

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого  
Президента России Б. Н. Ельцина»

На правах рукописи



**Котов Антон Андреевич**

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

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2021

Работа выполнена на кафедре «Теоретические основы электротехники» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент,  
**Ганджа Сергей Анатольевич**

Официальные оппоненты: **Казаков Юрий Борисович**,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», заведующий кафедрой «Электромеханика»;

**Зубков Юрий Валентинович**,  
доктор технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», профессор кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование»;

**Мошкин Владимир Иванович**,  
доктор технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Курганский государственный университет», заведующий кафедрой «Энергетика и технология металлов».

Защита состоится «27» мая 2021 г. в 13:15 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 05.01.02 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=2156>

Автореферат разослан «    » апреля 2021 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Болотин Кирилл Евгеньевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность предмета исследования.** В современных условиях 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 ее кризису, если не предпринять попытки к развитию энергетики альтернативной.

Один из вариантов решения назревших проблем – изменение баланса генерации электроэнергии в сторону расширения использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

В настоящее время доля ВИЭ в общем балансе энергогенерации развитых стран постоянно растет, при этом энергия ветра является одним из наиболее доступных источников возобновляемой энергии. По данным Global Wind Energy Council, на конец 2019 года объем установленных мощностей ветроэнергетических установок (ВЭУ) в мире составил 651 ГВт. Наибольшая доля приходится на Азию (44,8 %), Европу (31,4 %) и Северную Америку (26 %). За последние два десятилетия мировой объем вырабатываемой ВЭУ электроэнергии вырос почти в 30 раз, а объем установленных мощностей ВЭУ – почти в 40 раз.

В России ветроэнергетика используется в меньшем масштабе, тем не менее, в последнее время эта отрасль в стране достаточно интенсивно развивается. Особенность ее развития заключается в том, что строительство ветроэнергетических станций (ВЭС) реализуется в основном с привлечением зарубежных компаний, таких как Siemens Gamesa Renewable Energy S.A., Vestas, Lagerwey. 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 новые предприятия и рабочие места. В том числе локализуется производство крупных электрических генераторов для ВЭУ. 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, довольно часто и 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.**

**Степень научной разработанности проблемы.** В России в области ветроэнергетики существует большое количество научных разработок.

Наиболее значимый научный вклад в развитие ВЭУ в целом и отдельных ее компонентов внесли следующие научные учреждения: Московский энергетический институт (государственный технический университет) (К. Я. Вильданов, В. А. Морозов, В. И. Нагайцев, А. В. Иванов-Смоленский, С. В. Иваницкий, Н. И. Пашков, С. А. Грузков, Н. Ф. Ильинский, В. А. Кузнецов, А. Б. Красовский, О. П. Темиров, В. Н. Остриров, В. Ф. Козаченко, А. М. Русаков),

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (С. Г. Герман-Галкин), Уральский федеральный университет (А. Т. Пластун, Ф. Н. Сарапулов, С. Е. Миронов, Е. Н. Андреев), Ивановский государственный энергетический университет (Н. Н. Новиков, Е. Б. Герасимов, Ю. Б. Казаков, А. И. Тихонов), Самарский государственный технический университет (Ю. А. Макаричев, А. В. Стариков, Ю. В. Зубков, Э. Г. Чеботков, А. С. Ануфриев), Липецкий государственный технический университет (В. Н. Мещеряков, А. А. Муравьев), Томский политехнический университет (Инженерная школа энергетики) (В. М. Завьялов, С. Е. Клочков), Уфимский государственный авиационный технический университет (Р. Н. Султангалеев, В. В. Семенов), Нижегородский государственный технический университет: ученые О. С. Хватов, В. Г. Титов, А. В. Шахов, О. Н. Ошмарин), Южно-Уральский государственный университет (Ю. С. Усынин, М. А. Григорьев, Д. А. Сычев, С. А. Ганджа).

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 разработки 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.

Большое количество 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, связанные с проектированием и оптимизацией самой электрической машины, в полной мере не раскрываются. Существующие САЕ-системы являются основой 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 представленной диссертации предпринята попытка разработать проектную систему, сочетающую в себе методику синтеза оптимальной геометрии и анализа полученных конструкторских решений применительно к генератору двойного питания для мощных ВЭУ.

**Цель диссертационного исследования** заключается в выборе наилучшего типа генератора применительно к мощной ветроэнергетической установке, в разработке системы оптимизации с учетом габаритных ограничений, в разработке 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**, которые для достижения поставленной цели необходимо последовательно решить:

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 отношения 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.

**Объект исследования** – асинхронизированный синхронный генератор большой мощности, предназначенный для работы в составе ветроэнергетической установки.

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

**Научная новизна** представленного 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 методике анализа его электромагнитного и теплового состояния при различных режимах работы.

**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.

**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.

**Соответствие паспорту специальности.** Диссертация соответствует 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, электро-механических 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, электро-механических 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 имеет 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 асинхронизированных синхронных генераторов. 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.

**Степень достоверности результатов работы.** Достоверность полученных научных результатов подтверждается корректным использованием таких известных методов анализа и синтеза, применяемых в общей теории электрических машин, как метод эквивалентных схем замещения, метод конечных элементов, методы нелинейного программирования. Проектная система применялась при разработке реальных ветроэнергетических установок.

**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».

**Апробация 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 диссертационной работы опубликовано **8** научных работ, в том числе **6** статей в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК и Аттестационным советом УрФУ, из них 3 статьи в журналах, индексированных в базе данных **Scopus**, а также имеется одна публикация в международном издании Intechopen (Лондон).

