

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Самарский государственный  
технический университет»

*На правах рукописи*



Кауров Сергей Юрьевич

**ИНТЕГРИРОВАННЫЙ СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОР  
АВТОНОМНЫХ ОБЪЕКТОВ НА БАЗЕ СИНХРОННОЙ  
МАШИНЫ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ**

Специальность 05.09.01 – «Электромеханика и электрические  
аппараты»

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук  
Зубков Юрий Валентинович

Самара 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1. СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРНЫЕ УСТРОЙСТВА В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ АВТОНОМНЫХ ОБЪЕКТОВ.....	17
1.1 Обзор применения стартер-генераторных устройств .....	17
1.2 Концепция интегрированного стартер-генератора .....	23
1.3 Классификация электрических машин стартер-генераторных устройств транспортных средств и подвижных автономных объектов .....	25
1.4 Состояние вопроса в области разработок интегрированных стартер- генераторов.....	31
Выводы по 1 разделу.....	35
2. СИСТЕМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ И ЯКОРНЫЕ ОБМОТКИ ИСГ НА БАЗЕ СМПМ.....	36
2.1 Основные требования к ИСГ и критерии качества .....	36
2.2 Массогабаритные показатели ИСГ на базе СМПМ .....	37
2.3 Постоянные магниты и магнитные системы перспективных СМПМ.....	39
2.3.1 Индуктор с когтеобразными полюсами .....	47
2.3.2 Индуктор с призматическими магнитами и полюсными башмаками .....	49
2.3.3 Индуктор с инкорпорированными ПМ .....	50
2.3.4 Схемы подключения якорных обмоток ИСГ к преобразователю .....	51
Выводы по 2 разделу.....	55
3. ЭЛЕМЕНТЫ МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ИСГ .....	57
3.1 Элементы методики проектирования ИСГ .....	57
3.1.1 Специфические вопросы проектирования генераторного режима ИСГ ....	58
3.1.2 Диаграмма магнита. Проверка положения рабочей точки.....	60
3.2 Моделирование, расчет и исследование магнитного поля ИСГ .....	63
3.2.1 Магнитное поле ИСГ в режиме генератора .....	65
3.2.2 Магнитное поле ИСГ в режиме стартера .....	72
3.3 Оптимизация параметров ИСГ методами математического моделирования .	80
Выводы по 3 разделу.....	86

4. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОПИСАНИЕ И ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ИСГ .....	88
4.1 Моделирование генераторного режима работы ИСГ .....	89
4.1.1 Моделирование генераторного режима без стабилизации выходного напряжения .....	90
4.1.2 Моделирование генераторного режима со стабилизацией выходного напряжения .....	95
4.2 Моделирование работы ИСГ в режиме пуска ДВС .....	104
4.2.1 Математическая модель ИСГ в двигательном режиме .....	105
4.2.2 Математическая модель стартерного режима ИСГ на основе уравнений эквивалентного БДПТ для анализа систем управления и регулирования .....	111
4.2.3 Моделирование стартерного режима без ограничения тока статора .....	114
4.2.4 Моделирование стартерного режима с ограничением тока статора .....	120
Выводы по 4 разделу .....	124
5. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИСГ .....	126
5.1 Опытный образец и практическая реализация систем управления .....	126
5.1.1 Система регулирования ИСГ в генераторном режиме работы .....	127
5.1.2 Система управления в стартерном режиме работы .....	128
5.1.3 Практическая реализация запуска ДГУ ИСГ .....	130
5.2 Экспериментальные исследования работы ИСГ .....	131
5.2.1 Экспериментальное исследование генераторного режима работы .....	132
5.2.2 Эксплуатационные характеристики ИСГ в стартерном режиме работы .	138
5.2.3 Экспериментальное исследование стартерного режима работы .....	140
5.3 Сравнительный анализ основных показателей разработанного ИСГ и серийно-выпускаемых аналогов .....	143
Выводы по 5 разделу .....	146
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	148
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	150
СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ .....	161
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	163

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время расширяется применение мехатронных систем в автономных мобильных объектах. Современное транспортное средство: автомобиль, летательный аппарат, морское или речное судно, специальная техника на гусеничном и колесном ходу являются объектами приложения новых идей и технических решений из различных областей прикладной науки.

Основой всякого автономного объекта (АО) или транспортного средства (ТС) является силовая установка. Чаще других в таких объектах используются двигатели внутреннего сгорания или газотурбинные двигатели. Назначение силовой установки – обеспечение АО электрической или механической энергией для продолжительного выполнения своих функций без привязки к определенному положению в пространстве.

Основной частью силовой установки, базирующейся на двигателе внутреннего сгорания (ДВС) или газотурбинном двигателе, являются системы запуска двигателя и генерации электрической энергии. Наличие двух отдельных электрических машин (ЭМ), выполняющих функции стартера и генератора, не всегда оправдано и часто невыполнимо по условиям размещения. Естественным желанием разработчика является снижение массогабаритных показателей силовой установки за счет объединения этих двух машин в одном устройстве – стартер-генераторе. Однако противоречивые требования к системам запуска двигателя и генерации электроэнергии на протяжении длительного времени не позволяли осуществить такую замену. До настоящего времени стартер и генератор АО в большинстве случаев являются отдельными ЭМ.

Решению данной проблемы способствовало создание высококоэрцитивных магнитов, обладающих повышенными энергетическими характеристиками, новых силовых полупроводниковых управляемых элементов (IGBT, MOSFET), развитие регулируемого вентильного электропривода, позволяющее с одной стороны повысить надежность систем запуска и генерации электроэнергии, с другой,

реализовать требуемые характеристики стартера и генератора в одном электромеханическом преобразователе (ЭМП).

Наиболее перспективной для реализации функций запуска и генерации в одном устройстве является синхронная машина с постоянными магнитами (СМПМ). Это на сегодняшний день один из наиболее динамично развивающихся типов электромеханических преобразователей энергии. До настоящего времени СМПМ использовались в основном в качестве синхронных генераторов и синхронных двигателей в системах автоматики.

Использование СМПМ в качестве стартер-генератора АО является перспективным решением, поскольку данный ЭМП имеет более простую, технологичную и надежную конструкцию по сравнению с ЭМП других типов, хорошо приспособлен для работы во взрывоопасных и агрессивных средах, в условиях низких и повышенных значений температуры и давления.

Другим трендом конструктивного исполнения стартер-генератора АО является его интегрирование в силовую установку, что существенно облегчает компоновку и экономит место в ограниченном околодвигательном пространстве. Такой ЭМП получил название интегрированный стартер-генератор (ИСГ).

В генераторном режиме ИСГ, как правило, работает на выпрямительную нагрузку с параллельно подключенной аккумуляторной батареей. Такой режим синхронной машины довольно хорошо изучен и освещен в научно-технической литературе. Но интегрированное исполнение ИСГ накладывает ряд особенностей в конструкции, схемных решениях и алгоритмах управления ЭМП, недостаточно исследованных и представленных в научных публикациях.

В стартерном (двигательном) режиме работы ИСГ реализуется дискретный способ управления положением вектора магнитодвижущей силы (МДС) статора относительно МДС вращающегося ротора. В этом способе управления положением вектора МДС статора используется такой алгоритм переключения силовых ключей, при котором инвертор формирует переменное напряжение прямоугольной формы на фазах якорной обмотки двигателя. В каждый момент времени в инверторе открыты два «ключа» и ток протекает по двум фазам

обмотки статора, включенным последовательно. При таком способе управления вектор МДС статора перемещается дискретно (скачкообразно) относительно статора.

Вентильные двигатели с дискретным управлением положением вектора МДС статора получили название бесконтактные двигатели постоянного тока (БДПТ). Для управления величинами напряжения и тока в БДПТ используют скалярные способы. ИСГ в стартерном режиме работает как БДПТ.

Дискретный способ управления положением МДС статора имеет существенное преимущество в сравнении с непрерывным способом. При непрерывном способе управления положением вектора МДС применяется такой алгоритм коммутации «ключей» инвертора, при котором он формирует трехфазную симметричную систему синусоидального тока, создающего синхронное по отношению к ротору вращающееся магнитное поле. В каждый момент времени в инверторе открыты три «ключа» и по трем фазам обмотки статора течет ток. Для получения синусоидального тока применяют ШИМ-регулирование на несущей частоте, когда моделирующим сигналом является синусоидальное напряжение, при котором частота коммутации «ключей» инвертора намного (как правило, на порядок и более) выше частоты модуляции. Столь значительная частота переключений приводит к большим коммутационным потерям и дополнительному нагреву инвертора. При дискретном способе управления этот эффект выражен в меньшей степени.

Трудности проектирования ИСГ на базе СМПИМ в основном вызваны учетом особенностей работы ИСГ в стартерном режиме и обусловлены сложностью процессов электромеханического преобразования энергии, происходящих в нем. Трапецеидальный характер пространственного распределения магнитного поля в воздушном зазоре определяет сложность использования традиционных подходов к анализу и проектированию ИСГ, базирующихся на синусоидальном характере распределения и классических математических моделях синхронных электрических машин.

**Объектом исследования** в диссертации является интегрированный стартер-генератор с магнитоэлектрическим возбуждением в совокупности с системами стабилизации его напряжения и управления при пуске ДВС.

**Предмет исследования** – электромагнитные и электромеханические процессы стартер-генератора.

**Степень разработанности темы исследования**

Основополагающими в области разработки, исследования и проектирования электромеханических систем на базе СМППМ, являются труды отечественных ученых А.Н. Ледовского, В.А. Балагурова, Ф.Ф. Галтеева, А.И. Бертинова, И.Л. Осина, В.П. Колесникова, Ф.М. Юферова, Д.А. Бута, С.А. Ганджи, Ф.А., Смирнова А.Ю., Исмагилова Ф.Р. Среди зарубежных исследователей следует отметить работы W. Zhang, Z. Q. Zhu, I. Boldea, M. Hory, N. Bianchi.

В области исследования стартер-генераторных устройств (СГУ), в том числе и интегрированного исполнения, заслуживают внимания работы Weimer, G. Friedrich, L. Alberti, S. Bozhko, M. Ganev и др.

Несмотря на достаточное число публикаций, посвященных исследованию ИСГ на базе СМППМ, многие вопросы в области проектирования и математического моделирования остались нерешенными:

- отсутствует математическая модель работы ИСГ в стартерном режиме, позволяющая осуществлять инженерные расчеты, оценивать величину пусковых токов, протекающих по фазам инвертора и обмоткам статора в процессе пуска, рассчитывать величину пускового момента ИСГ;

- не имеется научно обоснованной схемы замещения СМППМ эквивалентным двигателем постоянного тока (ДПТ) с дискретным управлением, позволяющей проводить исследования работы ИСГ в режиме пуска ДВС в совокупности с различными системами управления и регулирования;

- недостаточно исследованы особенности работы ИСГ на базе СМППМ в установившихся и переходных режимах работы с учетом специфики интегрированного исполнения.

Вследствие изложенного, разработка научно-обоснованных методических основ моделирования и инженерного проектирования интегрированного стартер-генератора автономных объектов, обеспечивающих улучшение массогабаритных и энергетических показателей, а также решение комплекса вопросов по их практической реализации является актуальной научной задачей.

**Цель работы** - улучшение энергетических, эксплуатационных и массогабаритных показателей стартер-генераторной установки подвижных автономных объектов на базе синхронной машины с магнитоэлектрическим возбуждением.

Для достижения этой цели в работе поставлены и решены следующие **основные задачи:**

- проведен анализ современного состояния и перспектив использования СМПМ в качестве стартер-генератора АО;
- разработаны математические модели и исследована работа ИСГ в режимах генерирования электрической энергии и пуска ДВС;
- осуществлено математическое моделирование электромагнитных и электромеханических процессов, расчет параметров ИСГ на базе СМПМ численными методами;
- разработаны основы методики проектирования;
- изготовлен опытный образец с улучшенными энергетическими, массогабаритными и эксплуатационными характеристиками, проведено экспериментальное исследование его работы в генераторном и стартерном режимах.

### **Научная новизна**

На защиту выносятся следующие основные научные результаты:

1. Математические модели генераторного и стартерного режимов работы, позволяющие осуществлять исследование установившихся и переходных процессов в разомкнутой и замкнутой системах управления, отличающиеся уточненным учетом влияния параметров регулятора напряжения и системы управления на характеристики ИСГ.



2. Модель ИСГ в режиме стартера, основанная на системе уравнений бесконтактного двигателя постоянного тока, обеспечивающая возможность уточненного определения параметров системы регулирования частоты вращения и момента при пуске ДВС.

3. Методика решения задачи параметрической оптимизации размеров зубцово-пазовой зоны, ярма статора, объема постоянных магнитов, величины немагнитного зазора ИСГ посредством конечно-элементного моделирования.

4. Имитационные модели, позволяющие исследовать реакцию ИСГ на различные виды воздействий при работе в генераторном и стартерном режимах.

### **Практическая значимость работы:**

Разработаны элементы инженерной методики проектирования ИСГ на базе СМПК. Даны рекомендации по выбору материала постоянных магнитов (ПМ) и конструктивного исполнения индуктора, позволившие улучшить энергетические и массо-габаритные показатели машины.

2. Проведена многоуровневая оптимизация параметров ИСГ посредством конечно-элементного моделирования по критерию максимального пускового момента. Определены оптимальные значения размеров зубцово-пазовой зоны, ярма статора, объема постоянных магнитов, величины немагнитного зазора.

3. Разработан алгоритм расчета и даны рекомендации по определению параметров фильтра в системе стабилизации напряжения в режиме генерации.

4. Предложены и реализованы технические решения, позволяющие при регулируемом электрическом запуске ДВС ускорить процесс пуска и ограничить величину тока во входной цепи инвертора (патенты РФ).

### **Методы исследований**

В работе при решении поставленных задач использованы основные положения теорий электрических цепей, электромагнитного поля, электромеханического преобразования энергии, электромагнитных переходных процессов в электрических машинах, автоматического управления, методы

компьютерного имитационного моделирования в программных комплексах Matlab Simulink, ELCUT.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель интегрированного стартер-генератора на основе синхронной машины с постоянными магнитами, описывающая установившиеся и переходные процессы в ИСГ и электромеханическое преобразование энергии в генераторном и стартерном режимах работы.

2. Модель ИСГ в режиме стартера, основанная на системе уравнений бесконтактного двигателя постоянного тока, предназначенная для определения уточненных параметров системы регулирования частоты вращения и момента при пуске ДВС.

3. Методика и результаты параметрической оптимизации ИСГ с использованием разработанной полевой модели и учетом свойств материала постоянных магнитов, конструктивного исполнения индуктора.

4. Технические решения, позволяющие при регулируемом электрическом запуске ДВС компенсировать большую электромеханическую постоянную времени, ускорить процесс пуска и ограничить величину тока во входной цепи инвертора (патенты РФ).

### **Соответствие паспорту специальности**

Диссертация соответствует специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты по 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» паспорта специальности.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность полученных результатов обусловлена использованием обоснованных допущений и строгих математических методов, компьютерным моделированием, подтверждением теоретических выводов данными экспериментальных исследований. Достоверность подтверждена практикой

применения предложенных решений при проектировании, создании и испытании опытного образца ИСГ.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международной научно-технической конференции “Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии”, Тольятти, 2009; Всероссийской научно-технической конференции с элементами научной школы для молодежи «Проведение научных исследований в области машиностроения», Тольятти, 2009 г; I-ой международной научно-технической конференции «Современные автомобильные материалы и технологии» САМИТ – Курск 2009; Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: состояние, проблемы перспективы». – Оренбург, ИПК ГОУ ОГУ, 2010; I-ой международной научной - практической конференции «Современная наука: теория и практика».- Ставрополь, 2010; Всероссийской научно-технической интернет- конференции «Высокие технологии в машиностроении», Самара, 2011; международной научно-технической конференции «Инновации в сфере производства, разработки и диагностики электрического и электронного оборудования автомобилей», Москва 2015; 54-й международной научной студенческой конференции МНСК-2016: Электротехнические комплексы и системы, Новосибирск, 2016; международной научно-практической конференции «Ашировские чтения», Самара, 2020; международной конференции «Электротехнические комплексы и системы», Уфа 2020; на научных семинарах кафедры «Электромеханики и автомобильного электрооборудования» Самарского государственного технического университета.

### **Внедрение результатов работы**

Результаты исследований ИСГ с магнитоэлектрическим возбуждением в части методики проектирования, математических моделей, компьютерного моделирования и методов расчёта параметров схемы управления внедрены в учебном процессе СамГТУ при подготовке бакалавров и магистров профилей «Электромеханика» и «Электрооборудование автомобилей и тракторов» и в ООО «Нотор» при создании генерирующего комплекса электроагрегата.

## **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 27 работ, в том числе 14 в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 1 цитируемая в базе Scopus, получены 2 патента РФ на изобретения. Общий объем опубликованных работ 10,62 п.л.

## **Личный вклад автора в диссертационное исследование**

Данная научная работа была выполнена в ходе научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, проводимых кафедрой «Электромеханика и автомобильное электрооборудование» СамГТУ совместно с индустриальным партнером ООО «Нотор». Лично автором разработаны основные положения диссертации: элементы методики проектирования ИСГ, методика компьютерного моделирования и результаты исследования магнитных полей ИСГ в генераторном и стартерном режимах работы, математическая модель анализа электромагнитных и электромеханических процессов стартер-генератора, экспериментальные исследования опытного образца машины.

