ротором

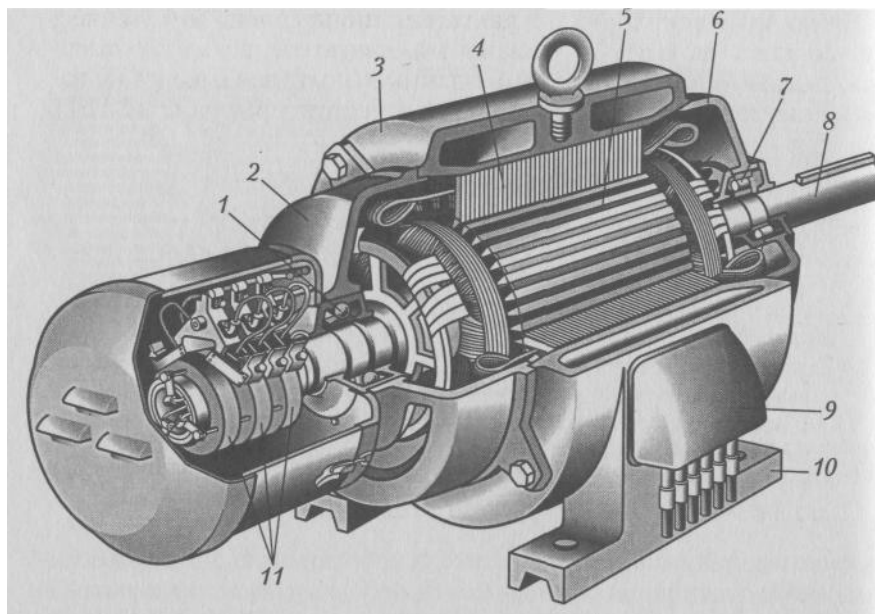


Рис. П.2. Общий вид конструкции асинхронной машины с фазным ротором: 1 – подшипник с не приводным концом, 2 – подшипниковый щит с не приводным концом, 3 – корпус, 4 – сердечник статора, 5 – сердечник ротора, 6 – подшипниковый щит с приводным концом, 7 – подшипник с приводным концом, 8 – вал, 9 – коробка выводов, 10 – опорная лапа, 11 – щеточно-контактный узел

**Приложение В. Применение проектной системы при проектировании
асинхронизированного синхронного генератора
для ветроустановки 3,6 МВт.**

Разработанный программный комплекс был использован при проектировании АСГ для ветроустановки большой мощности.

Параметры генератора:

Номинальная мощность, (кВт)	3600
Номинальное линейное напряжение, (В)	6000
Частота выходного напряжения, (Гц)	50
Синхронная частота вращения, (об/мин)	1000
Минимальная частота вращения, (об/мин)	700
Максимальная частота вращения, (об/мин)	1300

В результате работы подсистемы синтеза была определена оптимальная геометрия активных частей. При этом габаритные размеры генератора составили: наружный диаметр – 1 100 мм, осевая длина сердечника с учетом радиальных вентиляционных каналов – 1 210 мм. Расчетная полная масса активных частей составила 5 900 кг.

Ниже приведены результаты работы подсистемы анализа.

Для проверки генератора проводился следующий численный эксперимент: задавалась разная частота вращения вала генератора – 700, 1 000, 1 300 об/мин. Для этих скоростей частота питания обмотки возбуждения и ток в обмотке возбуждения подбирались таким образом, чтобы на выходе получалось номинальное напряжение и номинальная мощность.

Результаты анализа представлены ниже.