**Личный вклад автора в диссертационное исследование.** Все научные результаты, включенные в диссертацию и представленные к защите, получены лично автором. Личный вклад диссертанта в работах, опубликованных в соавторстве, состоит в определении направлений исследования, постановке задач, разработке математических и имитационных моделей. Диссертация не содержит результатов научных работ, выполненных в соавторстве, без ссылок на соавторов.

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.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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.

В **первой главе** сформулирована основная проблема ветроэнергетики, которая заключается в преобразовании нестандартных параметров электроэнергии в стандартные при изменении направления ветрового потока и его интенсивности.

Из всех типов генераторов можно выделить несколько основных, применяющихся в ветроустановках: генераторы постоянного тока (ГПТ), асинхронные генераторы (АГ), синхронные генераторы (СГ), асинхронизированные синхронные генераторы (АСГ).

Для мощных ВЭУ наиболее целесообразно использование АСГ. По конструкции это асинхронная машина с фазным ротором, но способ ее соединения с сетью отличается от вариантов АГ и СГ. Обмотку статора напрямую подключают к сети, а обмотку ротора подключают к сети через управляемый преобразователь частоты. Структурная схема ВЭУ на основе АСГ показана на рис.1.

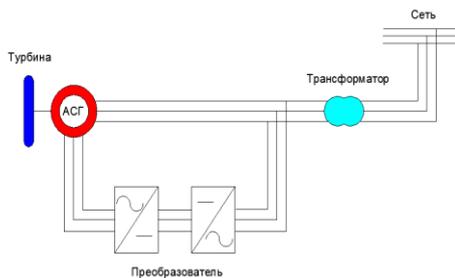


Рис. 1. Структурная схема ВЭУ на основе АСГ

Преобразователь частоты генерирует вращающееся магнитное поле ротора, которое индуцирует выходное напряжение генератора. Движение ротора может увеличивать скорость вращения поля или уменьшать ее. Таким образом, при изменении скорости вращения ротора управляемый преобразователь частоты может подбирать ее таким образом, чтобы результирующая скорость вращения поля обеспечивала стандартную частоту.

Даже когда ротор находится в неподвижном состоянии, генератор может отдавать в сеть стандартную энергию. При этом регулировка во всем диапазоне происходит по цепи возбуждения, что требует меньшей мощности, чем регулировка по силовой цепи. Данный тип генератора может функционировать в трех основных режимах работы.

1. Досинхронная скорость вращения ротора – к скорости вращения ротора добавляется скорость вращения поля. Активная энергия генерируется в сеть, реактивная энергия потребляется из сети в цепь ротора.

2. Синхронная скорость вращения ротора – скорость вращения ротора совпадает с частотой сети. На обмотку ротора подается постоянное напряжение, и он работает в режиме синхронного генератора. Активная энергия генерируется в сеть, энергия на возбуждение берется из источника постоянного тока.

3. Сверхсинхронная скорость вращения ротора – скорость ротора больше частоты сети. Поле ротора вращается в противоположную сторону по

отношению к вращению самого ротора, скорость вращения поля вычитается из скорости вращения ротора, чтобы обеспечить требуемую частоту выходного напряжения. Активная и реактивная энергии генерируются в сеть.

Данная электрическая машина обладает возможностью генерировать электроэнергию с постоянными параметрами в широком диапазоне частоты вращения ротора и возможностью управлять потоками реактивной мощности по цепи возбуждения, через которую проходит меньшая мощность, что соответственно сказывается на габаритах и стоимости электронного преобразователя. Эти особенности делают машину двойного питания наиболее привлекательной и эффективной для использования в ВЭУ. В последнее время применительно к мощным ветроустановкам ставка делается именно на генераторы двойного питания.

Вариант АСГ, находящий широкое применение в ВЭУ больших мощностей, однако не лишен технического недостатка, связанного с наличием скользящего контакта. Исключение щеточно-контактного узла из конструкции АСГ остается актуальной задачей на сегодняшний день. Ее решение существенно повысило бы надежность генератора и упростило техническое обслуживание, что важно для устройств, находящихся на большой высоте в сложных климатических условиях.

На основании анализа технических решений, применяемых в мировой практике, можно заключить, что в данный момент возможны следующие пути преодоления данного недостатка: установка бесщеточного возбуждательного устройства (БВУ) либо вращающегося трансформатора.

Анализ показал, что в качестве бесконтактного источника питания цепи ротора можно использовать еще один вариант – размещение аккумуляторной батареи (АКБ) 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 и общая электрическая схема установки представлена на рис. 2.

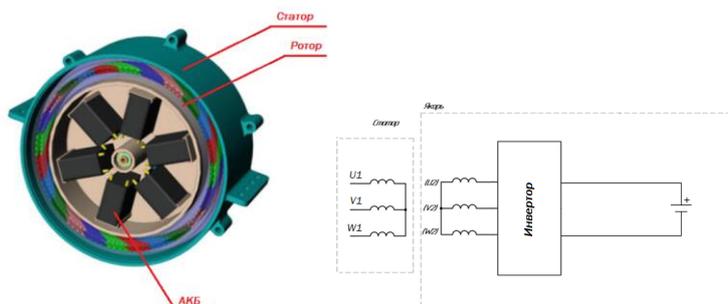


Рис. 2. Общий вид АСГ с АКБ на роторе и общая электрическая схема установки

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 полной остановке ротора из-за отсутствия ветра 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 неограничена. 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 3, схематично показаны варианты работы АСГ в двигательном и генераторном режимах на досинхронной и сверхсинхронной частотах. Диаграмма демонстрирует направления движения энергетических потоков статора и ротора.