Автор выражает благодарность своим научным руководителям – доктору технических наук, доценту Зубкову Юрию Валентиновичу, кандидату технических наук Мигунову Александру Леонидовичу за помощь в работе, конструктивную критику и содействие в работе над диссертацией. Также автор выражает благодарность ведущему инженеру Юдину Владимировичу Александровичу за технические консультации и помощь при проведении экспериментальных исследований.

## **Структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, библиографического списка. Основная часть изложена на 163 страницах, содержит 89 рисунков, 11 таблиц. Библиографический список содержит 125 наименований.

## **Содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность разработки основ моделирования и методики электромагнитного расчета интегрированного стартер-генератора для автономных объектов и транспортных средств. Дан анализ научных публикаций

по теме диссертационного исследования, определены цели, задачи, методы исследований и основные научные результаты, выносимые на защиту, изложена научная новизна и практическая значимость работы, приведена информация о публикациях по теме диссертации и ее апробации на конференциях, определен личный вклад автора в представленное исследование.

**В первом разделе** сделан обзор применения СГУ в Российской Федерации и за рубежом в таких областях, как автомобильная промышленность, авиация, боевая гусеничная и колесная техника. Показано, что использование двух отдельных электрических машин для запуска силовой установки и генерации электрической энергии для собственных нужд автономного объекта не рационально. Для сокращения массы и габаритов электромеханического преобразователя две указанные выше функции следует реализовать в одной электрической машине, причем эта машина интегрируется в силовую установку. Такая интеграция позволяет исключить промежуточные звенья в виде ременных и цепных передач, что повышает эксплуатационные показатели стартер-генератора.

Приведена классификация электрических машин стартер-генераторных устройств транспортных средств и подвижных автономных объектов, рассмотрены достоинства и недостатки различных типов электромеханических преобразователей при их использовании в качестве ИСГ, определен наиболее предпочтительный вариант – синхронная машина с возбуждением от постоянных магнитов.

Проведен обзор современного состояния теоретических проблем в области ИСГ. Установлено, что вопросы улучшения энергетических, эксплуатационных и массо-габаритных показателей СГУ при системном подходе к описанию электромашинной части и системы управления ИСГ остаются мало изученными. Влияние конфигурации, геометрических размеров магнитной системы, обмоточных данных и способов управления ИСГ в генераторном и в стартерном режиме работы на эффективность СГУ не нашли должного отражения в научно-технической литературе. Существует насущная потребность в математических

моделях, позволяющих осуществлять расчет стационарных и переходных режимов работы ИСГ современными программными средствами.

**Во втором разделе** определены основные критерии качества, проектируемого ИСГ. Во-первых, это минимум массы. Удельная масса машины у лучших аналогов не превышает 0,4 кг/кВт. Во-вторых, - минимальные габариты. В интегрированных с ДВС машинах особо жесткие требования предъявляются к сокращению осевой длины. Третьим критерием выступает требования максимума КПД, величина которого должна быть не менее 80%. Получены аналитические зависимости, устанавливающие связь между объемом ПМ, электромагнитными нагрузками и номинальной и максимальной мощностями ИСГ. В качестве критериев для выбора типа индуктора при заданном объеме ПМ предложены: предельная мощность, перегрузочная способность при работе ИСГ в генераторном режиме и механическая прочность конструкции подвижной части.

Проведен анализ современного состояния материалов ПМ и конструктивного исполнения магнитных систем перспективных СМПМ, который показал, что наиболее целесообразными в случае ИСГ являются магнитные системы (МС) с высококоэрцитивными ПМ (NdFeB, SmCo) в виде сегментов, закрепленных на призматическом магнитопроводе ротора, где магниты удерживаются на поверхности индуктора бандажом из немагнитного материала.

Исследованы схемы подключения якорных обмоток ИСГ к преобразователю. На основании анализа типов и схем подключения якорных обмоток ИСГ к полупроводниковому преобразователю для диапазона мощностей от единиц до нескольких десятков кВт рекомендуется использовать разомкнутые обмотки с реверсивным питанием, как обладающие наилучшими энергетическими показателями и максимальным использованием обмоточного материала.

**В третьем разделе** разработаны элементы методики проектирования ИСГ на базе СМПМ. Рассмотрены специфические вопросы проектирования генераторного режима ИСГ, среди которых: выбор схемы выпрямления, расчет фазных токов и напряжений, выбор электромагнитных нагрузок, определение расчетной мощности и основных размеров ИСГ, проектирование обмотки якоря,

учет реакции якоря, расчет активных и индуктивных параметров. Данные задачи решались, в том числе, посредством численного моделирования магнитного поля в режимах работы ИСГ генератором и стартером.

Проведена оптимизация параметров ИСГ методами математического моделирования. В качестве главного критерия оптимизации выбран максимум электромагнитного момента при работе ИСГ в режиме пуска ДВС. Анализ результатов решения оптимизационной задачи позволил определить размеры индуктора, зубцово-пазовой зоны статора, величину зазора, обеспечивающих максимальное значение пускового момента ИСГ в стартерном режиме.

**Четвертый раздел** посвящен математическому описанию и имитационному моделированию режимов работы ИСГ. Генераторный режим моделировался при двух способах построения контура регулирования напряжения: без стабилизации напряжения, со стабилизацией выходного напряжения. В стартерном режиме исследовался пуск ДВС в схеме без ограничения по току статора и с ограничением.

Получены математические модели генераторного режима в осях  $d$ - $q$ , и стартерного режима в фазных координатах, позволяющие исследовать установившиеся и переходные режимы работы ИСГ. Выведены соотношения для расчета параметров ИСГ и регулятора напряжения, обеспечивающие работу в режиме непрерывного тока в замкнутой системе стабилизации выходного напряжения. Разработана математическая модель ИСГ на основе уравнений эквивалентного БДПТ для расчета параметров системы управления и моделировании процесса запуска ДВС. Получены структурные схемы одноконтурной и двухконтурной систем автоматического регулирования скорости ИСГ, на основе которых разработаны имитационные модели и реализовано моделирование процесса пуска ДВС. На технические решения, реализованные в соответствии разработанными моделями, получены патенты РФ.

**Пятый раздел** посвящен практической реализации действующего образца интегрированного стартер-генератора и экспериментальной верификации теоретических положений и выводов диссертационной работы. Приведены

структурные схемы систем стабилизации напряжения в генераторном и управления пуском ДВС в стартерном режимах работы ИСГ.

Показаны методика и результаты экспериментальных исследований электромагнитных и электромеханических установившихся и переходных режимов работы ИСГ, дана оценка адекватности разработанных математических моделей.

Проведено сравнение технических параметров разработанного ИСГ и известных аналогов.

**В Заключение** представлены основные научные и практические результаты диссертационной работы, определены направления дальнейших исследований в области теории и инженерной практики интегрированных стартер-генераторов.

В диссертации приведен **список** использованной научной **литературы**, состоящий из 125 отечественных и зарубежных источников.

Работа дополнена 5 приложениями, содержащими информацию по практической реализации систем управления режимами работы ИСГ и внедрению результатов диссертации в производственный и учебный процессы.



## **1. СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРНЫЕ УСТРОЙСТВА В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ АВТОНОМНЫХ ОБЪЕКТОВ**

С начала применения в автомобильной промышленности электрических систем запуска ДВС предпринимались попытки объединить в одном устройстве стартер и генератор. Разработчиков ДВС на протяжении длительного времени не устраивало, что после запуска стартер становился «лишним» элементом в системе обеспечения рабочих функций автомобиля, а генератор продолжал работать все время, равное рабочему циклу движения транспортного средства. Так как стартер и генератор являются электрическими машинами, то возникла идея объединить их в одно устройство [5,38,81,82,85,94,111].

### **1.1 Обзор применения стартер-генераторных устройств**

Одно из первых применений на автомобилях СГУ можно считать систему «Dynastar». Устройство с таким названием использовалось в ряде автомобилей в период с 30-х до 60-х годов прошлого столетия [25]. По сути, это устройство являлось комбинацией стартера и динамомшины. Оно устанавливалось непосредственно на валу коленчатого вала, что делало недостаточно эффективной его работу в режиме генератора [25].

Такое СГУ в настоящее время известно, как «интегрированный стартер-генератор-демпфер» (Integrated Starter Alternator Damper – ISAD). Оно состоит из электромеханического преобразователя, который выполняет функции связующего элемента между ДВС и трансмиссией и может быть использован для электрического пуска ДВС, подзарядки аккумуляторной батареи, снабжения электрических систем транспортного средства. Электрический мотор выполняет в этом СГУ функции дополнительной маховой массы и может использоваться в качестве демпфера (успокоителя) колебаний ДВС. Эффект демпфирования достигается применением конденсатора. Изменение относительной разности скоростей ротора ISAD и вала ДВС, обусловленное колебаниями, заряжает конденсатор, который демпфирует их.

Работа ISAD при запуске ДВС фактически бесшумна и обеспечивает скорости проворачивания до  $700 \text{ мин}^{-1}$ . Положительным свойством этого устройства является возможность работы ДВС в режиме «старт – стоп», что позволяет экономить топливо и снижать вредные выбросы в атмосферу. Благодаря высокой скорости проворачивания время запуска ДВС составляет приблизительно  $(0,1 - 0,5) \text{ с}$ . Электрический мотор можно так же использовать для улучшения разгонной динамики транспортного средства. Это дает возможность устанавливать ДВС меньшей мощности или улучшить качество работы штатного двигателя. При использовании устройства в качестве генератора переменного тока ISAD при частоте вращения холостого хода может развивать мощность до 2 кВт и поставлять переменный и постоянный ток различных величин напряжений в бортовую электрическую сеть. Благодаря применению «интеллектуальной электроники» в системе управления коэффициент полезного действия ISAD достигает 80%.

Компания Citroen использовала систему ISAD в опытном образце модели Xsara. Модернизированный электрический двигатель обеспечивает крутящий момент в  $150 \text{ Н*м}$ . Citroen называет систему «Dynahto». В автомобиле имеется розетка с переменным напряжением 220В для подключения бытовых электрических приборов [25].

Появление и применение плагин-гибридов (plug-in hybrids - подзаряжаемые от сети гибридные электромобили) среди автомобилей с электрифицированным приводом у автопроизводителей, таких брендов как BMW, Volkswagen и Volvo, а также у японских брендов Toyota и Lexus описано в [71]. Такие плагин-гибриды способны передвигаться часть времени без выброса отработавших газов, отвечая более жёстким европейским правилам по  $\text{CO}_2$ .

В авиации для систем запуска авиадвигателей широкое использование получили электрические стартеры СТ, ЭСТ [23] и стартер-генераторы ГС, ГСР-СТ и СТГ [123,124]. Такие устройства выполняются на базе коллекторных электрических машин постоянного тока параллельного, последовательного или смешанного возбуждения.

Электростартеры после раскрутки, в зависимости от назначения, вала авиадвигателя, турбостартера, вспомогательной силовой установки (ВСУ) до необходимой частоты вращения отключаются и далее в процессе полета больше не используются. Достоинствами подобных устройств являются их простота и удобство обслуживания, небольшое время запуска и относительно высокий КПД. Главным недостатком является то, что после запуска стартер превращается в «мертвый» груз. Этому недостатка лишены стартер-генераторы, которые в режиме пуска работают как стартеры, а после выхода авиационного двигателя на режим малого газа переводятся в режим генератора, обеспечивая электроэнергией бортовую сеть летательного аппарата (ЛА) [23,123,124].

Современная боевая техника в настоящее время оснащается все большим количеством всевозможной электроники, а так же силовыми электроприводами, что ведет к росту установленной мощности энергоприемников, к которым относятся: системы управления огнем, наведения и стабилизации орудия, приборы ночного видения и связи, многочисленные приборы освещения, автоматизации и др. Как результат, боевая техника обладает в наши дни все более растущим «аппетитом» – потребляет большое количество энергии. Это требует создания надежных источников электропитания с повышенной мощностью.

Использование основного двигателя АО только в качестве источника электропитания не всегда рационально с экономической и тактической точек зрения. Несмотря на это, в большинстве армий мира не учитывали подобный фактор в течение долгого времени. Например, в СССР и РФ ВСУ оснащаются только командирские танки, что обусловлено наличием дополнительного навигационного оборудования и средств связи. Исключение составляют современные машины на платформе «Армата» и некоторая другая техника специального назначения, которые штатно оснащены ВСУ.

Известным фактом так же является то, что дизельные двигатели гусеничной бронетехники имеют моторесурс, составляющий около (15 – 20)% от моторесурса дизелей, установленных на колесной гражданской технике [83].

Этому есть несколько причин.

1) Танковый (как пример) двигатель всегда работает на максимальной нагрузке, ибо масса танка весьма велика (броня и вооружение) и постоянна. Будь то бой, учения, или просто любое перемещение. Везде и всегда двигатель тянет на себе максимальный вес боевой машины.

2) Замена силовой установки на более мощную (как необходимость при увеличении веса машины – при модернизации) представляется весьма непростой задачей, так как внутренний объём объекта ограничен и приходится в большинстве случаев форсировать по мощности уже существующий двигатель и систему охлаждения для отвода возросшего количества тепла. В противном случае усовершенствование силовой установки потребует нового, более совершенного (и как результат дорогого) двигателя того же размера или же расширения мотор-трансмиссионного отделения (МТО) под новые увеличенные по объёму агрегаты, что приведёт к росту массы машины и как результат увеличит цену модернизации.

3) При форсировании существующего двигателя конструкторы стараются, как минимум, сохранить тот же моторесурс что и на предыдущей машине. Увеличение же моторесурса выше принятого стандарта при сохранении габаритов не всегда представляется технически возможным и чаще всего (за некоторыми исключениями) дорого, а значит и нецелесообразно.

4) Помимо движения танка, ресурс двигателя расходуется так же и на стоянке. Например, при работе электросистем (радио, система управления огнем, кондиционер, обогреватель и др.), при зарядке аккумуляторных батарей (АБ), прогреве основного двигателя в холодное время года и т.д. Мощность, отбираемая основным генератором ( $10 \div 15$  кВт) является незначительной относительно мощности основного двигателя танка (600 – 800 кВт), и двигатель на стоянке фактически работает в холостую. Его мощность только для питания указанных выше систем избыточна. Происходит загрязнение цилиндров и поршневых колец (коксование).

С учетом изложенных положений ресурс двигателя танков Т-72...Т-90, составляющий около 500 моточасов, требует экономного расхода. В зависимости

от квалификации механика-водителя и обслуживания, этот показатель может быть несколько выше или ниже.

Доля ресурса двигателя, расходуемого на стоянке в холостую, может достигать (40 – 50)%, то есть практически половину. Использование ВСУ на стоянке вместо основного двигателя позволит увеличить пробег танка практически в два раза до первого ремонта двигателя, а также снизить расходы на топливо и масло.

Следует также отметить другие факторы, связанные с основным двигателем, влияющие на боевую эффективность и выживаемость машины на поле боя. Часто возникает необходимость использования некоторых систем танка при нахождении его в режиме ожидания, например, в засаде. Ограниченная емкость аккумуляторов требует экономного расхода заряда АБ. Следует учитывать, что часть заряда аккумуляторов является неприкосновенным запасом для питания стартера двигателя, потребляемый ток которого может составлять до 2000А (например, у танка Т-72). Это требует периодического запуска основного двигателя для питания электросистем и поддержания заряда АБ.

Специфические боевые условия работы танкового двигателя (например, скрытое присутствие или засада вблизи с вражескими позициями) демаскирует танк. К основным демаскирующим факторам относятся столбы пыли и дыма, сильный шум, тепловой след, заметный инфракрасным приборам ночного видения.

ВСУ мощностью (5 – 10) кВт будет существенно менее заметна в плане демаскирующих факторов, что позволит повысить степень скрытности танка и наряду с этим использовать все основные и дополнительные электросистемы (система связи и наблюдения, тепловизор, кондиционер и др.). Наличие небольшого шума от маломощного генератора ВСУ не обязательно определяет его принадлежность к бронетехнике, что дополнительно может способствовать маскировке.

На рисунке 1.1 дано приблизительное сравнение теплового следа выхлопов при работе основного двигателя (а) и двигателя ВСУ (б), откуда понятно, какой танк легче замаскировать.

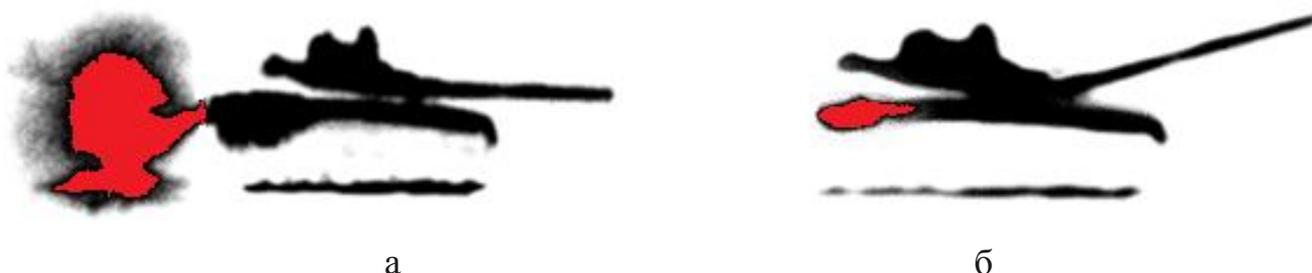


Рисунок 1.1 - Сравнение тепловыделений танка (выхлопное горячее облако более светлое): а) работа основного двигателя; б) работа ВСУ

Очевидно, что размещение вспомогательной дизель генераторной установки на танке или бронемашине является оправданным, как с военной, так и с экономической точек зрения. Как правило, это генераторные установки на базе одно или двухцилиндровых дизельных двигателей. Реже встречаются турбины или бензиновые двигатели. В России серийно производятся различные виды вспомогательных силовых установок, как дизельные, так и газотурбинные. Например, производственное объединение «Туламашзавод» производит большое разнообразие специальной военной и гражданской продукции, в том числе и ВСУ. В частности, ДГУ7-П27 (рисунок 1.2). Мощность приведенной установки составляет 7кВт, масса – 125 кг, без учета отдельного пульта управления, заявленный ресурс работы – 4000 моточасов [20].