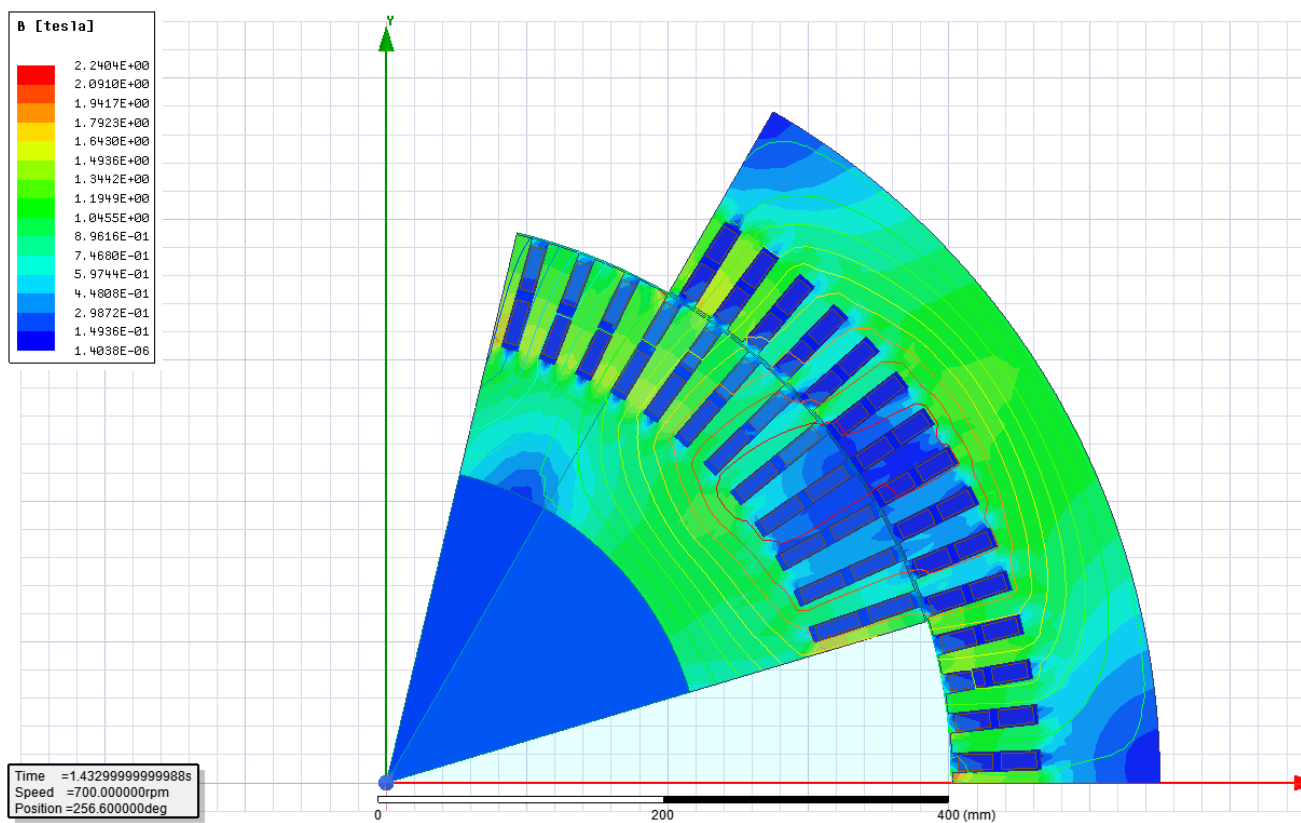


Рис. П.3 Анализ магнитного поля при частоте вращения 700 об/мин.