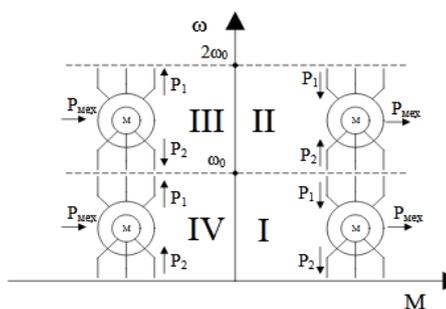


Рис. 3. Режимы работы, реализуемые в АСГ

Как видно из рисунка, в режиме генератора при скорости вращения ротора выше синхронной (сегмент III) мощность в цепи ротора АСГ меняет свое направление. Это означает, что обмотка ротора начинает генерировать электрическую энергию, а не потреблять ее. Данный режим можно использовать для зарядки АКБ и накопления электроэнергии для ВЭУ. Следует отметить, что для АКБ воздействие центробежных сил на электролит является нестандартным режимом работы и требует исследования применения этой технологии.

Кроме того, для размещения АКБ на роторе необходим требуемый объем. В связи с чем 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.

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.

Конечной целью данного исследования является разработка проектной системы АСГ. Следует отметить, что создание законченной САПР выходит далеко за рамки данной диссертации, а также 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.

Анализ развития САПР показывает, что в конечном счете они нацелены на сквозную технологию, которая предполагает уменьшение бумажного документооборота, сокращение промежуточных звеньев проектирования и количества разработчиков в проекте. Укрупненная структура сквозного проектирования АСГ показана на рисунке 4.



Рис.4. 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

Во **второй главе** разработана математическая модель электромагнитного расчета АСГ для оптимизации его геометрии.

Конструктивно АСГ представляет собой асинхронную машину с фазным ротором. 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 уменьшить 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.

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 включение ее 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 расчета критических частот базируются на том, что ротор АСГ изначально рассматривается упрощенно и представляет собой деталь вращения, состоящую из трех цилиндрических участков. Пример рассматриваемого эскиза ротора показан на рисунке 5.

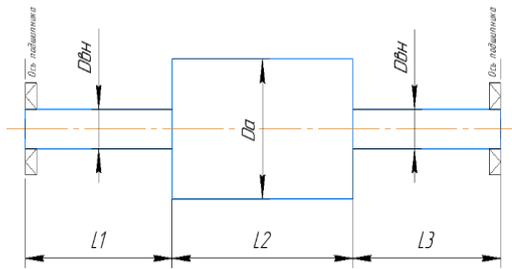


Рис. 5. Эскиз ротора АСГ

Полагаем, что перед началом расчета из технического задания (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  $L_1$  и  $L_3$  на рисунке 5).

Длина сердечника с обмоткой (размер  $L_2$  на рисунке 5) в данном расчете выступает в роли переменной и задается в виде ограниченного диапазона. Далее последовательно производится расчет параметров.

В результате расчета получается зависимость значения первой критической частоты ротора от активной части ротора. Пример зависимости для ротора, имеющего размеры  $L_1 = L_3 = 0,5$  м,  $D_a = 0,808$  м,  $D_{вн} = 0,2$  м, представлен на рисунке 6.

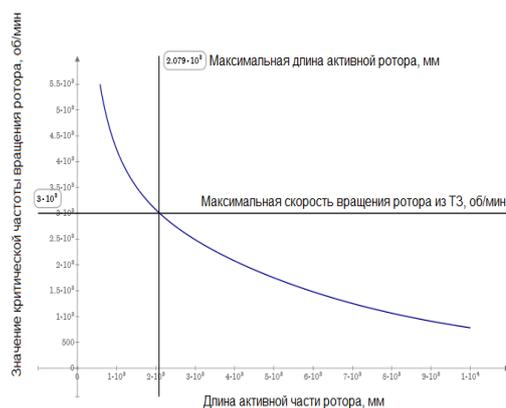


Рис. 6. Зависимость значений первой критической частоты вращения ротора от длины активной части ротора

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 данное 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.

Математическая модель электромагнитного расчета – это совокупность аналитических зависимостей, однозначно определяющих геометрию электрической машины, ее параметры и электромагнитные характеристики. С целью достижения приемлемого времени оптимизации математическая модель изначально должна быть максимально упрощена, но в то же самое время обеспечивать достаточную точность.

В общем случае математическая модель должна иметь входные параметры, которые задаются для расчетных уравнений, и выходные параметры, которые получаются по результатам расчета.

Входные параметры можно разделить на три независимые группы.

1. Константы (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.

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

Выбор независимых переменных – один из самых важных вопросов построения математической модели, поскольку они совместно с константами должны полностью определять вариант проектируемого изделия, кроме того, от качественных характеристик выбранных переменных зависит работоспособность и точность математической модели. В связи с этим сформулируем перечень требований, которые можно предъявить к независимым переменным для математической модели, участвующей в оптимизационных расчетах.

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.

В данной работе было решено отказаться от применения геометрических размеров магнитопровода в качестве переменных в пользу соотношения площадей активных зон.

Обозначим эти переменные термином «обобщенные переменные», который отражает их физическую сущность, и определим их для АСГ.

Для АСГ удобно выделить семь обобщенных переменных:

1. Переменная  $f_s$  – показывает, какую часть от площади поперечного сечения электрической машины занимают активные части электрической машины (рис. 7).

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

2. Переменная  $f_a$  – отражает отношение площади поверхности, занимаемой ротором, к площади поверхности, которую занимают активные части машины (рис.8).

$$f_a = \frac{S_{\text{ротора}}}{S_{\text{поп.сеч.маш}}},$$

3. Переменная  $f_{er}$  – показывает отношение площади поверхности пазово-зубцового слоя ротора к площади поверхности, которую занимает сам ротор (рис. 9).

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

4. Переменная  $f_{zr}$  – отражает отношение площади поверхности, занимаемой пазами ротора, к площади поверхности, которую занимает пазово-зубцовый слой ротора (рис. 10).