Наличие двух электрических машин - стартера и генератора в ВСУ, АО не оправдано, требует дополнительного места для размещения стартера при запуске маломощного дизеля, что является проблематичным, а в некоторых случаях просто невозможным. Решением этой проблемы является замена двух отдельных машин одной комбинированной, выполняющей функции стартера и генератора [44,81,82,88,96,97]. Похожая проблема возникает при установке тульских дизелей ТМЗ в составе мобильных электростанций, применяемых в качестве полевого источника питания в геологоразведочных экспедициях, МЧС и т.д. [26,27,28].

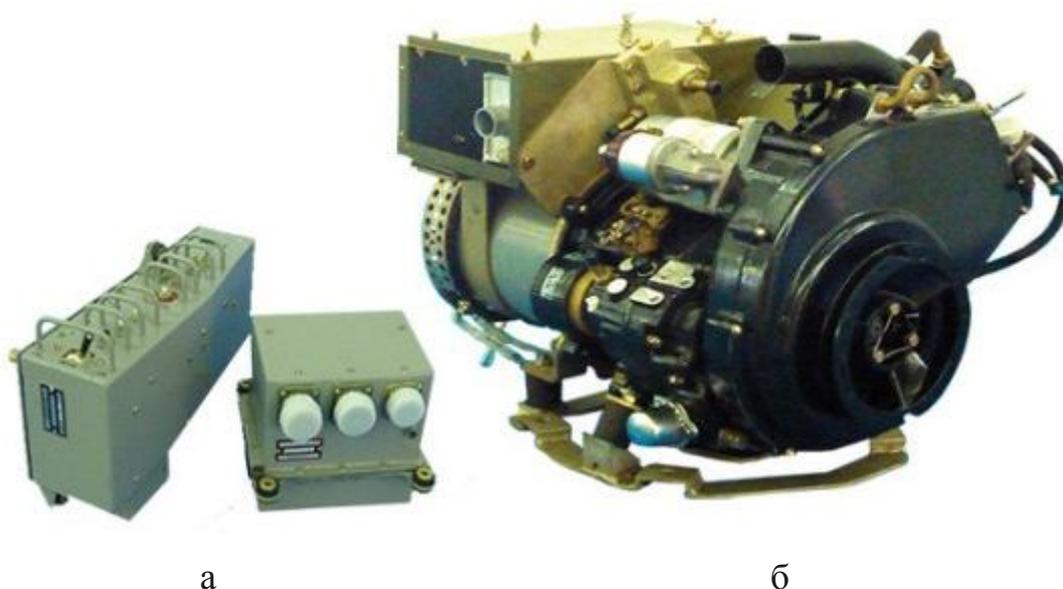


Рисунок 1.2 - ДГУ5-П27 на базе 4х-тактного одноцилиндрового дизельного двигателя (а – блок управления, б – ДГУ)

## 1.2 Концепция интегрированного стартер-генератора

В настоящее время автомобиль как ТС - это самый массовый вид автономных объектов, требующих усовершенствования существующих пусковой и генераторной установок. Развитие автомобильной индустрии демонстрирует в новых моделях автомобилей стремительный рост количества потребителей энергии. Дополнительные элементы и системы, например, бортовой компьютер, системы электроусилителя рулевого управления, климат-контроля, электропривода сидений и зеркал, видео, аудио и др. повышают комфорт и безопасность автомобиля. Из-за постоянного роста количества потребителей энергии в современных автомобилях требуется постоянное повышение мощности генераторной установки [45].

На первый взгляд простое повышение мощности не представляется большой проблемой, тем не менее, необходимо отметить, что в большинстве случаев привод генераторной установки осуществляется через ременную передачу, у которой ресурс и величина передаточного момента ограничены. Решением вопроса повышения мощности и увеличения ресурса генератора является применение интегрированного стартер-генератора [45,78]. ИСГ устанавливается

непосредственно на коленчатый вал ДВС, в результате чего необходимость в механической передаче отпадает [113,114]. На рисунке 1.3 показан один из возможных вариантов ИСГ, устанавливаемого на ДВС автомобиля.



Рисунок 1.3 - Интегрированный стартер-генератор, встроенный в маховик ДВС

Исключение ременной передачи дает существенное повышение надежности системы за счет отказа от немалого количества деталей, подверженных быстрому износу. ИСГ может также использоваться в качестве электромагнитного тормоза при невысоких ускорениях торможения, это позволяет экономить топливо за счет рекуперации энергии.

Что касается стартерного режима, то ИСГ позволяет отказаться от традиционного использования редуктора, который выполняет роль маховика ДВС, благодаря чему двигатель запускается с меньшим шумом и более динамично. При этом коленчатый вал двигателя раскручивается до высоких частот вращения, тем самым уменьшая количество вредных выбросов. Применение ИСГ позволяет несложными средствами реализовать систему «старт-стоп». Система «старт-стоп» останавливает ДВС, если автомобиль остается неподвижным более определенного периода времени, это позволяет экономить топливо и запускает его, когда он начинает движение. Ключевые преимущества



такой мягкогибридной системы – это повышенная топливная эффективность и снижение уровня загрязнения. Такая система мягкого гибрида состоит из АБ на 48В, электрической машины (генератора-пускателя), размещённого рядом с ДВС, а также преобразователя переменного тока в постоянный. Суммарная экономия топлива, а, следовательно, снижение количества вредных выбросов при применении ИСГ может достигать 20%, а повышение топливной эффективности - 10-15% [45,115,116].

Помимо своего основного назначения ротор ИСГ также служит и демпфером механических колебаний ДВС. Отсутствие редуктора и совмещение двух электрических машин в одном ИСГ приводит к снижению на (5 – 10)% суммарной массы ДВС и стартер-генератора.

Применение ИСГ позволяет реализовать режим работы, недоступный для традиционного стартера, - режим бустера [25]. В этом режиме стартер функционирует как вспомогательный двигатель на высоких частотах вращения и обеспечивает дополнительный крутящий момент на валу ДВС.

### **1.3 Классификация электрических машин стартер-генераторных устройств транспортных средств и подвижных автономных объектов**

В соответствии со свойством обратимости электромеханических преобразователей в качестве ИСГ может использоваться любая из известных на сегодняшний день электрических машин. Предъявляемые общие требования к этому классу устройств - высокая надежность, низкие массогабаритные показатели, а также стоимость (в случае с крупносерийным производством), хорошая ремонтпригодность.

Для обеспечения генераторного режима работы ИСГ можно использовать любую машину переменного тока, работающую на выпрямительную нагрузку, или коллекторную машину постоянного тока, генерирующие постоянное напряжение для питания бортовой сети АО. В стартерном режиме к традиционным требованиям с позиций конструкции и принципа преобразования электрической мощности в механическую добавляется необходимость

обеспечения определенных, в зависимости от типа ЭМП, способов управления, в частности, формирования напряжения на обмотках электрического двигателя при его питании от сети постоянного тока [100,112].

В большинстве случаев АБ является источником питания бортовой электрической сети при неработающей силовой установке. Как следствие, стартер должен обеспечивать запуск силовой установки при питании от источника постоянного тока. Основные типы электромеханических преобразователей, которые могут применяться в качестве ИСГ, приведены на классификационной схеме, показанной на рисунке 1.4.

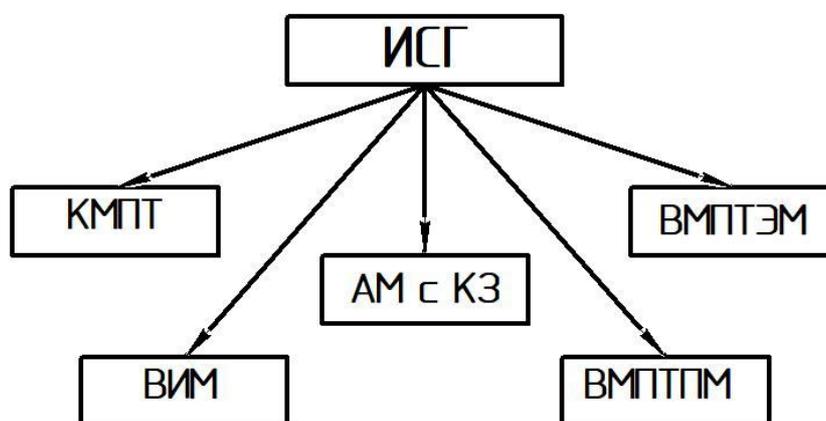


Рисунок 1.4 - Классификация ЭМП для применения в качестве ИСГ

#### *Коллекторная машина постоянного тока (КМПТ)*

Машина постоянного тока с электромагнитным возбуждением нашла широкое практическое применение для привода различных механизмов. К достоинствам КМПТ можно отнести отличную регулировочную способность в широком диапазоне частот вращения, хороший КПД, а так же массогабаритные показатели. Недостатки - крайне низкая надежность из-за использования механического коммутатора (щеточно-коллекторный узел), высокие затраты на изготовление и эксплуатацию. На больших высотах над уровнем моря и в агрессивных средах щеточный контакт неработоспособен.

КМПТ была первой ЭМ, использованной в качестве стартер-генератора постоянного тока. Это единственный тип ЭМ, который можно использовать без

использования электронного коммутационного блока. Тем не менее, расположение механического коммутатора на валу ДВС значительно снижает надежность ИСГ из-за загрязнения этого узла.

При использовании КМПТ без редуктора надежность коллекторно-щеточного узла резко снижается из-за высоких пусковых токов, требуемых для развития высокого пускового момента. Также такой механический коммутатор во время своей работы создает существенные радиочастотные помехи, что требует установки фильтров.

Таким образом, применение КМПТ в качестве ИСГ имеет много больше недостатков, чем достоинств. В итоге получаем дорогостоящий и ненадежный ИСГ с большими эксплуатационными расходами.

#### *Асинхронная машина (АМ)*

В настоящее время АМ в основном используется в качестве электродвигателя. Как генератор эта ЭМ не получила широкого распространения, несмотря на такое преимущество над синхронным генератором, как постоянство частоты генерируемого напряжения при изменении частоты вращения ротора [100]. АМ по надежности близка к ВМПТ с постоянными магнитами, но при этом обладает значительно меньшей стоимостью.

В генераторном режиме АМ требуются дополнительные емкостные элементы для создания реактивной мощности возбуждения, что ограничивает область ее применения из-за их больших габаритных размеров и высокой стоимости.

В то же время существуют неплохие перспективы применения АМ в качестве ИСГ, поскольку она является бесконтактной ЭМ и ее ротор легко может быть установлен на коленчатый вал ДВС [77].

#### *Вентильно-индукторная машина (ВИМ)*

Вентильно-индукторная машина (рисунок 1.5) относится к классу синхронно-реактивных машин, функционирующих в режиме шагового привода с непрерывным вращением. Основная концепция ВИМ была сформулирована еще в конце 30-х годов XIX столетия, но следует отметить, что стремительное развитие

ВИМ началось около 30 лет назад с совершенствования силовой и информационной электроники.

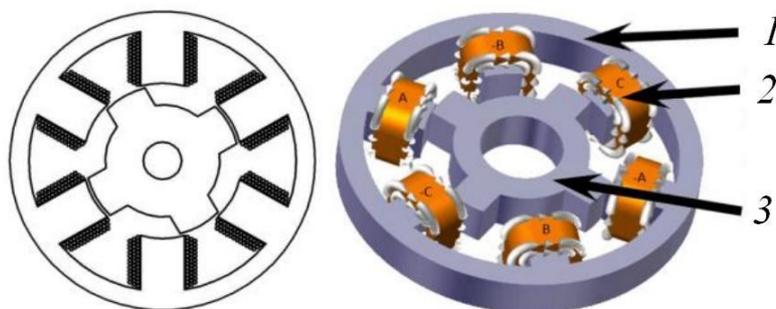


Рисунок 1.5 - Вентильно-индукторная реактивная машина:  
1 – статор; 2 – катушка обмотки якоря; 3 – ротор

Главное достоинство ВИМ – высокая надежность за счет отсутствия обмоток на роторе и простой, механически прочной конструкции вращающейся части. Основные преимущества ВИМ могут быть реализованы при больших частотах вращения  $8000 \div 12000 \text{ мин}^{-1}$  и выше. К недостаткам можно отнести: относительно большие пульсации момента, повышенные шумы и вибрации, а также худшие, по сравнению с остальными типами ЭМП массогабаритные показатели, что весьма критично при использовании в качестве ИСГ автономных объектов.

*Вентильная машина постоянного тока с электромагнитным возбуждением (ВМПТЭМ)*

Одним из решений проблем КМПТ может стать применение электронного блока коммутации вместо коллекторно-щеточного узла. ВМПТЭМ (рисунок 1.6) имеет характеристики, аналогичные КМПТ, а по конструкции представляет собой синхронную машину обычного исполнения, оснащена датчиком положения ротора, в зависимости от сигналов с которого происходит коммутация обмоток якоря. Коммутатор в этой конструкции заменяется контактными кольцами, необходимыми для питания обмотки возбуждения, расположенной на роторе. Возможно изготовление бесконтактной ВМПТЭМ, но массогабаритные размеры и стоимость такой машины при той же мощности будут выше. Данный тип машин

целесообразно использовать на мощных транспортных средствах, где увеличение массогабаритных показателей ЭМП будет не так заметно.

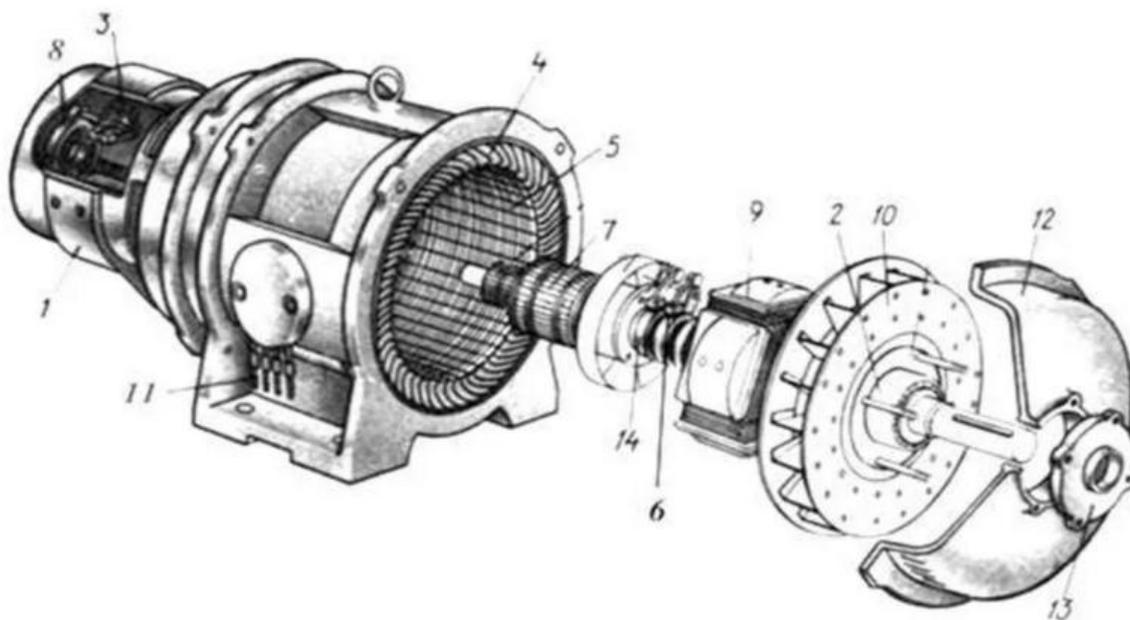


Рисунок 1.6 - Вентильная машина постоянного тока с электромагнитным возбуждением:

- 1 – станина возбуждителя; 2 – подшипник, 3 – щеткодержатели;  
 4 – обмотка статора; 5 – сердечник статора; 6 – щетки; 7 – якорь возбуждителя;  
 8 – щеточная траверса; 9 – полюса; 10 – вентилятор; 11 – выводы обмотки статора;  
 12 – подшипниковый щит; 13 – крышка; 14 – контактные кольца

ВМПТЭМ может быть использована в качестве ИСГ, поскольку электромагнитная система возбуждения, несмотря на присутствие скользящих контактов, хорошо адаптирована к высоким механическим нагрузкам, которые испытывают ЭМП мобильных автономных объектов. ВМПТЭМ имеет более высокую надежность по сравнению с КМПТ, но является более дорогостоящей из-за наличия инвертора.