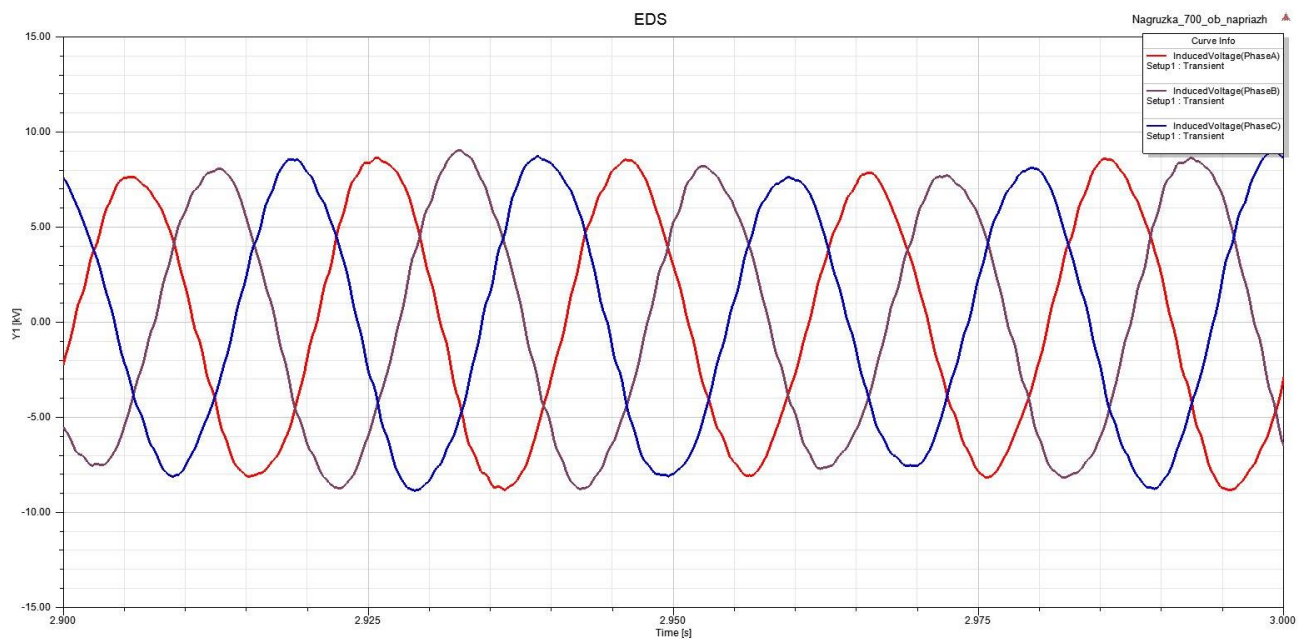


Рис. П.4. ЭДС обмотки статора (частота вращения 700 об/мин)

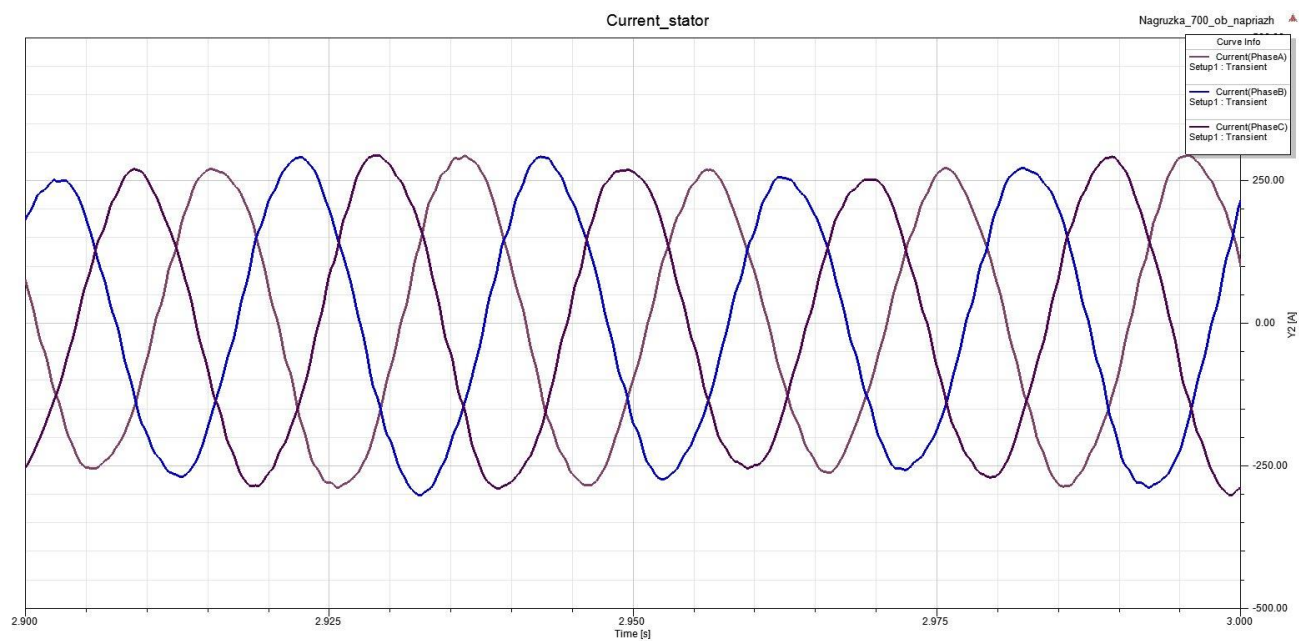


Рис. П.5. Ток статора (частота вращения 700 об/мин)