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

5. Переменная  $f_{es}$  – показывает отношение площади поверхности пазово-зубцового слоя статора к площади поверхности, которую занимает сам статор (рис. 11).

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

6. Переменная  $f_{zs}$  – отражает отношение площади поверхности, занимаемой пазами статора, к площади поверхности, которую занимает пазово-зубцовый слой статора (рис. 12).

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

7. Переменная  $f_{es1}$  – показывает, какую часть от общей площади поперечного сечения электрической машины занимают ротор и вал, исключая спинку статора (рис. 13).

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

Через обобщенные переменные можно выразить все остальные линейные размеры АСГ, представленные на рисунке 14.

Обобщенные переменные обладают всеми необходимыми характеристиками для применения их в качестве независимых переменных в оптимизационных расчетах. Они наглядны и имеют ясный физический смысл. 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.

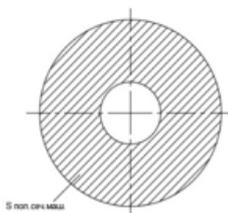


Рис. 7. Переменная  $f_s$

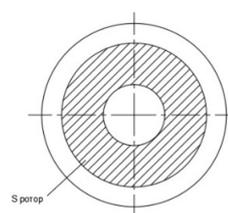
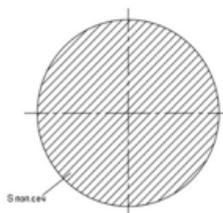
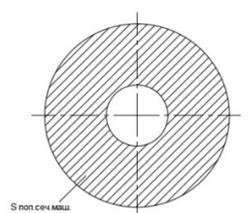


Рис. 8. Переменная  $f_a$



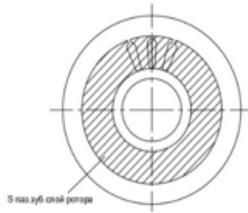
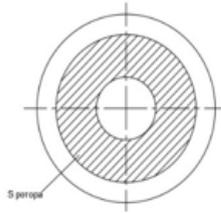
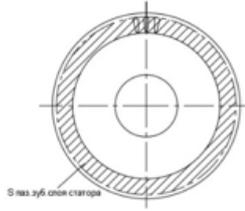
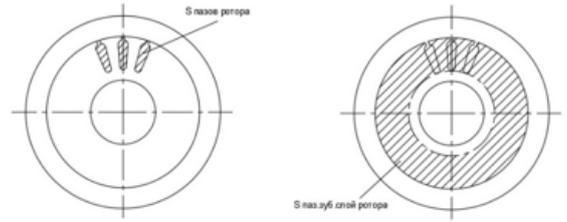
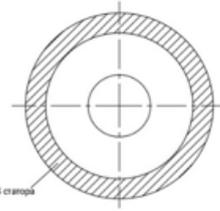
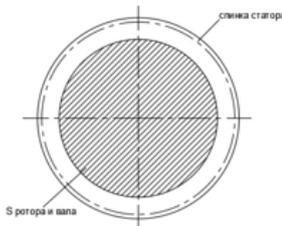
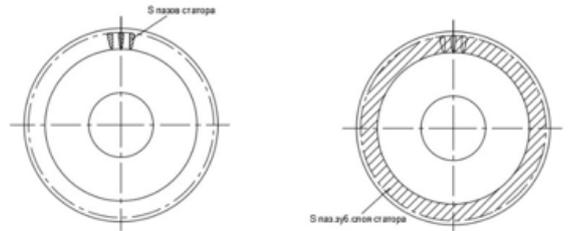
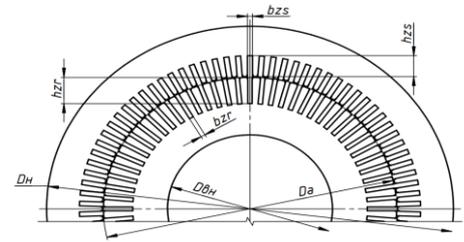
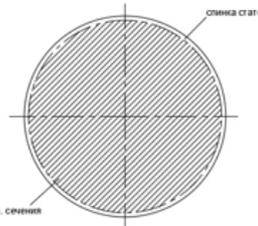
Рис. 9. Переменная  $f_{er}$ Рис. 10. Переменная  $f_{zr}$ Рис. 11. Переменная  $f_{es}$ Рис. 12. Переменная  $f_{zs}$ Рис. 13. Переменная  $f_{es1}$ 

Рис. 14. Эскиз поперечного сечения магнитопровода АСГ

Зная геометрию, можно определить все параметры и характеристики АСГ. Из всех возможных режимов работы для АСГ представляют интерес генераторные режимы работы на досинхронной и сверхсинхронной скоростях. В этих режимах система уравнений, описывающих электромагнитные процессы при стационарной нагрузке, имеет вид:

$$\begin{aligned} \bar{U}_1 &= R_s \bar{I}_1 + jX_{ls} \bar{I}_1 + \bar{E}_1; & \frac{\bar{U}_2^1}{s} &= \frac{R_r}{s} \bar{I}_2^1 + jX_{lr} \bar{I}_2^1 + \bar{E}_2; & \bar{I}_m &= \bar{I}_1 + \bar{I}_2^1; \\ \bar{U}_2^1 &= \bar{U}_1 + R_2 \bar{I}_2^1 + jX_2 \bar{I}_2^1; & \bar{U}_1 &= jX_{1m} \bar{I}_m, & \bar{I}_m &= \bar{I}_1 + \bar{I}_2^1; \\ R_2 &= R_s C + \frac{R_r}{s} C^2 \approx R_s + \frac{R_r}{s}; & X_2 &= X_{ls} C + X_{lr} C^2 \approx X_{ls} + X_{lr}; & X_{1m} &= X_{ls} + X_m \\ P_1 &= \frac{3}{2} U_1 I_1 \cos \varphi_1; & P_2 &= \frac{3}{2} \bar{U}_2^1 \bar{I}_2^1 \cos \varphi_2; & Q_1 &= \frac{3}{2} U_1 I_1 \sin \varphi_1; & Q &= \frac{3}{2} \bar{U}_2^1 \bar{I}_2^1 \sin \varphi_2 \\ I_1 &= \frac{(\bar{U}_1) \left( \frac{R_r}{s} + jX_s \right) - j \frac{\bar{U}_2^1}{s} X_m}{(R_s + jX_s) \left( \frac{R_r}{s} + jX_s \right) - X_m^2}; & \bar{I}_2^1 &= \frac{\frac{\bar{U}_2^1}{s} (R_s + jX) - j \bar{U}_1 X_m}{(R_s + jX_s) \left( \frac{R_r}{s} + jX_s \right) - X_m^2}; & I_1 &= \sqrt{I_{1x}^2 + I_{1y}^2}; \\ |I_2| &= \sqrt{I_{2x}^2 + I_{2y}^2}; & T_e &= \frac{3}{2} p L_m (\bar{I}_2 \cdot \bar{I}_1) = 1,5 p L_m (I_{2x} I_{1y} - I_{2y} I_{1x}); & P_1 &= 1,5 U_1 I_{1x}; \\ Q_1 &= -1,5 U_1 I_{1y}; & Q_2 &= 1,5 (U_{2y} I_{2x} - U_{2x} I_{2y}); & P_m &= T_e \omega_m = T_e \frac{(1-s) \omega_1}{p}; \\ P_2 &= 1,5 (U_{2x} I_{2x} + U_{2y} I_{2y}); & \Delta P &= I_1^2 R_s + I_2^2 R_r, \end{aligned}$$

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 электродвижущая сила (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;  
 $R_2, X_2, X_{1m}$  – активные и индуктивные сопротивления  $\Gamma$ -образной схемы замещения.

Векторные и энергетические диаграммы при различных направлениях движения активной и реактивной мощностей статора и ротора для досинхронной и сверхсинхронной скоростей представлены на рисунках 15–16.

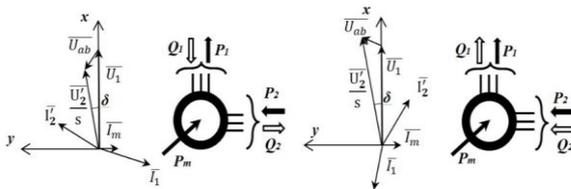


Рис. 15. Векторная и энергетическая диаграммы для генераторного режима, когда скорость вращения ротора меньше синхронной

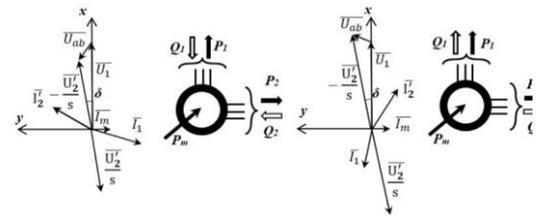


Рис. 16. Векторная и энергетическая диаграммы для генераторного режима, когда скорость вращения ротора больше синхронной

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.

Алгоритм математической модели расчета АСГ показан на рисунке 17.

В **третьей главе** представлена разработка подсистемы оптимального проектирования для различных проектных ситуаций.

При разработке подсистемы синтеза рассматривается **однокритериальная** задача оптимизации геометрии АСГ, которая достаточно хорошо формализована, но при этом в систему закладывается 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 и определить уровни оптимизации для создания достаточной гибкости проектной системы.