*Вентильная машина постоянного тока с постоянными магнитами (ВМПТПМ)*

ВМПТПМ (рисунок 1.7) совмещая простоту конструкции и возможности управления ДПТ, обладают следующими преимуществами:

- высоким КПД во всех диапазонах частот вращения ротора, в том числе, и на пониженных частотах вращения;

- простотой конструкции и отсутствием потерь на возбуждение;
- высоким быстродействием и плотностью момента.

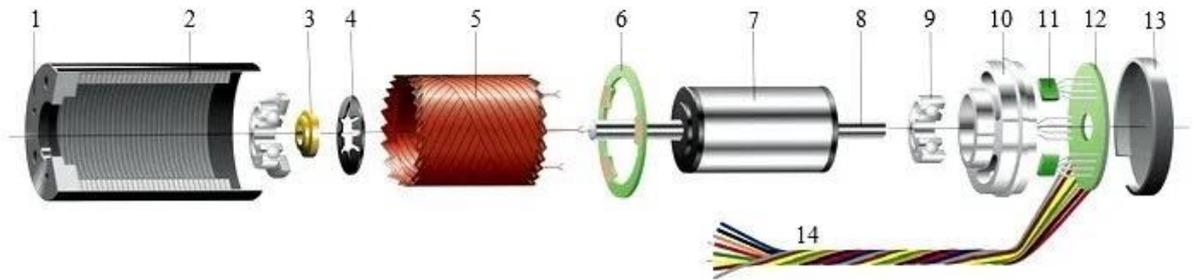


Рисунок 1.7 - Вентильная машина постоянного тока с постоянными магнитами:

- 1 – корпус; 2 – диэлектрическая прослойка; 3 – втулка; 4 – пружина;  
 5 – обмотка статора; 6 – изоляционное кольцо; 7 – постоянные магниты;  
 8 – роторный вал; 9 – подшипник; 10 – обойма; 11 – датчики Холла;  
 12 – монтажная плата; 13 – задняя крышка; 14 – жгут электропроводки

Использование постоянных магнитов для возбуждения в ВМППМ превращает машину постоянного тока в бесконтактную а, следовательно, более надежную. Но за это приходится платить высокую цену, поскольку стоимость ПМ в несколько раз превышает стоимость системы электромагнитного возбуждения. При применении ПМ в ВМППМ также необходимо использовать дополнительные демпфирующие обмотки, предохраняющие постоянные магниты от размагничивания в пусковых режимах применительно к работе стартером и при коротких замыканиях в генераторном режиме. ВМППМ применяется в системах автоматика и оборудовании, где предъявляются высокие требования к стабильности частоты вращения [103].

К недостаткам таких машин относят необходимость применения дополнительного оборудования для регулирования режимов работы, установки датчиков обратной связи. Появление современных систем управления, датчиков (датчики Холла) и материалов для постоянных магнитов позволило решить эти проблемы.

Целесообразно применение ВМППМ в качестве ИСГ только тех в случаях, когда общая стоимость устройства не является определяющей характеристикой, а

сам автономный объект не подвергается высоким механическим перегрузкам, так как в этом случае это приведет к повреждению постоянных магнитов [6].

ВМПТПМ способна обеспечить полный комплекс технических требований для использования в качестве СГУ автономных объектов. В дальнейшем в тексте применительно к ВМПТПМ будем придерживаться устоявшейся международной аббревиатуры СМППМ (синхронная машина с постоянными магнитами).

#### **1.4 Состояние вопроса в области разработок интегрированных стартер-генераторов**

За последние 20 лет заметно возросла активность в области создания и совершенствования ИСГ среди крупных автомобильных производителей мира. Наиболее активно ведутся разработки в фирмах: Toyota, Honda, Peugeot-Citroen, VW, Denso, Valeo, Nissan, Robert Bosch, Luk Lamellen и многих других.

Существенный вклад в развитие ИСГ среди российских организаций вносят ООО «АвтоВАЗ», ФГУП «НАМИ», МГТУ «МАМИ». Разработки данных компаний отличаются по видам и назначению алгоритмов работы, конструкции и схеме привода ИСГ, а также по компоновке ЭМ в трансмиссии.

Совершенствование конструкций ИСГ [70] и систем управления [24,70] ими в основном направлено на расширение их функциональных возможностей. Результат развития представляется в увеличении надёжности, улучшении энергетических характеристик, минимизации дополнительных потерь в ЭМ и силовом преобразователе, повышении технологичности изготовления и сборки, упрощении конструкции, снижении стоимости. Достижение заявленных преимуществ зависит от конструкции ЭМП, способа механического соединения валов ДВС и электрической машины, а также специфики построения силового преобразователя и схемы управления [74].

Тип используемой электрической машины во многом определяет основные статические и динамические характеристики ИСГ. Разработки ведущих фирм в этой области строятся на базе следующих типов ЭМП [14,15,17,42,74,117]:

- асинхронная машина с короткозамкнутым ротором;

- вентильно-индукторная машина с самовозбуждением;
- синхронная машина с постоянными магнитами.

Асинхронная машина с короткозамкнутым ротором – наиболее часто применяемая в стартер-генераторных установках электрическая машина. Ее главные достоинства заключаются в простоте конструкции, высокой надежности и небольшой стоимости. Однако АМ обладают и существенными, хорошо известными недостатками, основным из которых применительно к ИСГ, следует считать необходимость наличия источника реактивной мощности на борту АО. Редукторные и безредукторные СГУ на базе АМ, а также исследование их динамических и статических режимов рассматриваются в работе [5]. Разработке высоковольтного (300В) и низковольтного (42В) асинхронных ИСГ посвящена работа [107]. Система с мягким гибридом на 48 вольт, представленная фирмой Delphi, позволяющая увеличить на 25% крутящий момент на низких оборотах, рассмотрена в работах [115,116].

Имеется целый ряд публикаций, посвященных возможности использования вентильных электродвигателей [47,49] и вентильно-индукторных машин в СГУ [14,73,85]. Электрическая машина типа ВИМ подробно описана в ряде работ [45,72,73]. Однако, для реализации требований по величине момента при «холодном пуске» ДВС необходимо увеличивать габариты и массу ВИМ и применять специальные способы управления для использования в области низких частот вращения ( $0 \div 800 \text{ мин}^{-1}$ ). Энергетические показатели ВИМ - КПД и  $\cos \varphi$  в таких режимах находятся на уровне  $0,5 \div 0,6$ , что не отвечает современным требованиям по энергоэффективности, но с учетом кратковременного режима работы вполне допустимы.

Как отмечается в работе [74] ВИМ характеризуется искаженным вращающимся полем статора, что приводит к колебаниям электромагнитного момента, возникновению радиальных электромагнитных сил и неравномерностям вращения ротора, действующих на сердечник статора. Кроме этого, ВИМ по своим функциональным параметрам, при прочих равных условиях, будут уступать ЭМП с постоянными магнитами по величине диапазона частот



вращения. Для обеспечения генераторного режима ВИМ необходимо переводить в режим так называемого «двойного питания», затрачивая от источника дополнительную электроэнергию на возбуждение. При использовании ЭМП с постоянными магнитами такие затраты отсутствуют.

Применение бесконтактной синхронной электрической машины с возбуждением от высококоэрцитивных магнитов в качестве стартер-генератора описано в работах [19,106,122]. Использование стартер-генератора в системе электроснабжения самолетов нового поколения показано в [18]. В [43] рассматривается возможность эксплуатации ИСГ в беспилотном летательном аппарате.

Машина с постоянными магнитами имеет более высокую эффективность по сравнению с другими типами ЭМП. Кроме этого преимущества высокой пусковой производительности в стартерном режиме и лучшее качество электроэнергии в режиме генерации позволяют рассматривать СМПМ в качестве основного кандидата на использование в ИСГ.

Интегрированный стартер-генератор является одним из ключевых компонентов гибридных электромобилей. Однако значительная разница в мощности между режимами стартера и генератора вызывает сложности при проектировании и практической реализации подобного устройства. Для решения этой проблемы в [36,118] предложена СМПМ с двойным воздушным зазором, что позволяет реализовать требуемые характеристики в обоих режимах, хотя и существенно усложняет конструкцию машины.

СМПМ может быть выполнена со сравнительно большим воздушным зазором, что позволяет ослабить влияние поля реакции якоря на основной магнитный поток. Охлаждение такой машины не представляет серьезных проблем [105]. Стоимость СМПМ выше, чем других ЭМП из-за применения в ней дорогостоящих магнитов на основе материала NdFeB. Также имеются сложности регулирования напряжения в генераторном режиме [14,68,98]. Управление ИСГ является довольно сложным процессом [29] и, как правило, осуществляется от процессора, специализированного на управлении электродвигателями. Но

возможность работы СМППМ в условиях высокой запыленности и ее устойчивость к значительным токовым перегрузкам в двигательном режиме [19], наряду с перечисленными достоинствами, определяет перспективы их использования в ИСГ АО.

Осуществлять механическую связь между ДВС и низковольтным стартер-генератором в [119] предложено посредством ременной передачи. На рисунке 1.8 приведена испытательная установка.

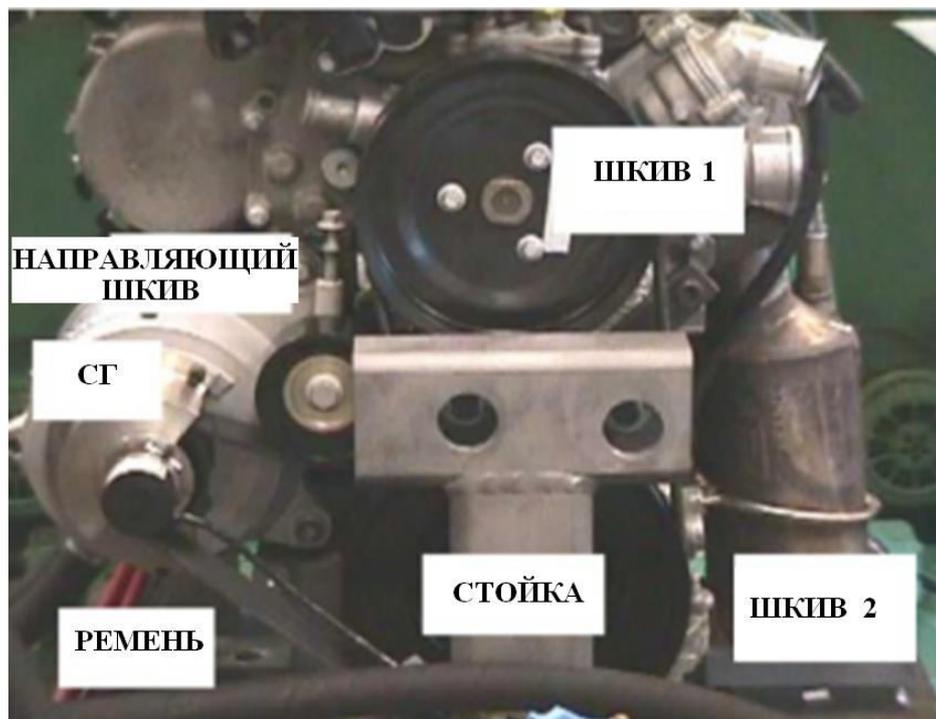


Рисунок 1.8 - Ременный привод ИСГ

Данная компоновка СГУ позволяет проворачивать вал ДВС при низких температурах, имеет хороший потенциал для осуществления быстрого и плавного пуска ДВС, обеспечивает мощность около 4 кВт в генераторном режиме. Однако в последних разработках ведущих зарубежных автомобильных фирм предлагаются конструкции СГУ, интегрированные в ДВС, что является на сегодняшний день наиболее рациональным вариантом компоновки силовой электромеханической установки автомобиля.

## **Выводы по 1 разделу**

Проведенный анализ конструкций и схемных решений стартер-генераторных устройств с позиций их использования в автономных объектах позволяет сформулировать следующие выводы:

1. В настоящее время СГУ является одним из основных узлов гибридного автомобиля, причем с функциями не только стартера, генератора, но и тягового двигателя. Кроме этого, они находят широкое применение в АО, в частности во вспомогательных дизель-генераторных установках бронетанковой техники, компактных источниках энергопитания на базе дизель-генераторных установок в инженерных войсках, мобильных электростанциях и т.д.

2. Интегрирование стартер-генератора в силовую установку позволяет увеличить мощность генераторного режима, уменьшить массо-габаритные показатели силовой установки автономного объекта, снизить расход топлива и вредные выбросы в атмосферу.

3. Показано, что ВМПТПМ (СМППМ) является одним из перспективных типов ЭМП, используемого в качестве ИСГ АО, однако, вопросы улучшения энергетических, эксплуатационных и массо-габаритных показателей СГУ при системном подходе к описанию электромашинной части и системы управления ИСГ остаются мало изученными.

4. Влияние конфигурации, геометрических размеров магнитной системы, обмоточных данных и способов управления ИСГ в генераторном и в стартерном режиме работы на эффективность СГУ не нашли должного отражения в научно-технической литературе.

5. Существует насущная потребность в математических моделях, позволяющих осуществлять расчет стационарных и переходных режимов работы ИСГ современными программными средствами в средах компьютерного и численного моделирования.

## **2. СИСТЕМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ И ЯКОРНЫЕ ОБМОТКИ ИСГ НА БАЗЕ СМПМ**

ИСГ является электромеханическим преобразователем, объединяющим в себе две отдельные машины – стартер и генератор, для каждой из которых характерны своя специфика построения силовой части, схем управления, требования к объему и массе, энергоэффективности. Поэтому на стадии выбора и обоснования конструкции СГУ АО возникает необходимость предварительной оценки массогабаритных и энергетических показателей ИСГ в целом.

### **2.1 Основные требования к ИСГ и критерии качества**

Задачей проектирования ИСГ, а также СГУ автономных объектов является получение минимальных массы и габаритных размеров ЭМП. Это требование диктуется возможностью компоновки ИСГ в ТС или автономном объекте при весьма ограниченном для этой цели пространстве [92].

Размещение ИСГ между ДВС и коробкой передач предполагает его конструкцию с минимальным осевым размером. Если между ДВС и ИСГ имеется сцепление, то оно должно вписываться по габаритам в установочное пространство, что сегодня возможно только при помощи гидравлических механизмов.

ИСГ должен создавать высокий крутящий момент для быстрого и надежного запуска ДВС в широком диапазоне температур. Кроме этого, необходим достаточный резерв крутящего момента для пуска ДВС во время движения автомобиля на электротяге. Причем запас по моменту должен быть таким, чтобы в движении ТС не было рывков [5,94,120].

В современных схемах электрооборудования ТС КПД генераторных установок составляет 50 – 60%, что затрудняет удовлетворение растущих требований к энергопотреблению. Решения задач увеличения мощности одновременно с увеличением КПД и ресурса генераторной установки, повышения экологичности и топливной экономичности ТС, а также уменьшения полной массы ДВС можно осуществить посредством применения ИСГ [1].

В гибридных ТС ИСГ может быть использован для улучшения разгонной динамики машины. Для этого также следует обеспечить высокий КПД, так как этот показатель непосредственно влияет на расход топлива такого транспортного средства [94].

Аналогичные требования предъявляются к мобильным автономным объектам. К ним можно отнести передвижные дизель-генераторные установки мощностью 10 – 15 кВт, которые широко используются в сельском хозяйстве, лесной промышленности, в геологоразведочных экспедициях в качестве основного, резервного и аварийного источника электропитания силовых и осветительных сетей [101], а также дизель-генераторов вспомогательных силовых установок бронетанковой техники [20].

Таким образом, основными критериями при проектировании ИСГ целесообразно выбрать следующие показатели:

- минимальная масса;
- минимальные габаритные размеры при ограниченной осевой длине;
- максимум КПД.

## 2.2 Массогабаритные показатели ИСГ на базе СМПМ

Рассмотрим и сформируем в первую очередь требования, предъявляемые к ИСГ при работе в генераторном режиме, так как этот режим работы ИСГ является определяющим с точки зрения тепловых нагрузок и длительности их приложения.

В техническом задании (ТЗ) на проектирование обычно указываются: номинальная  $P_n$  и максимальная  $P_{max}$  мощности генератора; число фаз  $m$ ; коэффициент мощности  $\cos \varphi$ ; номинальное линейное  $U_n$  или фазное  $U_\phi$  напряжение; номинальная частота вращения  $n$  и диапазон частот вращения; режим работы (длительный, кратковременный, повторно-кратковременный); ограничения на массу и габаритные размеры.

На основании ТЗ определяются конструкция генератора и тип индуктора, основой выбора которых является материал постоянного магнита. Обязательному учету подлежат и такие параметры, как предельная мощность, механическая

прочность, перегрузочная способность, качество электроэнергии, надежность, стоимость. Таким образом, задача выбора типа индуктора СМПМ является многокритериальной.

Одним из параметров, определяющим вид материала ПМ является предельная мощность. Предельная мощность – это максимальная мощность, которую может выдать генератор данного типа при заданных технических условиях. Известно [11], что в общем случае для синхронного генератора независимо от способа его возбуждения (электромагнитное или магнитоэлектрическое) значение предельной электрической мощности равно:

$$P_{\text{э пред}} = 765 \lambda_{\Gamma} \left( \frac{v_{\text{д}}^3}{n^2} \right) (AB_{\delta})_{\text{пред}}, \quad (2.1)$$

где  $\lambda_{\Gamma} = l/D$  – отношение длины активной части машины к диаметру якоря;  $v_{\text{д}}$  – допустимая окружная скорость ротора;  $n$  – частота вращения ротора;  $(AB_{\delta})_{\text{пред}}$  – максимальное значение произведения электромагнитных нагрузок.