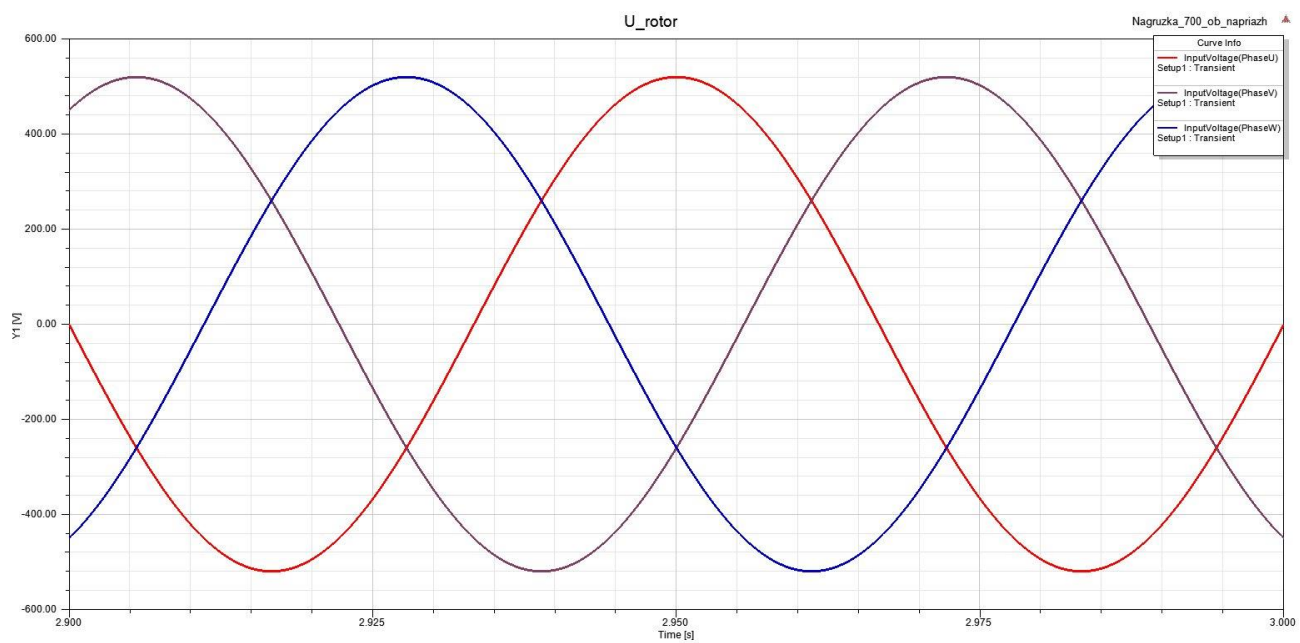


Рис. П.6. Напряжение обмотки возбуждения (частота вращения 700 об/мин)