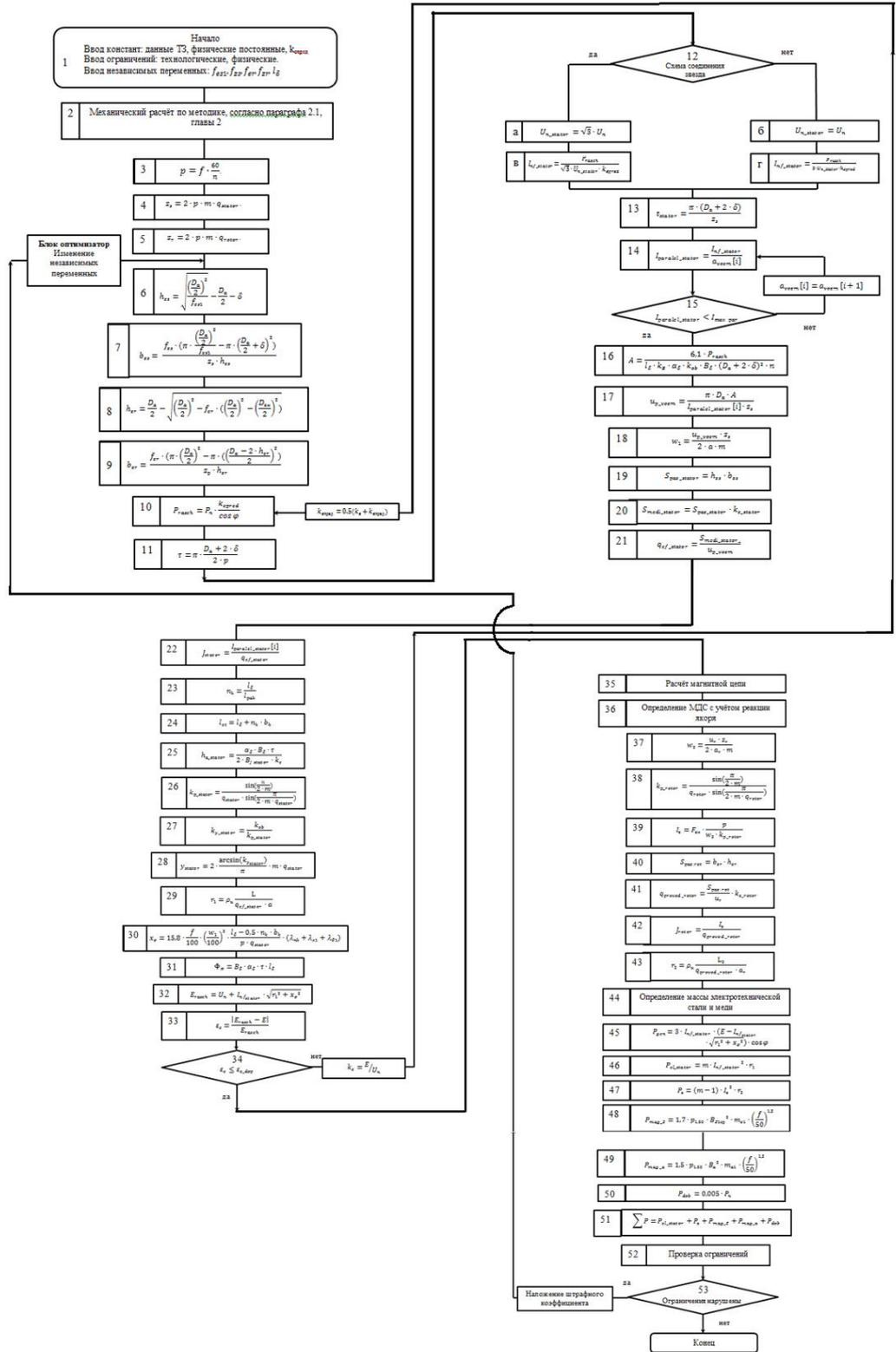


Рис.17. Блок-схема алгоритма электромагнитного расчета АСГ

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, определить геометрию, которая обеспечивала бы экстремальное значение выбранного критерия.

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

В качестве метода оптимизации выбран детерминированный метод покоординатного спуска (Гаусса – Зейделя) при движении к экстремуму в сочетании с методом однопараметрической оптимизации Фибоначчи при выборе длины шага поиска.

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

Суть многоуровневой оптимизации заключается в охватывании как можно большего количества проектных ситуаций. Например, если мы разрабатываем генератор для новой системы, где отсутствуют ограничения по габаритам, то 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 системы, а для модернизации старой, возможна проектная ситуация, требующая создания генератора максимальной мощности в заранее известных габаритах. Тогда варьированию подлежат тоже все переменные, но меняется математическая модель.

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

В проектную систему заложены следующие уровни оптимизации:

- полная габаритная оптимизация;
- оптимизация при фиксированном наружном, внутреннем диаметрах и наружной длине (в заданных габаритах);
- габаритная оптимизация при фиксированном наружном диаметре;
- габаритная оптимизация при известном штампе;
- поверочный расчет.

Поверочный расчет является уровнем, на котором отсутствуют независимые переменные. В данном случае все размеры, однозначно определяющие конструкцию, заданы. Проектная система не генерирует 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.

В **четвертой главе** приводится разработка подсистемы анализа электромагнитного и теплового состояния АСГ.

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

Из сложившейся практики создания конкретных проектов для разработки системы анализа были выбраны следующие готовые CAD-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 на них. Проектирование генератора начинается с оптимизации геометрии в программе на языке Delphi. При этом в соответствии с ТЗ заказчика и имеющимися данными выбирается уровень оптимизации. Интерфейс подсистемы синтеза представлен на рисунке 18.

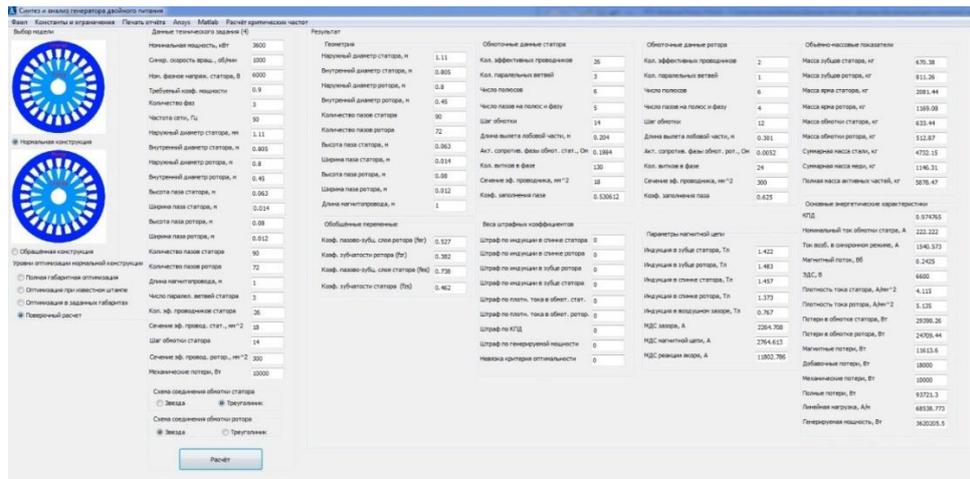


Рис. 18. Интерфейс программы оптимизации геометрии АСГ

Затем 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 RMXprt проводится проверка рассчитанных параметров. На этом этапе анализа проверяется принципиальная возможность получения основных параметров генератора. При необходимости можно сделать коррекцию результатов оптимизации.

2. Далее расчетная модель экспортируется в режим Maxwell 2D Design, где первоначально решается полевая задача в модуле Magnetostatic. Фрагменты этого анализа представлены на рисунке 19. На данном этапе производится настройка сетки конечных элементов и определение магнитного потока.