Электромагнитные нагрузки в генераторах с постоянными магнитами определяются магнитными свойствами ПМ, и их нельзя выбирать вне связи с этими свойствами [11]. Если принять средние значения расчетных коэффициентов, характеризующих распределение магнитного поля в машине, произведение линейной нагрузки и магнитной индукции в зазоре можно определить, как [99]:

$$(AB_{\delta}) = 0,346 \frac{1}{1 + \sin \varphi} \left( \frac{B_{M0} H_{MK}}{\sigma_0} \right) p k_r, \quad (2.2)$$

где  $B_{M0}$  – индукция в нейтральном сечении магнита в режиме холостого хода;  $H_{MK}$  – напряженность поля в магните при установившемся коротком замыкании;  $p$  – число пар полюсов;  $\sigma_0$  – коэффициент рассеяния магнитного потока;  $\cos \varphi$  – коэффициент мощности нагрузки;  $k_r = 4V_M / \pi D^2 l$  – коэффициент заполнения магнитом объема индуктора;  $V_M$  – объем постоянного магнита.

Подставляя (2.2) в (2.1) получаем выражение для предельной мощности:

$$P_{\text{эпред}} = 264\lambda_{\Gamma} \left( \frac{v_{\text{д}}^3}{n^2} \right) \frac{1}{1 + \sin \varphi} \left( \frac{B_{M0} H_{MK}}{\sigma_0} \right) p k_r, \quad (2.3)$$

Это выражение позволяет решать и обратную задачу - определять объем ПМ при известной предельной мощности и заданных габаритных размерах СМПМ:

$$V_{\text{М}} = \frac{P_{\text{эпред}} \sigma_0 n^2 (1 + \sin \varphi)}{264\lambda_{\Gamma} v_{\text{д}}^3 B_{M0} H_{MK} p \pi D^2 l} \quad (2.4)$$

Известно, что в первом приближении произведение  $(AB_{\delta})$ , полученное при условии оптимального использования энергии постоянного магнита определяется выражением (2.2). Это произведение позволяет выбирать материал и характеристики магнита, соответствующие допустимому тепловому режиму и заданной мощности генератора.

Необходимый объем ПМ зависит от типа магнитной системы, удельной энергии и степени использования ПМ, характера нагрузки (коэффициента мощности). При определении объема магнита, в расчет должна приниматься максимальная мощность  $P_{\text{max}}$ , так как в отличие от машин с электромагнитным возбуждением здесь невозможна форсировка возбуждения.

### 2.3 Постоянные магниты и магнитные системы перспективных СМПМ

Из всего многообразия материалов ПМ, которые могут быть использованы для систем возбуждения СМПМ при работе как в генераторном, так и в стартерном режимах, в настоящее время целесообразно рассматривать следующие магнитные материалы [37,50]:

- материалы на основе сплавов FeAlNiCo (альнико, ЮНДК, ЮНДКТ);
- оксидные магнитные материалы на основе ферритов бария и стронция;
- магнитные материалы на основе соединений из редкоземельных материалов (РЗМ) NdFeB, SmCo.

Выбор указанных материалов для индуктора ИСГ объясняется тем, что их свойства перекрывают весь возможный диапазон по остаточной индукции,

коэрцитивной силе и магнитной энергии всех, известных в настоящее время, магнитных материалов.

Магнитные материалы сплавов FeAlNiCo обладают высоким значением остаточной индукции  $B_r$  ( $0,9 \div 1,3$  Тл), однако подвержены размагничиванию за счет внешних магнитных полей ( $H_{ce}=50 \div 145$  кА/м). Эти материалы сохраняют свои магнитные свойства до температуры  $400^\circ\text{C}$  [84].

Оксидные магниты на основе ферритов обладают высоким значением коэрцитивной силы ( $H_{ce}=180 \div 250$  кА/м), почти не размагничиваются под действием внешних полей, но имеют относительно малые значения остаточной индукции  $B_r$  ( $0,2 \div 0,4$  Тл) и сохраняют свои свойства до температур порядка  $300^\circ\text{C}$ .

Магнитные материалы на основе соединений из РЗМ обладают рекордными магнитными свойствами: остаточной индукцией ( $B_r=0,9 \div 1,3$  Тл), коэрцитивной силой ( $H_{ce}=800 \div 1000$  кА/м), но являются довольно дорогостоящими и сохраняют магнитные свойства до температур  $180^\circ\text{C}$  NdFeB и  $250 \div 300^\circ\text{C}$  SmCo.

Рассмотрим процедуру выбора конфигурации магнитной системы ИСГ с точки зрения стартерного режима работы. В этом режиме ИСГ представляет собой БДПТ с трапецеидальным распределением индукции магнитного поля в зазоре. Известно, что проектирование БДПТ базируется на расчетных соотношениях для выбора главных размеров: диаметра расточки якоря  $D_i$ , длины якоря  $l_i$  и соотношения между ними  $\lambda=l_i/D_i$ . Величина диаметра  $D_i$  определяется, исходя из заданных установочных размеров ИСГ на ДВС и по известным рекомендациям для БДПТ после предварительного выбора электромагнитных нагрузок – индукции в зазоре  $B_\delta$  линейной нагрузки  $A$  и плотности тока в обмотке якоря  $j$ . В электромеханических преобразователях с постоянными магнитами эти величины зависят от энергетических характеристик материала магнита, его объема и степени использования. В качестве базовой линейки материалов ПМ для сравнения и анализа выбираем: ЮН14ДК24, 28БА190, КСП37.



Свойства ПМ характеризуются следующими параметрами:

- остаточной индукцией  $B_r$ ;
- коэрцитивной силой по индукции  $H_{CB}$ ;
- коэффициентом возврата  $\rho$ , равным отношению:

$$\rho = \operatorname{tg}\beta = \frac{\Delta B}{\Delta H},$$

где  $\beta$  – угол между осью абсцисс и прямой возврата на рабочей диаграмме ПМ;

- максимальной удельной магнитной энергией, равной отношению:

$$W_{\text{уд}} = \frac{(BH)_{\text{max}}}{2};$$

- магнитной твердостью по намагниченности, равной отношению:

$$\Theta_m = \frac{\mu_0 H_{cm}}{B_r};$$

– коэффициентом формы кривой размагничивания (коэффициентом выпуклости), равным отношению:

$$\gamma = \frac{(BH)_{\text{max}}}{B_r H_{CB}}.$$

Кривые размагничивания магнитов, изображенные на рисунке 2.1 показывают, что внутреннее размагничивающее поле, которое возникает в магните при повышении магнитного сопротивления внешней цепи, приводит к смещению рабочей точки А вниз по кривой размагничивания (точка В). После восстановления магнитного сопротивления у литых магнитов (ЮН14ДК24) рабочая точка окажется на линии магнитного возврата (прямой возврата), расположенной ниже линии, определяющей прежнее состояние магнита (точка С<sub>1</sub>). Произойдет частичное размагничивание.

Для ферритовых и редкоземельных магнитных материалов при изменении магнитного сопротивления внешней цепи точка А будет смещаться по линейному участку кривой размагничивания вниз, не доходя до точки перегиба, и размагничивания не произойдет.

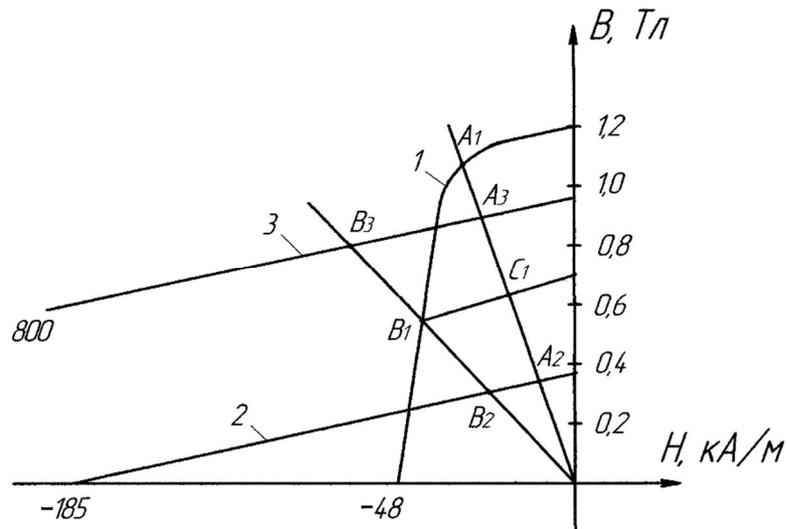


Рисунок 2.1 - Кривые размагничивания магнитов:  
1 – ЮН14ДК24; 2 – 28БА190; 3 – КСП37

Аналогичным образом действует на магнит внешнее размагничивающее поле, возникающее в ИСГ под нагрузкой (рисунок 2.2).

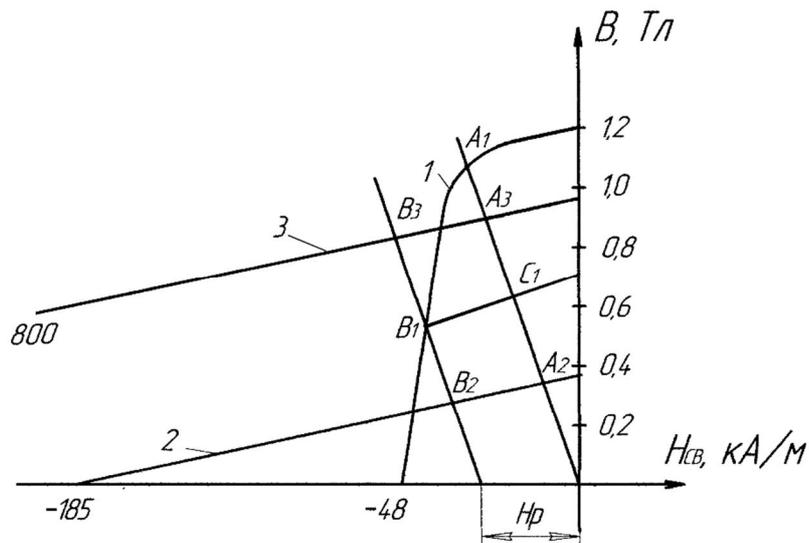


Рисунок 2.2 - Воздействие внешнего размагничивающего поля на постоянный магнит

Поэтому литые магниты марки ЮНДК необходимо защищать от перегрузки либо специальными компенсационными обмотками, либо полюсными наконечниками. ПМ на основе материалов ферритов бария, стронция и РЗМ могут выдерживать внешнее размагничивающее поле, не превышающее  $H_{CB}$  не теряя остаточной энергии, позволяют демонтировать ИСГ и намагничивать его в свободном состоянии.

У магнитов на основе ферритов бария и стронция и РЗМ проявляется зависимость магнитных свойств от температуры, а у литых магнитов ее можно не учитывать. При воздействии температуры на ферритовый магнит его остаточная индукция уменьшается величину до 0,2%, при увеличении температуры на 1°С. У магнитов на основе РЗМ подобное увеличение температуры вызывает уменьшение индукции на величину на 0,13%, а у магнитов FeNiCo всего на 0,008%, хотя коэрцитивная сила падает больше.

Влияние той или иной марки магнита на массогабаритные, энергетические и динамические характеристики обычно связано с величиной максимальной удельной магнитной энергии. Однако для оценки параметров ИСГ одной этой характеристики недостаточно.

Для ИСГ более пригоден другой критерий сравнения магнитов – добротность, которая определяется как [84]:

$$D = (R_{\text{э}} \cdot R_{\text{см}})_{\text{max}}, \quad (2.5)$$

где  $R_{\text{э}} = B \cdot H / 2$  – ресурс удельной энергии;  $R_{\text{см}} = H_{\text{см.нр.}}$  – ресурс стабильности ( $H_{\text{см.нр.}}$  – предельное значение внешнего размагничивающего поля, не вызывающее необратимой потери потока).

Значения добротности, ресурса стабильности и энергетического ресурса (ресурса удельной энергии) основных магнитотвердых материалов приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Основные показатели базовой линейки магнитотвердых материалов

Материал	$B_r$ , Тл	$H_{\text{см}}$ , кА/м	$\Theta_M$	$W_{\text{уд}}$ , кДж/м <sup>3</sup>	D		$R_{\text{э}}$ , кДж/м <sup>3</sup>	$R_{\text{см}}$ , кА/м	$\Theta_M W_{\text{уд}}$	
					ГДж/м <sup>4</sup>	о.е.			кДж/м <sup>3</sup>	о.е.
Литой сплав - ЮН14ДК24	1,2	48,1	0,05	18	0,23	1	10,2	22,5	0,9	1
Феррит - 28БА190	0,33	263	1,0	9,55	0,96	4,17	9,2	105	9,55	10,6
РЗМ - КСП37	0,9	800	1,18	65	19,7	85,6	63,6	310	76,7	85,3

Из таблицы видно, что ресурс стабильности у РЗМ значительно выше, чем у сплавов Альнико и ферритов. Магнитная твердость  $\Theta_M$  сплавов Альнико значительно меньше, чем у ферритов и РЗМ.

Значение критерия добротности свидетельствует о том, что магнитное качество ферритов приближается к качеству лучших марок магнитов Альнико. Благодаря высокой магнитной добротности и относительной дешевизне ферритов область их применения постоянно расширяется. Добротность РЗМ в свою очередь в 20 раз превышает добротность литых магнитов и ферритов.

Принимая во внимание проанализированные показатели, а также динамику роста стоимости постоянных магнитов можно утверждать, что в качестве ПМ АО для ТС наиболее приемлемыми являются ферритовые магниты, и только в тех случаях, когда решающее значение имеют минимальный объем и масса (что справедливо для ИСГ), целесообразно применение магнитов на основе РЗМ.

От особенностей конструктивного исполнения индуктора зависит влияние ПМ на характеристики ИСГ. Оптимальная форма магнитов определяется по их свойствам. Литые магниты (FeAlNiCo) обладают низким ресурсом стабильности и относительно высокой остаточной индукцией ( $B_r = 0,9 \div 1,2$  Тл), из-за этого длина таких магнитов (то есть расстояние между поверхностями полюсов) выполняется больше, чем ширина. Изготавливают такие магниты в виде брусков, сегментов или скоб. Магниты на основе ферритов и РЗМ, напротив, имеют длину существенно меньше ширины и изготавливают в виде призм или шайб.

Обобщенные требования к ПМ и магнитным системам ИСГ с точки зрения эффективности их применения могут быть сформулированы следующим образом:

- обеспечение максимального магнитного потока в заданном объеме;
- создание оптимального распределения плотности магнитного потока в рабочем объеме системы;
- обеспечение устойчивости к размагничивающим полям и другим размагничивающим факторам;
- сокращение стоимости магнитной системы (особенно при массовом выпуске изделий).

Исходя из поставленных требований к магнитным системам, с целью правильного выбора геометрических размеров и материалов постоянных магнитов необходимо разработать численные показатели (критерии), позволяющие в компактной форме учесть все сформулированные выше требования.

При выборе марки постоянного магнита целесообразно пользоваться рассмотренным ранее критерием добротности, отнесенным к стоимости материала постоянного магнита:

$$d_{\max} = D / C_m, \quad (2.6)$$

где  $D$  – добротность магнита,  $C_m$  – стоимость материала магнита.

При оценке магнитной системы возможно использование критерия  $K$ , связывающего наиболее существенные конструктивно-технические и эксплуатационные свойства [9].

$$K = p \cdot \Phi_\delta H_\delta \delta, \quad (2.7)$$

где  $p$  – число пар полюсов магнита;  $\Phi_\delta$  – магнитный поток полюса постоянного магнита в воздушном зазоре;  $H_\delta$  – напряженность магнитного поля в воздушном зазоре;  $\delta$  – рабочий зазор.

Нетрудно видеть, что предложенный показатель является энергетической характеристикой постоянных магнитов, пропорционален запасу энергии, которую магнит приобретает при намагничивании и передает в дальнейшем в рабочий объем при использовании его в ИСГ.

Проведенный сравнительный анализ, показал, что наиболее эффективным магнитным материалом для использования в ИСГ на базе СМПМ является магниты на основе РЗМ, несмотря на их относительно высокую стоимость, по сравнению с магнитами на основе сплавов FeAlNiCo и ферритов.

С учетом известных принципов построения магнитных систем с постоянными магнитами существует достаточно большое разнообразие конструкций СМПМ, которые требуют оценки эффективности использования активного объема машины. Рассмотрим существующие конструкции магнитных

систем для СМПМ. Наибольшее применение получили магнитные системы с ферритовыми магнитами в виде сегментов, закрепленными на магнитомягком сердечнике без полюсных наконечников (рисунки 2.3 и 2.4).