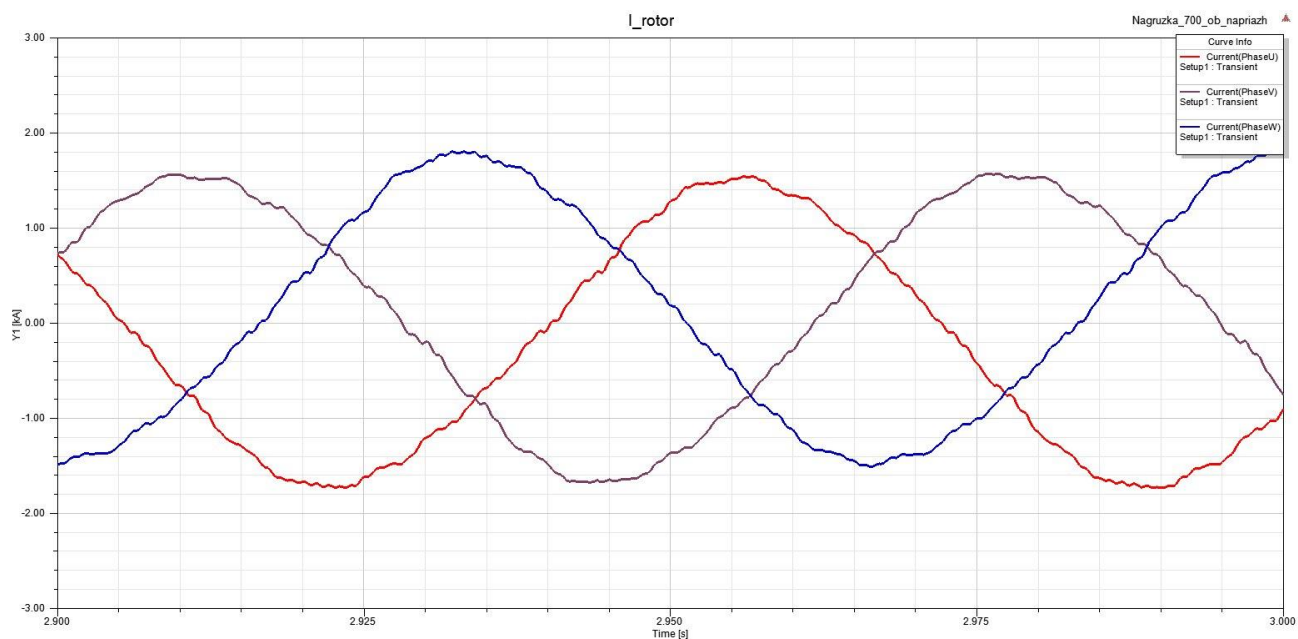


Рис. П.7. Ток обмотки возбуждения (частота вращения 700 об/мин)

В таблицах П.1 и П.2 приведены основные электрические показатели генератора, полученные при численном эксперименте.

Таблица П.1

Частота вращения, об/мин	Выходное напряжение, В	Ток нагрузки (действующее значение), А	Фазное напряжение обмотки возбуждения (действующее значение), В	Ток обмотки возбуждения (действующее значение), А
700	6003	200	367	1140
1000	6010	200	7,6	1400
1300	6005	200	360	1130

Таблица П.2

Частота вращения, об/мин	Выходная мощность, кВт	Мощность возбуждения, кВт	Механическая мощность на валу, кВт	Суммарная первичная мощность, кВт	КПД
700	3602	1265	2428	3693	0,975
1000	3606	21,28	3670	3691	0,977
1300	3603	1220 (мощность поменяла знак)	4941	4941	0,978

Результаты численного эксперимента показывают, что при изменении частоты вращения вала генератора от минимального значения до максимального выходное напряжение и мощность имеют стабильные значения, то есть генератор выполняет основную функцию: генерация стандартной энергии по частоте, амплитуде и фазе при изменении частоты вращения ротора.

Приложение Г. **Обзор современных систем автоматизированного проектирования**

Система автоматизированного проектирования позволяет:

- ускорить расчеты и выполнение чертежей при проектировании;
- повысить качество получаемой конструкторской документации;
- успешно решать задачи интеграции проектирования и других видов инженерной деятельности, надежного хранения и передачи информации.

Эффективность САПР в значительной мере определяется возможностями прикладного программного обеспечения, то есть набором программ, позволяющим решать конкретные задачи проектирования. В зависимости от возможностей современные САПР можно условно разбить на три уровня: низший, средний и высший.

Системы низшего уровня (например, AutoCAD, VersaCAD, Компас) обеспечивают выполнение чертежных работ, предоставляя возможность создания и редактирования двухмерных и трехмерных изображений объектов.

Название: nanoCAD

Разработчик: **Нанософт**

Страна разработки: **Россия**

Краткое описание:

Первая отечественная свободно распространяемая базовая САПР-платформа для различных отраслей. Платформа nanoCAD содержит инструменты базового проектирования, совместима с другими САПР-решениями. Система изначально ориентирована на полную поддержку стандартов Единой системы конструкторской документации.