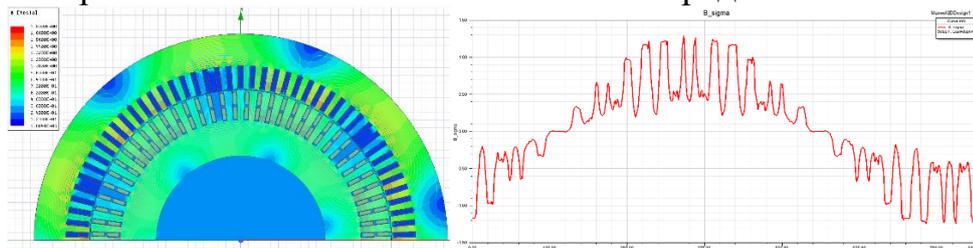


Рис. 19. Картина магнитного поля генератора на холостом ходу и зависимость индукции в воздушном зазоре

3. На следующем этапе модель рассчитывается в модуле Transient. Рассматривается режим работы генератора при синхронной скорости вращения. На этом этапе сравниваются результаты, полученные по программе оптимизации на основе эквивалентных схем замещения, с решением полевой задачи методом конечных элементов. В итоге производится окончательная отладка расчетной модели.

4. Заключительным этапом анализа электромагнитного состояния в Maxwell 2D Design является расчет 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. Фрагменты этого анализа представлены на рисунках 20 и 21.

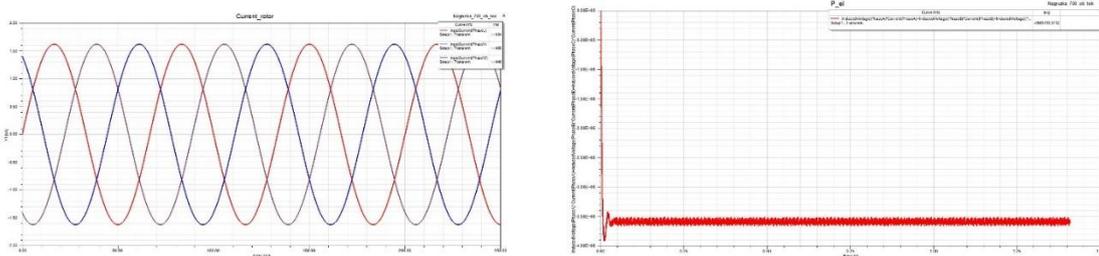


Рис. 20. График токов, заданных в обмотке ротора, и генерируемой мощности при досинхронной скорости вращения ротора

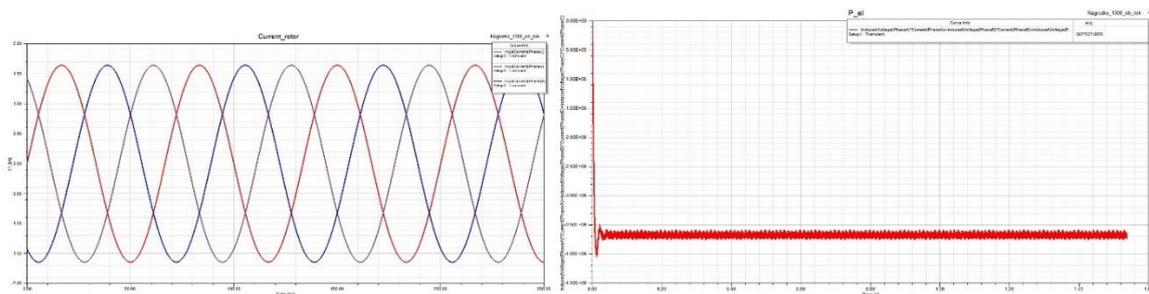


Рис. 21. График токов, заданных в обмотке ротора, и генерируемой мощности при сверхсинхронной скорости вращения ротора

Представленный порядок действий позволяет в полной мере осуществить точный анализ электромагнитного состояния генератора с минимальными затратами времени. Алгоритм подсистемы анализа представлен на рисунке 22.

Построение проектной системы было выполнено по данному алгоритму. Стоит отметить, что на этапе ее проверки производилось 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;
- номинальное напряжение – 6 000 В;
- частота питания напряжения – 50 Гц;
- требуемый КПД – 97,5 %, номинальный коэффициент мощности – 0,9;
- высота оси вращения – 630 мм;
- конструктивная масса – 12 т.

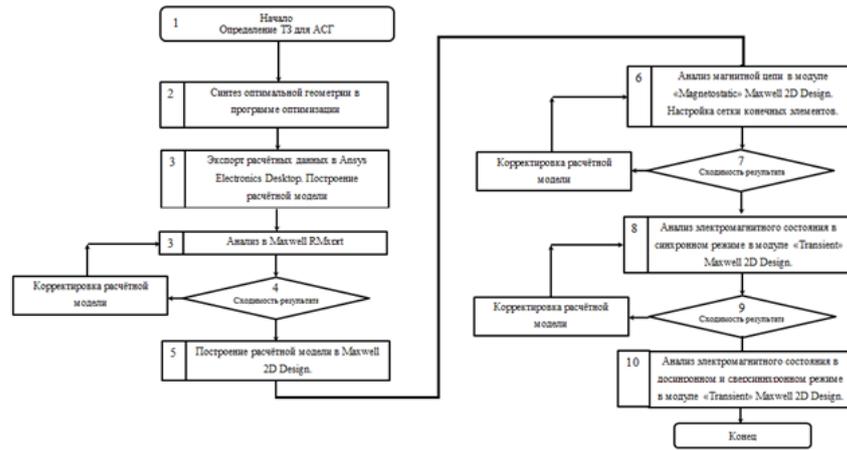


Рис. 22. Функциональная схема алгоритма анализа электромагнитного состояния

В результате опробования и отладки 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.