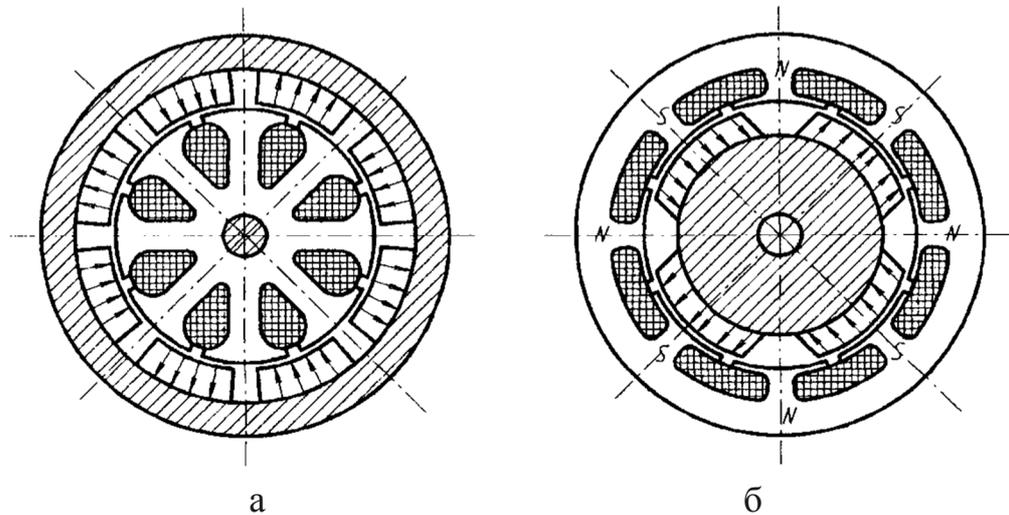


Рисунок 2.3 - Магнитные системы явнополюсной конструкции (а – с внешним; б – с внутренним индуктором)

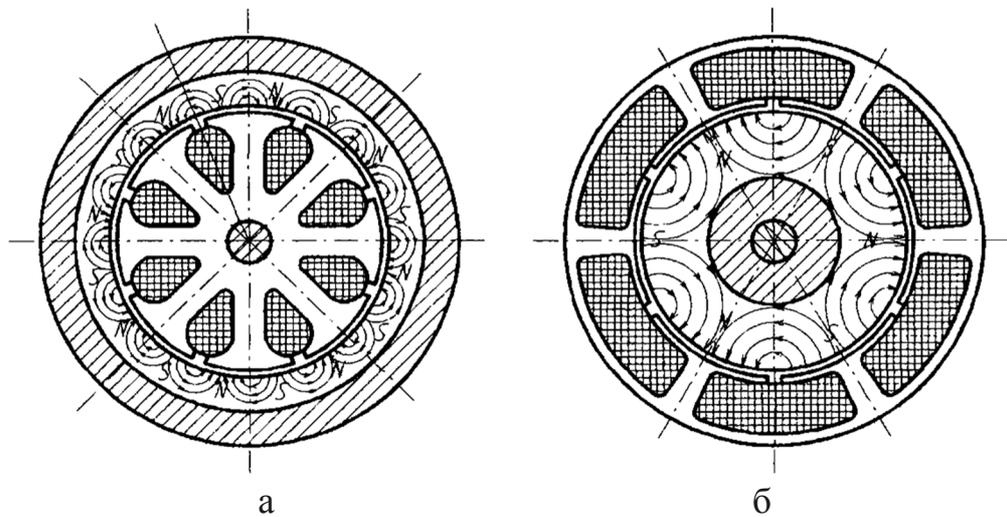


Рисунок 2.4 - Магнитные системы неявнополюсной конструкции (а – с внешним; б – с внутренним индуктором)

Эти конструкции технологичны, допускают тангенциальное и радиальное намагничивание магнитов. Они могут быть реализованы как с внешним, так и с внутренним индуктором. Индукция в рабочем зазоре таких МС составляет  $0,15 \div 0,25$  Тл. Внешний индуктор позволяет довести диаметр якоря до  $70 \div 80\%$  от наружного диаметра СМПМ, что дает возможность увеличить площадь пазов и

повысить линейную нагрузку якоря. Стремление довести коэффициент полюсного перекрытия до максимума, обусловило появление неявнополюсных конструкций (рисунок 2.4). В настоящее время такие магнитные системы изготавливаются и на основе РЗМ магнитопластов.

Существенным недостатком рассмотренных конструкций, является низкое значения индукции в зазоре при использовании ферритовых магнитов, поэтому возникает необходимость изыскания для магнитной системы ИСГ более энергетически емкой и эффективной конструкции индуктора.

В общем случае задача проектирования систем возбуждения на базе ПМ сводится к получению максимального электромагнитного момента (усилия) при минимальном объеме ПМ. Электромагнитный момент увеличивается пропорционально количеству полюсов, объему постоянного магнита и его энергетическому произведению. С учетом этого рассмотрим перспективные, с точки зрения использования в ИСГ, конструкции индукторов с ПМ.

### **2.3.1 Индуктор с когтеобразными полюсами**

Главным достоинством когтеобразного индуктора является то, что ПМ защищены магнитомягким материалом (когтями) от внешнего воздействия, а его первоначальное намагничивание может осуществляться внешним однородным магнитным полем. Конструкция индуктора с когтеобразными полюсами показана на рисунке 2.5.

Степень использования ПМ в таком индукторе достаточно высока, рабочие индукции в зазоре достигают  $0,6 \div 0,8$  Тл. ПМ в когтеобразном роторе представляет собой полый цилиндр, намагниченный в аксиальном направлении. Магнит имеет простую форму и расположен вблизи оси ротора. Благодаря этому и высокой механической прочности наружных магнитомягких элементов (когтей, фланцев) в такой конструкции могут быть реализованы окружные скорости до  $80 \div 100$  м/с.

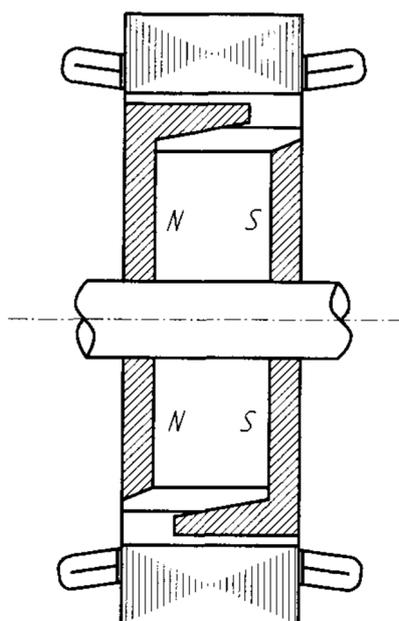


Рисунок 2.5 - Когтеобразный индуктор с ПМ

Помимо достоинств, у когтеобразных магнитов имеются следующие недостатки:

- довольно сложная конструкция когтеобразных роторов. При высоких частотах вращения может происходить отгиб концов когтей ротора, а это требует специальных креплений;

- радиальные размеры ротора с когтеобразными магнитами больше, чем у ротора в форме звезда, коэффициент заполнения объема ротора ниже, что приводит к повышению удельной массы СМПМ с когтеобразным ротором. С повышением мощности резко возрастает удельная масса;

- наблюдается значительное падение магнитного напряжения в когтях ротора по причине малой площади их поперечного сечения. Чтобы избежать насыщения полюсы ротора часто изготавливаются с переменной шириной;

- намагничивание магнитов в когтеобразных роторах представляет значительные трудности, поскольку оно производится в сборе с арматурой ротора;

- такие индукторы характеризуются существенным рассеянием магнитного потока.



### 2.3.2 Индуктор с призматическими магнитами и полюсными башмаками

С появлением анизотропных материалов, обладающих высокой удельной магнитной энергией дало возможность разработать звездообразные индукторы с полюсными наконечниками (рисунок 2.6, *а*) и призматическими магнитами (рисунок 2.6, *б*). Магниты располагаются между магнитной втулкой и полюсной частью биметаллического сварного цилиндра. Предварительно нагретый биметаллический цилиндр напрессовывается на полюсы магнитов. Конструкция ротора приобретает механическую прочность. Магниты намагничиваются в радиальном направлении. Генераторы с ротором «звездочка», биметаллической обоймой и призматическими магнитами чаще всего выполняются на высокие мощности (до 100 кВ·А, при  $n=8000 \div 12000$  мин<sup>-1</sup>). Они обладают небольшой удельной массой, что позволяет конкурировать с бесконтактными генераторами с электромагнитным возбуждением.

Использование высококоэрцитивных магнитов на основе РЗМ дает возможность применить конструкцию, приведенную на рисунке 2.6, *в*.

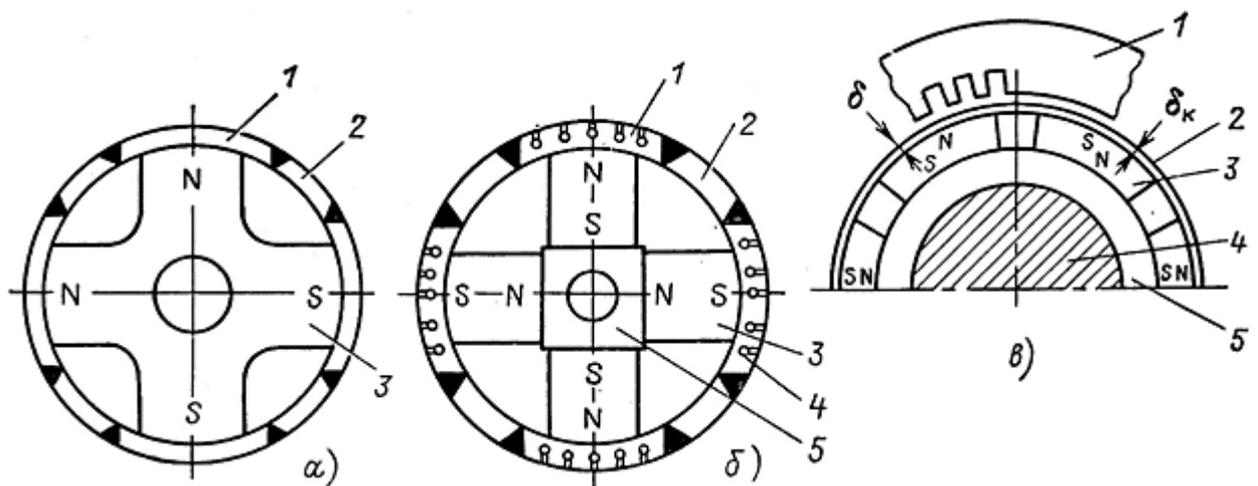


Рисунок 2.6 - Сборные магнитные системы роторов «звездочка»:

(*а* – со сварными полюсными башмаками и *б* – с призматическими магнитами: 1 – магнитная сталь; 2 – немагнитная сталь; 3 – магнит; 4 – демпферная клетка; 5 – ступица (магнитная втулка)); (*в* – с немагнитным кольцом: 1 – яркорь; 2 – кольцо немагнитное; 3 – магнит; 4 – вал; 5 – магнитная втулка)

Для удержания магнитов 3 (в форме дуги) в собранном состоянии применяют немагнитный полый цилиндр, выполненный из высокопрочной стали. При этом

рост расчетного воздушного зазора  $\delta$  за счет толщины кольца  $\delta_k$  не влияет значимым образом на выходные характеристики ЭМ. Замыкание магнитной цепи обеспечивает магнитная втулка 5.

Генераторы с ротором «звездочка» и полюсными наконечниками, обладая сравнительно малым рассеянием индуктора, имеют мягкие внешние характеристики, что облегчает условия работы стабилизаторов и регуляторов напряжения.

### 2.3.3 Индуктор с инкорпорированными ПМ

Индукторы с ПМ, встроенными в магнитный сердечник ротора, имеют различные конструкции. Рассмотрим две конструкции таких индукторов с тангенциальным и радиальным намагничиванием магнитов. Эскиз индуктора с тангенциально намагниченными встроенными магнитами представлен на рисунке 2.7, а; с радиально намагниченными инкорпорированными ПМ на рисунке 2.7, б. Конструкция индуктора с встроенными ПМ реализована следующим образом: на немагнитный вал 1, напрессован сердечник 2 из шихтованного или сплошного магнитного материала, который выступает в роли ярма, а также полюсных наконечников. В сердечник с торцов устанавливают постоянные магниты 3, намагниченные тангенциально или радиально. На рисунке 2.7 показаны конструкции ротора, полюсы которого изготовлены из одного целого магнита.

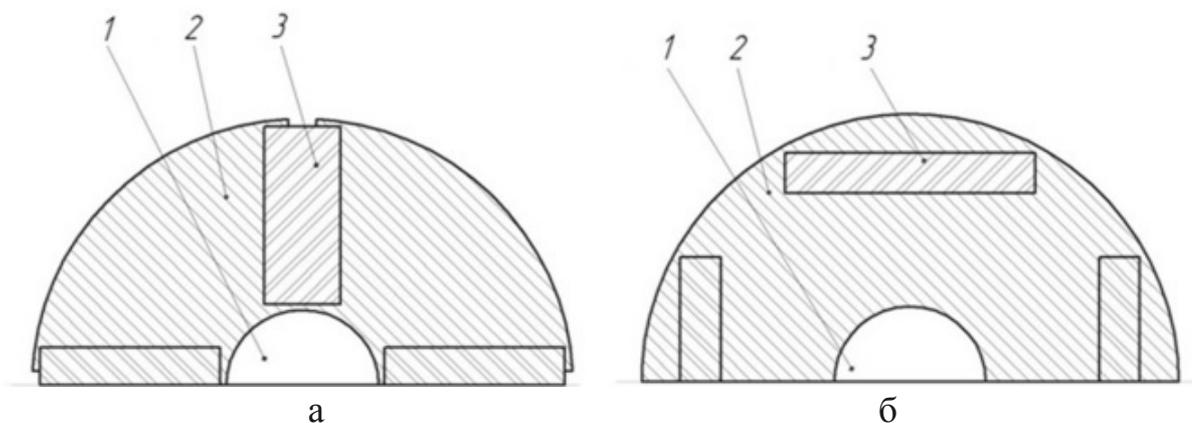


Рисунок 2.7 - Индукторы с тангенциально (а) и радиально (б) намагниченными инкорпорированными ПМ (1 - немагнитный вал, 2 – сердечник, 3 - постоянные магниты)

Можно создать полюс из нескольких магнитов, размещенных под разными углами. В этом случае результирующий поток одного полюса создаётся суммарным потоком этих магнитов.

Такая конструкция не требует поверхностного бандажа для крепления ПМ на роторе, следовательно, допускает большие окружные скорости. Инкорпорированные ПМ отделены от зазора магнитомягким материалом сердечника, меньше подвержены воздействию полей реакции якоря и риску частичного или полного размагничивания при перегрузках. ПМ имеют простую призматическую форму, что облегчает процесс их начального намагничивания и контроля обеспечения свойств по объему.

К недостаткам можно отнести повышенное рассеяние магнитного потока в мостиках над магнитами, что частично нивелируется выполнением мостиков малой высоты (ограничение по прочности сердечника). В этом случае при работе ИСГ эти участки магнитной цепи сильно насыщаются и коэффициент рассеяния потока уменьшается. Удаленное от зазора расположение ПМ предполагает меньшую на 15-20% величину индукции в зазоре при том же объеме магнитов по сравнению с индукторами, где ПМ монтируются на поверхности сердечника. Внешняя характеристика в режиме генератора у такого ИСГ будет мягкой из-за более высокого индуктивного сопротивления обмотки якоря.

Проведенный сравнительный анализ ПМ из различных материалов и конструкций индукторов на их основе показал, что наиболее целесообразными в случае ИСГ являются магнитные системы с РЗМ (NdFeB, SmCo) в виде сегментов, закрепленных на призматическом магнитопроводе ротора, где магниты удерживаются на поверхности индуктора бандажом из немагнитного материала.

#### **2.3.4 Схемы подключения якорных обмоток ИСГ к преобразователю**

Специфика построения схемы обмотки якоря ИСГ определяется двигательным режимом работы, когда она питается переменным током от электронного коммутатора. Исследование ряда возможных схем соединения

обмоток СМПМ позволяет предложить их классификацию, основанную на следующих положениях:

- по способу соединения секций обмотки;
- по числу секций, образующих обмотку;
- по способу питания секций, характеризующий возможность изменения направления тока в каждой из них.

По способу соединения обмотки СМПМ распределяются на: замкнутые, лучевые разомкнутые, параллельные и последовательные [75].

*Замкнутыми* называются обмотки, состоящие из секций, образующих замкнутый контур в виде многоугольника (треугольника или четырехугольника), вершины которого подсоединены к схеме коммутатора. Цепь тока, проходящая по такой обмотке, подключенной к источнику питания, состоит из двух параллельных ветвей.

*Лучевыми* являются обмотки, состоящие из отдельных секций, имеющих одну общую точку, причем оси секций образуют трехлучевую или четырехлучевую звезду. Лучевые обмотки могут выполняться с выводом или без вывода общей точки.

*Параллельные* — это обмотки, состоящие из секций, параллельно подключенных через коммутатор к источнику питания. При этом число секций, имеющих общую точку должно быть не больше двух.

*Последовательными* называются обмотки, секции которых соединены через коммутатор последовательно, причем число секций, имеющих общую точку не должно превышать двух.

По числу секций обмотки подразделяются на одно-, двух-, трех- и четырехсекционные. Следует отметить, что тип соединения накладывает определенные ограничения на количество секций в обмотке. В частности, замкнутые и лучевые обмотки должны иметь не менее трех секций, последовательные – не менее двух, параллельные подобных ограничений не имеют.

По способу питания секций обмотки разделяются на два типа:

- 1) реверсивное (двухполупериодное) питание, в этом случае ток в каждой секции в процессе коммутации изменяет свое направление;
- 2) нереверсивное (однополупериодное) питание, при котором ток в каждой секции может протекать лишь в одном направлении.

Реверсивное питание секций предполагает применение более сложной схемы коммутатора и лучшее использование меди обмотки. Нереверсивное питание значительно упрощает схему коммутатора, однако ухудшает использование обмоточного провода.