Название: Компас

Разработчик: **АСКОН**

Страна разработки: **Россия**

Краткое описание:

Система КОМПАС-3D предназначена для создания трехмерных ассоциативных моделей отдельных деталей и сборочных единиц, содержащих как оригинальные, так и стандартизованные конструктивные элементы. Параметрическая технология позволяет быстро получать модели типовых изделий на основе однажды спроектированного прототипа. Основные компоненты КОМПАС-3D: система трехмерного твердотельного моделирования, универсальная система автоматизированного проектирования КОМПАС-График и модуль проектирования спецификаций.

Название: AutoCad

Разработчик: **Autodesk**

Краткое описание:

Самая популярная в мире среда автоматизированного проектирования, выбранная многими разработчиками в качестве базовой графической платформы для создания машиностроительных, архитектурных, строительных, геодезических программ и систем инженерного анализа.

Название: SolidWorks

Разработчик: SolidWorks Corp.

Страна разработки: США

Краткое описание:

SolidWorks – мощное средство проектирования, базирующееся на передовых технологиях гибридного параметрического моделирования, интегрированных средствах электронного документооборота SWR-PDM/Workflow и широком спектре специализированных модулей.

Системы высшего уровня (EDS Unigraphics, Pro/Engineer, CATIA или CADDs) обеспечивают интеграцию всего цикла создания изделия от проектирования и подготовки к производству до изготовления. Они позволяют конструировать детали с учетом особенностей материала, проводить динамический анализ сборки с имитацией сборочных приспособлений и

инструмента, проектировать оснастку с моделированием процессов изготовления, что исключает брак в оснастке и делает ненужным изготовление натурных макетов, то есть значительно уменьшаются затраты и время на подготовку к производству изделия. Программы математического анализа таких САПР могут включать прочностной, кинематический и динамический анализ. Моделирование механообработки позволяет оценить качество деталей с точки зрения их деформации.

Название: CATIA

Разработчик: Dassault Systemes

Страна разработки: Франция

Краткое описание:

CATIA V5 (Computer Aided Three-dimensional Interactive Application) – CAD/CAM/CAE-система для описания изделия и его моделирования на разных этапах жизненного цикла. Разработана в 1998 году на основе нового ядра CNEXT, содержащего средства как для описания геометрии изделия, так и для описания процессов его создания, с возможностью сохранять и накапливать используемые при этом приемы и методы в виде корпоративных знаний. Система CATIA – одна из самых распространенных САПР высшего уровня. Это комплексная система автоматизированного проектирования (CAD), технологической подготовки производства (CAM) и инженерного анализа (CAE), включающая в себя передовой инструментарий трехмерного моделирования, подсистемы программной имитации сложных технологических процессов, развитые средства анализа и единую базу данных текстовой и графической информации. Система позволяет эффективно решать все задачи технической подготовки производства изделия – от внешнего (концептуального) проектирования до выпуска чертежей, спецификаций, монтажных схем и управляющих программ для станков с ЧПУ.

Работа со специализированными САПР

Программы для расчета электроснабжения

ElectriCS ADT. Система ElectriCS ADT предназначена для автоматизированного проектирования систем электроснабжения промышленных предприятий и других организаций.

ElectriCS 3D. Программный пакет ElectriCS 3D предназначен для автоматизированной (автоматической и интерактивной) раскладки кабелей различного назначения при проектировании, реконструкции и эксплуатации зданий, сооружений и открытых территорий.

ElectriCS Light. Система ElectriCS Light предназначена для светотехнических расчетов при проектировании осветительных установок промышленных предприятий.

ElectriCS Storm. Система ElectriCS Storm предназначена для автоматизированного проектирования молниезащиты и заземления зданий и сооружений.

EnergyCS Электрика. Программный комплекс «EnergyCS Электрика» предназначен для выполнения электротехнических расчетов при проектировании и эксплуатации распределительных сетей низкого и среднего напряжения.

EnergyCS. Комплекс программ EnergyCS предназначен для выполнения электротехнических расчетов при проектировании и эксплуатации электроэнергетических систем любой сложности.

EnergyCS Line. Программный комплекс EnergyCS Line предназначен для автоматизации проектирования механической части воздушных линий электропередач (ВЛ), волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), подвешиваемых на опорах ВЛ, а также гибких ошиновок открытых распределительных устройств (ОРУ) электрических станций и подстанций.