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. На рисунке 23 представлен эскиз АСГ и его вентиляционно-тепловая модель.

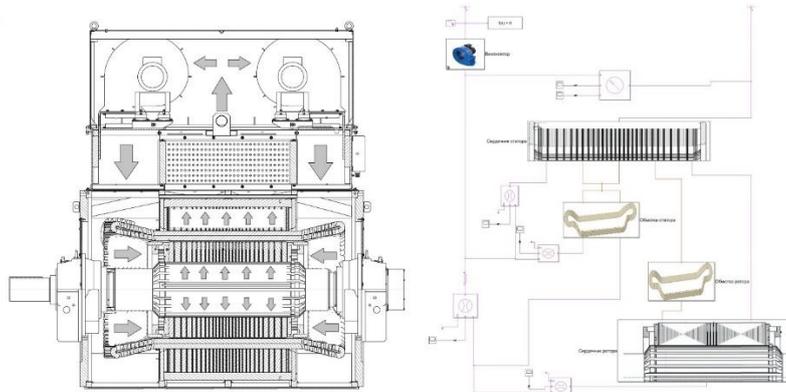


Рис. 23. Эскиз электрической машины с радиальной системой вентиляции и модель теплового и вентиляционного расчета, построенная в MATLAB SIMULINK с использованием библиотек Simscape Gas и Simscape Thermal

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

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).

Работоспособность созданной модели проверялась на параметрах рассчитанного генератора. В качестве хладагента был задан воздух с температурой  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  и расходом  $1,3\text{ м}^3/\text{с}$ . При этом были получены следующие значения расчетных температур и давления в установившемся режиме: температура сердечника статора –  $108\text{ }^{\circ}\text{C}$ , температура обмотки статора –  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ , температура сердечника ротора –  $141\text{ }^{\circ}\text{C}$ , температура обмотки ротора –  $141\text{ }^{\circ}\text{C}$ , перепад температуры воздуха между выходом и входом –  $36\text{ }^{\circ}\text{C}$ , перепад давления воздуха между входом и выходом –  $1\text{ }382\text{ Па}$ .

Результаты моделирования представлены на рис. 24.

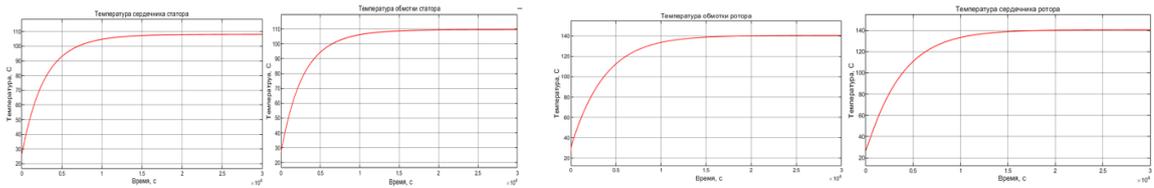


Рис.24. Диаграмма температуры сердечника статора (крайний субпакет), обмотки статора, сердечника и обмотки ротора

По результатам моделирования можно сделать вывод, что температура активных частей генератора находится в допустимом пределе для класса изоляции F. Разработанная модель очень удобна для применения в инженерной практике.

### Заключение

В диссертационной работе содержатся научно обоснованные теоретические положения оптимального проектирования и подробного анализа АСГ, активно используемого в составе ВЭУ. В результате расширена существующая теоретическая база по проектированию электрических машин этого класса. 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.

2. 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.

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 RMXprt, который реализует метод схем замещения. На втором этапе данные передаются в модуль Ansys Maxwell 2D Design, использующий метод конечных элементов.

6. В подсистеме анализа реализована 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, начиная с данных ТЗ, позволяет 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 САД-систем. Данную проектную систему можно использовать для создания генераторов этого класса другого назначения.

#### **Дальнейшее направление исследования**

Дальнейшее направление данного исследования предполагает создание точной методики анализа критических частот ротора методом конечных элементов. В перспективе разработанную проектную систему можно включить в комплекс сквозного проектирования АСГ для мощных ветроустановок.

#### **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Публикации в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК и Аттестационным советом УрФУ:*

1. **Котов, А.А.** Применение генератора двойного питания для ветроэнергетических установок малой, средней и большой мощности/**А.А. Котов, Н.И. Неустроев**// Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2017. – Т. 17 – № 4. – С. 80-89.(0.625 п.л. /0.312 п.л.)
2. 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 Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2018. – Т. 18 – № 1. – С. 112-121. (0.625 п.л. /0.312 п.л.)
3. Gandzha, S. 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. – pp. 373–377, 8877643 (0.312 п.л./0.15 п.л.) (Scopus).

4. **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 Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2020. – № 33. – С. 78-98. (1.31 п.л./0.43 п.л.).

5. **Kotov, 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. Chyidyk // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) –2020. – pp. 1-7, 9111967 (0.437 п.л./0.145 п.л.) (Scopus).

6. Neustroev N. Starter generator Design Development for Modern Micro Gas Turbine Plant/ N. Neustroev, **A. Kotov**, I.A Chyidyk // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) –2020. – P. 1-7. 9111922 (0.437 п.л./0.15 п.л.) (Scopus).

#### **Другие публикации:**

7. 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 (0.25 п.л./0.152 п.л.).

8. 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. Intech Open. – 2019 –  
URL:<https://www.intechopen.com/online-first/application-of-an-asynchronous-synchronous-alternator-for-wind-power-plant-of-low-medium-and-high-po>  
(дата обращения 10.10.2020) (1.875 п.л./0.937 п.л.)

Котов Антон Андреевич

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

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты  
АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук  
Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать . Формат 60x84 1/16. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 80 экз. Заказ 291.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.

454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.