В классе замкнутых обмоток целесообразно построение схем только с реверсивным питанием, тогда как в остальных классах возможны оба варианта питания. Лучевые обмотки с нереверсивным питанием, как правило, имеют вывод общей точки, подсоединенный к одному из полюсов источника питания. Исключением является лучевые четырехсекционные соединения с нереверсивным питанием, где общая точка не выведена.

Каждая из описанных выше схем соединения обмоток якоря характеризуется степенью использования обмоточного материала. Наибольший практический интерес представляют следующие типы обмоток (в порядке уменьшения коэффициента использования):

- 1) Лучевые трехсекционные обмотки с реверсивным питанием (рисунок 2.8, б) имеют коммутатор, состоящий из 6 силовых ключей. Двигатель с обмоткой этого типа обладает КПД приблизительно одинаковым с идеализированным коллекторным ДПТ, у которого единственным видом потерь являются электрические потери в обмотке якоря. Применение такой обмотки рекомендуется в случае повышенных требований к энергетическим характеристикам стартера, а также в случаях, когда стоимость схемы коммутатора не имеет определяющего значения.

- 2) Замкнутые трехсекционные обмотки с реверсивным питанием (треугольник) имеют характеристики, аналогичные характеристикам лучевых обмоток, если предприняты специальные меры по подавлению гармонических

составляющих, вызывающих циркуляцию токов по замкнутому контуру, образованному секциями. Области применения обмотки те же, что и для предыдущего случая, однако в реальных условиях она обладает несколько худшими энергетическими показателями из-за асимметрии кривой индукции и невозможности полностью уравнивать ЭДС параллельных ветвей.

3) Лучевые трехсекционные обмотки с нереверсивным питанием (рисунок 2.8, а) имеют простейший коммутатор, состоящий из трех силовых ключей. Область применения этих обмоток – двигатели малой мощности (до 100 Вт), к которым не предъявляется жестких требований по КПД, а основными требованиями являются максимальные простота и малые габариты системы формирования напряжения, а также ее относительно низкая стоимость.

4) Лучевые трехсекционные обмотки с нереверсивным питанием, с углом коммутации датчика положения ротора  $\beta=\pi/2$ , обладают теми же характеристиками, что и трехсекционные замкнутые обмотки с реверсивным питанием, однако в отличие от последних имеют несколько больший уровень пульсаций момента из-за перекрытий, приводящих к одновременной работе двух секций. Эта схема может применяться в случаях, когда к двигателю не предъявляются особых требований по равномерности момента за оборот, особенно на так называемой ползущей скорости вращения, равной нескольким оборотам в минуту.

5) Параллельные одно- и двухсекционные обмотки с нереверсивным питанием имеют коммутатор, соответственно с одним или двумя ключами. Двигатели с обмотками этого типа имеют «мертвые» положения ротора, если не приняты специальные меры, фиксирующие остановку ротора в определенном положении. Применение двигателей с этими обмотками ограничено случаями, когда они должны пускаться принудительно (от пускового или разгонного двигателя), либо при наличии устройства, фиксирующего определенное положение ротора по отношению к статору в момент пуска или остановки.

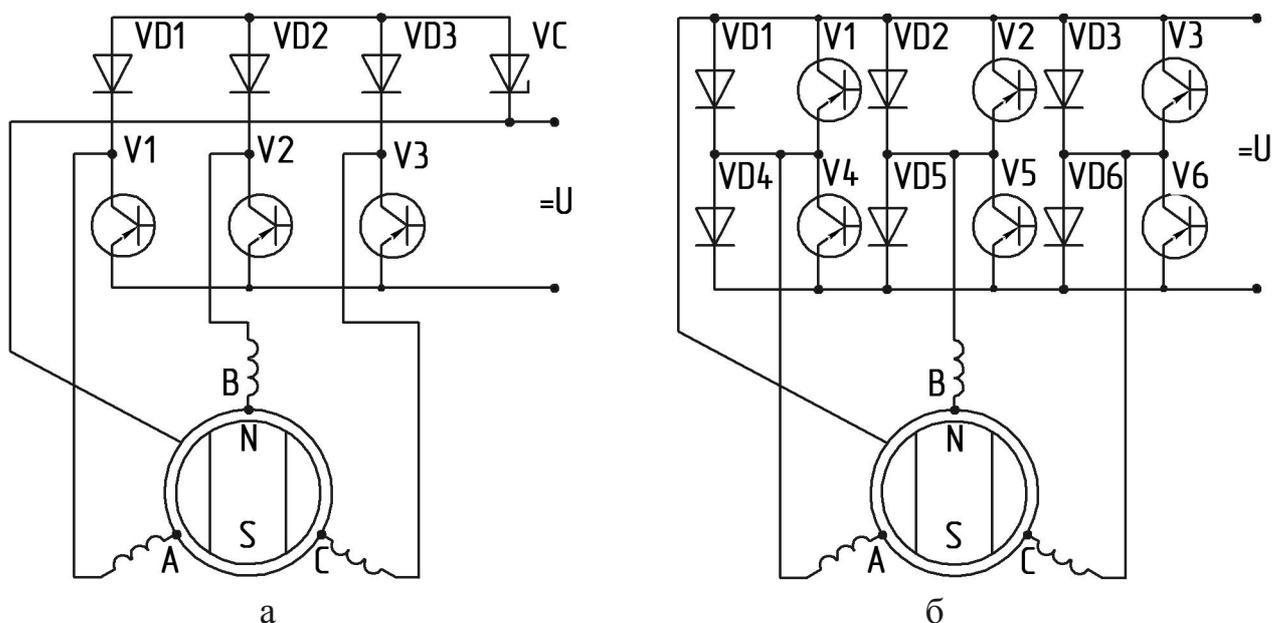


Рисунок 2.8 - Разомкнутые (лучевые) обмотки якоря ИСГ  
а) с нереверсивным и б) реверсивным питанием

На основании анализа типов и схем подключения якорных обмоток ИСГ к полупроводниковому преобразователю для диапазона мощностей от единиц до нескольких десятков кВт рекомендуется использовать разомкнутые обмотки с реверсивным питанием, как обладающие наилучшими энергетическими показателями и максимальным использованием обмоточного материала.

### Выводы по 2 разделу

1. Анализ массо-габаритных показателей ИСГ показал, что они в основном определяются конструкцией индуктора и типом материала ПМ. Критериями выбора типа индуктора являются: предельная мощность, перегрузочная способность при работе ИСГ в генераторном режиме и механическая прочность конструкции подвижной части.

2. Обзор магнитотвердых материалов для индукторов ИСГ по таким критериям как добротность, удельная магнитная энергия показал, что наиболее перспективными являются, магниты на основе редкоземельных соединений NdFeB и SmCo, несмотря на их относительно высокую стоимость.

3. Высококоэрцитивные магниты на базе РЗМ позволяют построить конструкцию индуктора ИСГ из магнитов простой призматической формы,

расположенных по внешнему периметру ротора, что позволяет максимально использовать их высокие энергетические свойства и уменьшить стоимость индуктора и ИСГ в целом.

4. Анализ схем подключения якорных обмоток к полупроводниковому преобразователю показал, что для ИСГ целесообразно использовать разомкнутые (лучевые) трехфазные (трехсекционные) обмотки с реверсивным питанием, соединенные по схеме «звезда» или «треугольник».



### 3. ЭЛЕМЕНТЫ МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ИСГ

Сложные зависимости между параметрами, формой, геометрическими размерами постоянных магнитов и свойствами магнитных материалов требуют при исследовании ИСГ применения методов математического моделирования с использованием современного программного обеспечения. Эффективным средством, оказывающим влияние на адекватность моделирования, наряду с описанием электромагнитных процессов преобразования энергии в ИСГ с помощью теории электрических цепей и получения дифференциальных уравнений с сосредоточенными параметрами, являются программные комплексы численного моделирования и расчета магнитных полей. На практике для этих целей используются пакеты программ Maxwell, ANSYS, ELCUT, FEMM.

#### 3.1 Элементы методики проектирования ИСГ

В автомобилестроении значительное развитие получили гибридные ТС, снабжаемые ИСГ. Как правило, большую часть времени ИСГ работает в генераторном режиме, когда помимо питания бортовых потребителей осуществляется накопление электрической энергии в АБ с последующим ее преобразованием в механическую.

Чем больше относительное время работы ИСГ в стартерном режиме, тем больше потребуются от него средней мощности в генераторном режиме для питания всей нагрузки сети автомобиля и зарядки АБ. Поэтому при  $\frac{t_{ог}}{t_c} < 1$  проектировать машину необходимо на генераторный режим с последующей проверкой характеристик двигательного режима.

Аналогичный подход справедлив и к использованию ИСГ в СГУ, где большую часть времени ИСГ работает в генераторном режиме, осуществляя питание различных систем электроники и электроприводов бронетанковой техники. Малые временные промежутки активной работы ИСГ посвящены запуску маломощного дизеля ДГУ.

### 3.1.1 Специфические вопросы проектирования генераторного режима ИСГ

Важнейшими этапами проектирования генераторного режима ИСГ на базе СМПМ являются:

- выбор схемы выпрямления;
- расчет фазных токов и напряжений;
- нахождение расчетной мощности генератора;
- выбор электромагнитных нагрузок и определение основных размеров; проектирование обмотки якоря;
- учет реакции якоря;
- расчет активных и индуктивных параметров;
- определение характеристик посредством построения векторных диаграмм напряжений и расчет потерь и КПД.

При работе ИСГ в генераторном режиме соединение обмотки якоря 3-х фазной СМПМ с нагрузкой осуществляется через 3-х фазный 2-х полупериодный выпрямитель и стабилизатор напряжения.

Расчетная мощность генератора определяется формулой [10]:

$$P' = \kappa_E \kappa_{II} P_{\sim} = \kappa_E \kappa_{II} \kappa_{u\phi} \kappa_i P_d = \kappa_E \kappa_{II} U_d I_d \kappa_i \kappa_{u\phi} \quad (3.1)$$

где  $P_{\sim} = m U_{\phi} I_{\phi}$  – мощность на стороне переменного тока;

$P_d = U_d I_d$  – мощность на стороне постоянного тока (обычно задается в ТЗ);

$\kappa_E = \frac{E_i}{U_{\phi n}}$  – отношение расчетной ЭДС к номинальному напряжению;

$\kappa_{II}$  – коэффициент потерь от высших гармоник магнитного поля;

$U_d$  – среднее значение выпрямленного напряжения;

$I_d$  – среднее значение выпрямленного тока;

$\kappa_i = \frac{I_{\phi}}{I_d}$ ,  $\kappa_{u\phi} = \frac{U_{\phi}}{U_d}$  – коэффициенты выпрямления по току и напряжению.

Основные размеры вентильных генераторов: диаметр расточки  $D$  и длина зазора  $l_i$  определяются с помощью известных формул:

$$D = \sqrt[3]{\frac{6,1 \times 10^6 P'}{\alpha_i \kappa_B \kappa_o AB_\delta n \lambda_i}}, \quad (3.2)$$

$$l_i = \lambda_i D.$$

Важное значение имеет выбор электромагнитных нагрузок  $A$  и  $B_\delta$  и соотношения между ними. Применительно к СМПМ произведение  $(AB_\delta)$  зависит от магнитных свойств постоянных магнитов, геометрических соотношений в роторе, типа магнитной системы. Выражение для произведения  $(AB_\delta)$  для СМПМ может быть получено, если приравнять выражения для расчетных мощностей генераторов с электромагнитным и магнитоэлектрическим возбуждением [11]:

$$\frac{D^2 l_i \alpha_i \kappa_B \kappa_o AB_\delta n}{6,1 \times 10^6 \kappa_E} = \frac{4 \kappa_B B_{M0} H_{м.к.з} V_M f \times 10^{-6}}{1,8 \alpha_1 \sigma_0 \kappa_d (1 + \sin \varphi)}, \quad (3.3)$$

где  $B_{M0}$ ,  $H_{м.к.з}$  – индукция в нейтральном сечении магнита в режиме холостого хода и напряженность поля в магните при установившемся коротком замыкании соответственно, произведение  $B_{M0} \cdot H_{м.к.з}$  приблизительно пропорционально удельной магнитной энергии магнита;  $f = \frac{pn}{60}$  – частота тока;  $\alpha_1$  – коэффициент, равный отношению падения магнитного напряжения в магнитопроводе к МДС реакции якоря по продольной оси  $F_{ad}$ ;  $\sigma_0$  – коэффициент рассеяния магнитного потока в режиме холостого хода;  $\kappa_d$  – коэффициент приведения МДС реакции якоря к МДС возбуждения;  $\cos \varphi$  – коэффициент мощности нагрузки.

Из уравнения (3.3) получено выражение для определения произведения  $(AB_\delta)$ :

$$AB_\delta = \frac{6,1 \pi \cdot \kappa_E B_{M0} H_{м.к.з} V_M f \times 10^{-6}}{60 \cdot 1,8 \alpha_1 \sigma_0 \alpha_i \kappa_o \kappa_d (1 + \sin \varphi)} \quad (3.4)$$

Уменьшение отношения  $A/B_\delta$  приводит к снижению пульсаций выпрямленного напряжения [10]. Поэтому для вентильных генераторов должно выполняться условие:

$$\frac{A}{B_\delta} \leq (0,03 \div 0,05) \times 10^4 \text{ (А/см/Тл)} \quad (3.5)$$

Для индукторов генераторов с призматическими магнитами можно найти связь между индукцией в зазоре  $B_\delta$  и линейной нагрузкой  $A$  с одной стороны, и

размерами, и свойствами магнита с другой стороны, (в предположении, что максимальное размагничивание магнита имеет место при установившемся к.з. и расчетная длина якоря  $l_i$  равна длине магнита  $L_M$ ) [99]:

$$A = \frac{4pH_{м.к.з}h_M}{0,9\pi\alpha_1\kappa_d\kappa_0\kappa D} \quad (3.6)$$

$$B_\delta = \frac{2b_M p B_{M0} e_\delta}{\alpha_p \pi \sigma_0 D} \quad (3.7)$$

где  $e_\delta = \frac{E_H}{E_0}$  – отношение ЭДС в номинальном режиме  $E_H$  к ЭДС холостого хода  $E_0$ .

Соотношения (3.6), (3.7) позволяют записать:

$$\frac{B_\delta}{A} = \frac{0,9\alpha_1\kappa_d\kappa_0 e_\delta \kappa}{2\sigma\alpha_p} \frac{b_M}{h_M} \frac{B_{M0}}{H_{м.к.з}} \quad (3.8)$$

Из последнего выражения видно, что уменьшение отношения  $\frac{B_{M0}}{H_{м.к.з}}$  (и следовательно уменьшение  $\frac{B_r}{H_c}$ ) вызывает увеличение отношения  $\frac{b_M}{h_M}$ , т.е.

магниты становятся широкими и низкими, что упрощает их фиксацию на роторе. В результате масса магнитов сосредотачивается на периферии индуктора.

Применение в конструкции СМПМ РЗМ марок NdFeB, SmCo позволяет создавать сильные магнитные поля во внешнем пространстве, что положительным образом сказывается на жесткости внешних характеристик ИСГ в генераторном режиме работы.

### 3.1.2 Диаграмма магнита. Проверка положения рабочей точки

Известно, что зависимостью вектора намагничивания высококоэрцитивных постоянных магнитов от напряженности внешнего размагничивающего поля можно пренебречь, что позволяет использовать аналитические методы расчета магнитной цепи и характеристик генератора. Кривая размагничивания постоянного магнита на основе РЗМ имеет линейный характер, а зависимость

индукции от напряженности магнитного поля для кривой размагничивания описывается уравнением [46]:

$$B = \left( 1 - \frac{H}{H_{CB}} \right) B_r \quad (3.9)$$

Для определения рабочей точки на диаграмме постоянного магнита в режиме холостого хода необходимо записать уравнение связи индукции в ПМ  $B_{M0}$  и напряженности во внешней цепи. Полагая магнитную цепь линейной, выражение для МДС на пару полюсов, приложенной к ПМ имеет вид:

$$F = 2\kappa_F \kappa_z \frac{B_{M0}}{\mu_0} \delta \quad (3.10)$$

где  $\kappa_F = \frac{(F_\delta + F_j)}{F_\delta}$  – коэффициент насыщения магнитной цепи ИСГ;  $F_\delta$  – падение МДС в воздушном зазоре;  $F_j$  – падение напряжения в стальных участках магнитопровода;  $B_{M0}$  – максимальное значение индукции на поверхности постоянного магнита;  $\kappa_z$  – коэффициент, учитывающий изменение ориентации вектора магнитной индукции по длине воздушного зазора. С учетом соотношения:

$$B_M = \frac{B}{\sigma}, \quad (3.11)$$

получим:

$$B_{M0} = \frac{1}{1 + \left( \frac{2\delta}{L_M} \right) \kappa_F \kappa_z \left( \frac{1}{\mu_0} \right) \left( \frac{B_r}{\sigma H_{CB}} \right)} \frac{B_r}{\sigma} \quad (3.12)$$

где  $\sigma$  – коэффициент, учитывающий рассеивание магнитного потока ПМ.

Расчет значения магнитного потока на поверхности ПМ, в нейтральном сечении и потока рассеяния может осуществляться графоаналитическим способом по рабочей диаграмме магнита.