Project StudioCS Электрика. Программа «Project StudioCS Электрика» предназначена для автоматизации проектирования системы электроснабжения

(СЭС) объектов гражданского и промышленного строительства в строгом соответствии с действующими стандартами.

Project StudioCS СКС. Программа предназначена для автоматизированного проектирования структурированных кабельных систем (СКС) зданий в среде AutoCAD.

SchematiCS. Приложение SchematiCS работает на платформе AutoCAD, применяется для автоматизации создания принципиальной схемы любой сложности и формирования ее структурной модели.

Model Studio CS Открытые распределительные устройства. Программный комплекс «Model Studio CS Открытые распределительные устройства» является первым продуктом серии Model Studio CS. Предназначен для разработки компоновочных решений в трехмерном пространстве открытых распределительных устройств, выполнения расчетов гибкой ошиновки, выпуска проектной и рабочей документации (чертежей, спецификаций и т. д.).

«Кад Групп» предлагает следующие программные модули для инженерных коммуникаций.

ElectriCA. Программный комплекс предназначен для автоматизации выполнения работ на этапах проектирования и эксплуатации распределительных сетей низкого и среднего напряжения.

ElectriCS. САПР предназначена для проектирования электрооборудования, используемого в различных отраслях промышленности: в авиастроении, общем и транспортном машиностроении, станко- и приборостроении.

Программный комплекс «ЭЛЕКТРА» (www.rfliira.ru). В автоматизированном режиме выполняются следующие разделы электротехнической части проекта: электроосвещение, расчет нагрузок, электросиловое оборудование с выдачей монтажных таблиц. Состоит из следующих подсистем.

ЭПОС – система автоматизированного проектирования распределительных и питающих сетей силового электрооборудования.

КАРМЭН (Комплексный Автоматизированный Расчет Мощностей Электрических Нагрузок) – подсистема для расчета электрических нагрузок.

КАРМЭН-М – программа предназначена для расчета нагрузок многоэтажного здания.

ПРОМИНЬ – подсистема системы автоматизированного проектирования для светотехнических расчетов.

Автоматизация проектирования электроники

Автоматизация проектирования электронных устройств (*Electronic Design Automation, EDA*) – комплекс программных средств для облегчения разработки электронных устройств, создания микросхем и печатных плат. К данному комплексу относятся следующие программы:

[P-CAD / Altium Designer](#)

[OrCAD](#)

[Electric](#)

[Proteus](#)

[KiCad](#)

[Fritzing](#) – программа со свободной лицензией для новичков

[gEDA](#)

[Specctra](#)

[TopoR](#)

[CADSTAR](#)

Выводы

Сектор программного обеспечения на рынке проектирования систем электроснабжения общественных и бытовых объектов достаточно заполнен. В

нем преобладают программные модули САПР, которые используются в крупных проектных организациях и ориентированы на определенный круг потребителей. Кроме того, подобные системы работают со сложившимся набором баз данных, включающих изделия и оборудование определенных производителей. И хотя возможности таких систем практически неограниченные, исходные справочники баз данных имеют низкую степень обновляемости, что касается в том числе информации о ценах на изделия и оборудование.

Приложение Д. Документы о внедрении результатов диссертационного исследования в АО «Русские электрические двигатели»



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «РУССКИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ»

Енисейская ул., д. 8-и, г. Челябинск, Россия, 454010; тел. (351) 204-44-44, тел. (351) 204-44-11; факс-сервер (351) 216-89-09;

e-mail: red@udm.transneft.ru; ИНН 7449126763; КПП 744901001; ОКПО 56410997; ОГРН 1157449004833

АКТ

внедрения результатов диссертационного исследования

Настоящим удостоверяю, что результаты диссертационной работы Котова Антона Андреевича «Проектирование и анализ асинхронизированного синхронного генератора для ветроэнергетических установок большой мощности» внедрены на предприятии АО «РЭД». Разработанная методика оптимизации геометрии на основе обобщенных переменных и методика анализа электромагнитного и теплового состояния для решения связанной задачи используются при проектировании новых образцов генераторов для перспективного рынка ветроэнергетики.

Технический директор

Д.В. Соколов