При нагрузке магнитный поток в воздушном зазоре зависит также и от МДС реакции якоря:

$$\begin{cases} F_{ad} = 0,9m \left( \frac{w_\phi \kappa_{o1}}{p} \right) I_{\phi n} \kappa_{ad} \sin \psi \\ F_{aq} = 0,9m \left( \frac{w_\phi \kappa_{o1}}{p} \right) I_{\phi n} \kappa_{aq} \cos \psi \end{cases}, \quad (3.13)$$

где  $F_{ad}$ ,  $F_{aq}$  – МДС реакции якоря по продольной и поперечной осям;  $m$  – число фаз обмотки якоря;  $w_\phi$  – число витков в фазе;  $I_{\phi n}$  – действующее значение тока якоря;  $\kappa_{ad}$ ,  $\kappa_{aq}$  – коэффициенты приведения МДС реакции якоря по продольной и поперечной осям к МДС постоянного магнита соответственно;  $\psi$  – фазовый угол сдвига между векторами ЭДС холостого хода и тока.

При наличии тока в обмотке якоря и МДС якоря по продольной оси результирующая МДС:

$$\sum F = 2\kappa_F \kappa_z \frac{B_{m0}}{\mu_0} \delta + \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{w_\phi \kappa_{o1}}{p} I_{\phi n} \kappa_{ad} \sin \psi \quad (3.14)$$

Рабочая диаграмма высококоэрцитивного ПМ приведена на рисунке 3.1.

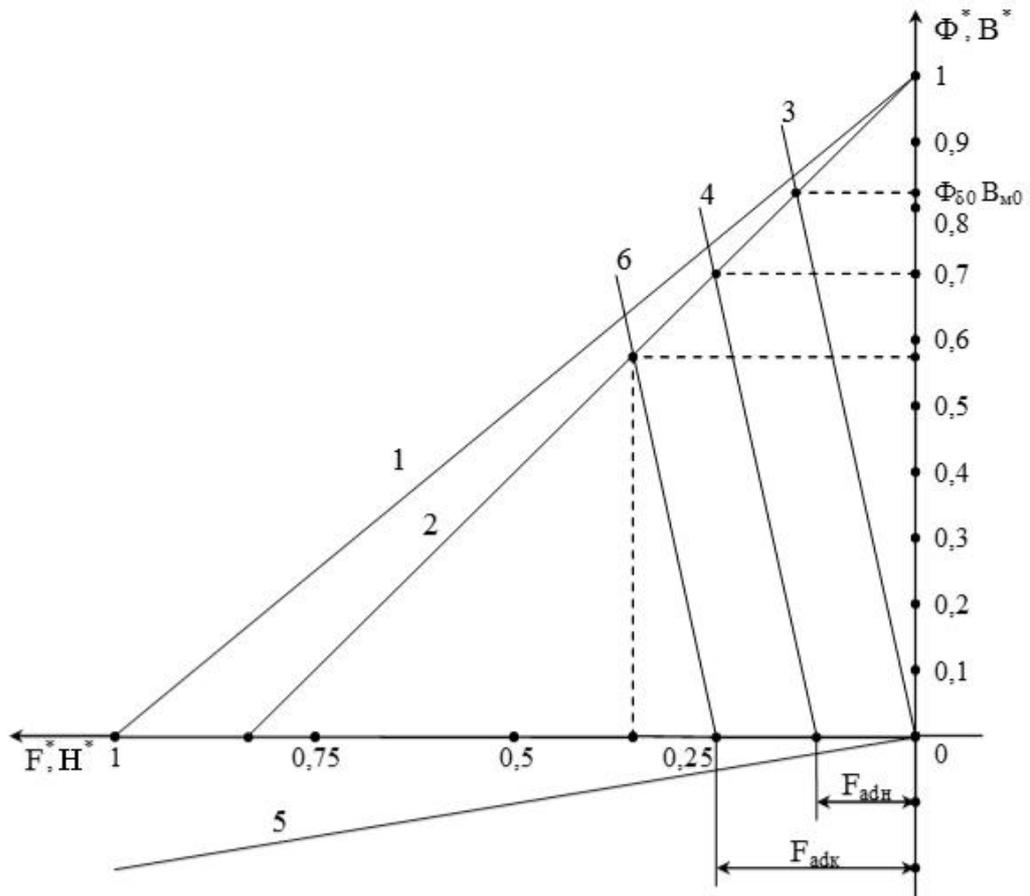


Рисунок 3.1 - Рабочая диаграмма высококоэрцитивного постоянного магнита

На рисунке 3.1:

- 1 – кривая размагничивания ПМ;
- 2 – зависимость магнитного потока на поверхности магнита от МДС;
- 3 – ненасыщенная характеристика холостого хода  $\Phi^* = f(\sum F^*)$ ;
- 4 – зависимость  $\Phi^* = f(\sum F^*)$  с учетом дополнительной МДС якоря по продольной оси  $F_{adh}^*$ ;
- 5 – зависимость потока рассеяния от намагничивающей силы  $\Phi_{\sigma}^* = f(F^*)$ ;
- 6 – зависимость  $\Phi^* = f(\sum F^*)$  с учетом дополнительной МДС якоря по продольной оси при к.з.  $F_{adk}^*$ .

Относительные и базисные параметры:

$$\Phi^* = \frac{\Phi_{\delta}}{\Phi_{\delta_{\text{баз}}}}; F^* = \frac{F}{F_{\text{баз}}}; \Phi_{\text{баз}} = S_m B_r = b_M l_M B_r; F_{\text{баз}} = h_m H_{\text{сВ}}; B^* = \frac{B_{\delta}}{B_{\delta_{\text{баз}}}}; B_{\text{баз}} = B_r$$

### 3.2 Моделирование, расчет и исследование магнитного поля ИСГ

Форма и геометрические размеры ПМ, свойства магнитных материалов, параметры внешней магнитной цепи и сложные зависимости между ними являются основанием для того, что большое количество моделей СМПМ ориентировано на реализацию с помощью численных методов, получивших в последнее время широкое применение из-за расширения возможностей современного программного обеспечения и появления быстродействующих персональных компьютеров.

Использование лицензионного программного обеспечения ELCUT, базирующегося на численном моделировании магнитного поля, позволило осуществить компьютерное моделирование ИСГ. Отличительной особенностью ELCUT является высокое быстродействие и решение с высокой степенью точности задач, характерных для данных пакетов программ по конечноэлементному анализу магнитных полей [30,31,40,90].

Расчет магнитного поля ИСГ выполнялся в несколько этапов.

Первый этап, заключается в следующем:

- 1) строится геометрическая модель ИСГ;
- 2) в этой модели ИСГ создаются области с однородными свойствами (блоки и ребра);
- 3) для каждого из блоков задается физическое свойство;
- 4) на ребрах задаются необходимые данные по граничным условиям.

Второй этап, включает в себя:

- 1) создание новой полевой задачи;
- 2) выбирается тип и параметры задачи;
- 3) вводятся данные о материалах и формируется сетка конечных элементов;
- 4) решается полевая задача;
- 5) вычисляются интегральные параметры и анализируются результаты.

В рассматриваемой полевой задаче магнитостатики были заданы: блоки – области ферромагнитных сердечников статора и ротора, немагнитного воздушного зазора, постоянных магнитов, и пазов с обмоткой якоря; ребра - внешняя поверхность ферромагнитного сердечника статора, т.е. поверхности северного и южного полюсов ПМ с положительным и отрицательным значением коэрцитивной силы соответственно.

При расчете полевой задачи магнитного поля ИСГ были приняты следующие основные допущения:

- магнитное поле плоскопараллельно и его распределение рассматривается в поперечном сечении магнитной системы ЭМ в координатах, жестко связанных с вращающимся ротором;
- ферромагнитный сердечник статора представляет собой среду с нелинейными изотропными свойствами;
- действительное токораспределение обмотки статора заменяется расчетным с сохранением реальной геометрической конфигурации обмотки и значением ее МДС;
- ПМ описываются заданием коэрцитивной силы, магнитной проницаемости и направления действия вектора намагничивания.



При принятых допущениях задача расчета магнитного поля в поперечном сечении ИСГ сводится к задаче нелинейной магнитостатики, а параметры поля определяются через векторный магнитный потенциал, который имеет единственную осевую составляющую. При этом подлежащее решению уравнение Пуассона для векторного магнитного потенциала имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -j + \left( \frac{\partial H_{cy}}{\partial x} - \frac{\partial H_{cx}}{\partial y} \right), \quad (3.15)$$

где  $A=A_z$ ,  $j=j_z$ ,  $\mu=\mu(H)$ ;  $j_z$  – плотность тока,  $H_{cy}$ ,  $H_{cx}$  – составляющие коэрцитивной силы  $H_c$ .

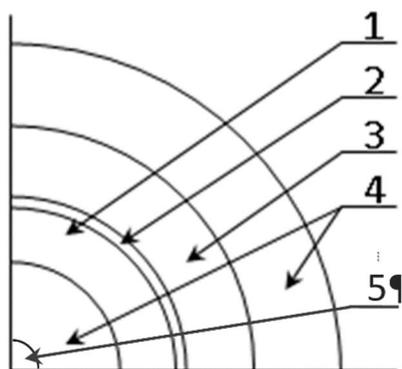
### 3.2.1 Магнитное поле ИСГ в режиме генератора

Целью расчета магнитного поля являлось определение индуктивных параметров ИСГ, коэффициентов полюсного перекрытия и формы поля для уточнения основных размеров в процессе проектирования и построения имитационных моделей при анализе электромагнитных процессов.

В процессе расчета магнитного поля ИСГ в генераторном режиме работы с помощью конечно-элементного программного комплекса ELCUT решались следующие задачи:

- расчет магнитного поля в режиме холостого хода;
- расчет магнитного поля продольной реакции якоря при номинальном токе в обмотках статора ИСГ;
- расчет магнитного поля поперечной реакции якоря при номинальном токе в обмотках статора.

На начальном этапе была определена расчетная геометрическая модель магнитной системы в поперечном сечении ИСГ, фрагмент которой представлен на рисунке 3.2.



- 1 – область постоянного магнита,
- 2 – область немагнитного зазора,
- 3 – зубцовая зона статора,
- 4 – область ферромагнитных сердечников ротора и статора,
- 5 – немагнитный вал.

Рисунок 3.2 - Геометрическая модель магнитной системы ИСГ

Заданы граничные условия, необходимые для решения уравнения (3.15), отталкиваясь от физических условий существования магнитного поля на внешних границах расчетной области, которые относительно векторного магнитного потенциала  $A$  выражаются следующим образом:

- при расчете поля векторный магнитный потенциал на внешней поверхности ферромагнитного сердечника статора равен нулю ( $A=0$ );
- при расчете полей возбуждения и продольной реакции якоря векторный потенциал на продольной оси  $d$   $A=0$ , на поперечной оси  $q$  производная от векторного потенциала равна нулю  $\left(\frac{\partial A}{\partial n} = 0\right)$ ;
- при расчете поля поперечной реакции якоря производная от векторного потенциала на оси  $d$  равна нулю  $\left(\frac{\partial A}{\partial n} = 0\right)$ , на оси  $q$  вектор  $A=0$ .

В качестве объекта моделирования был принят вариант ИСГ вспомогательной силовой установки, предназначенной для использования в автономном режиме на специальных ТС. Исходные данные для расчета магнитного поля, приведенные в таблице 3.1, были получены в результате предварительных расчетов по представленному выше алгоритму. Уточненные окончательные параметры и характеристики проектируемого ИСГ, даны в разделе 3.3 (таблица 3.5).

Таблица 3.1 - Исходные данные для расчета магнитного поля ИСГ

Наименование	Обозначение	Ед. измерения	Величина
Число фаз	$m$	-	3
Фазное напряжение (действ. знач.)	$U_{\phi 1}$	В	27 - 63
Фазный ток (действ. знач.)	$I_{\phi}$	А	300
Частота вращения	$n$	мин <sup>-1</sup>	1500÷3450
Число полюсов	$2p$	-	12
Наружный диаметр статора	$D_a$	мм	290
Диаметр расточки статора	$D_i$	мм	174
Число зубцов статора	$Z_{10}$	-	72
Тип и размеры постоянных магнитов	NdFeB, $h_m \times b_m \times l_m$	мм	8 × 40 × 55
Величина воздушного зазора	$\delta$	мм	1
Коэрцитивная сила постоянных магнитов	$H_{св}$	кА/м	1000
Марка стали статора и ротора	-	-	2412

Для произвольно-заданного момента времени токораспределение 3-х фазной двухслойной обмотки якоря определяется мгновенными значениями токов в пазах статора. При этом расчетное выражение для плотности тока в активных проводниках, которые необходимо задать в уравнении (3.15) при моделировании поля реакции якоря, можно представить в следующем виде:

$$j_z = \frac{I_{np}(i, k)}{S_{np}},$$

где  $I_{np}(i, k)$  – мгновенные значения тока параллельной ветви в активном проводнике статора в зависимости от номера слоя ( $i$ ) и номера паза ( $k$ ) пределах моделируемого участка обмотки;  $S_{np}$  – расчетное сечение активного проводника обмотки с учетом изоляции.

Конкретные значения токов  $I_{np}(i, k)$  находятся из векторной диаграммы токов в фазных зонах, которые при шестизонной обмотке с углом фазной зоны  $\alpha_{\phi} = 60^\circ$  электрических градусов чередуются, как известно, в последовательности AZBXCУ.

Векторная диаграмма в виде симметричной шестилучевой звезды изображена на рисунке 3.3. Она соответствует моменту времени, когда ток параллельной

ветви в обоих слоях фазной зоны А максимален и равен амплитудному значению. При этом мгновенные значения токов во всех остальных фазных зонах определяются как проекции соответствующих векторов на вертикальную ось (направление вектора  $I_A$ ). Их конкретные значения в долях амплитуды тока  $I_{am}$  приведены в таблице 3.2.

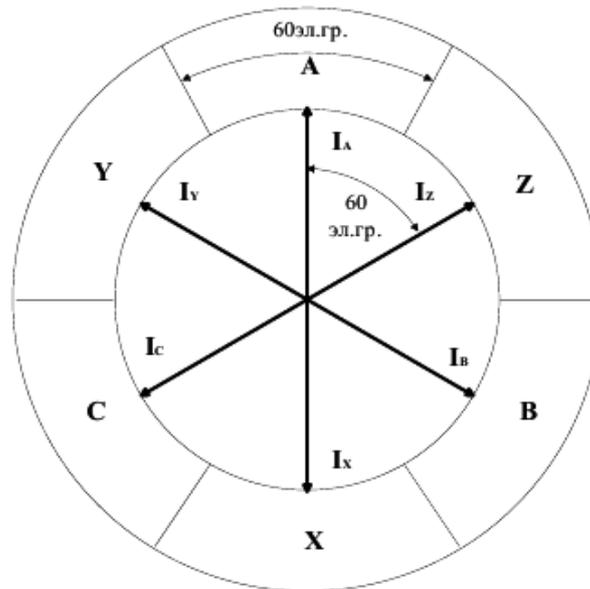


Рисунок 3.3 - Векторная диаграмма токов в слоях фазных зон трехфазной обмотки переменного тока

Таблица 3.2 - Ток параллельной ветви в фазных зонах

Фазная зона	Ток параллельной ветви в фазных зонах обмотки якоря
А	$I_A = I_{am}$
Z	$I_Z = I_{am} \cdot \cos 60^\circ = + 0,5 I_{am}$
В	$I_B = I_{am} \cdot \cos 120^\circ = - 0,5 I_{am}$
Х	$I_X = I_{am} \cdot \cos 180^\circ = - I_{am}$
С	$I_C = I_{am} \cdot \cos 240^\circ = - 0,5 I_{am}$
Y	$I_Y = I_{am} \cdot \cos 300^\circ = + 0,5 I_{am}$

На рисунках 3.4 - 3.9 приведены результаты моделирования магнитных полей ИСГ, полученные с помощью программы ELCUT: на рисунке 3.4 – картина магнитного поля при холостом ходе; на рисунке 3.5 – распределение радиальной составляющей магнитной индукции поля холостого хода на середине воздушного зазора; на рисунке 3.6 – картина магнитного поля продольной реакции якоря; на

рисунке 3.7 – распределение радиальной составляющей магнитной индукции поля продольной реакции якоря в воздушном зазоре; на рисунке 3.8. – картина магнитного поля поперечной реакции якоря; на рисунке 3.9. – распределение радиальной составляющей магнитной индукции поля поперечной реакции якоря в воздушном зазоре.

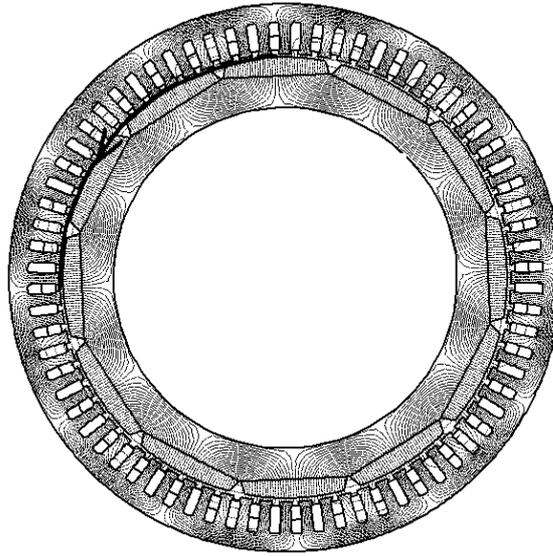


Рисунок 3.4 - Картина магнитного поля в режиме холостого хода

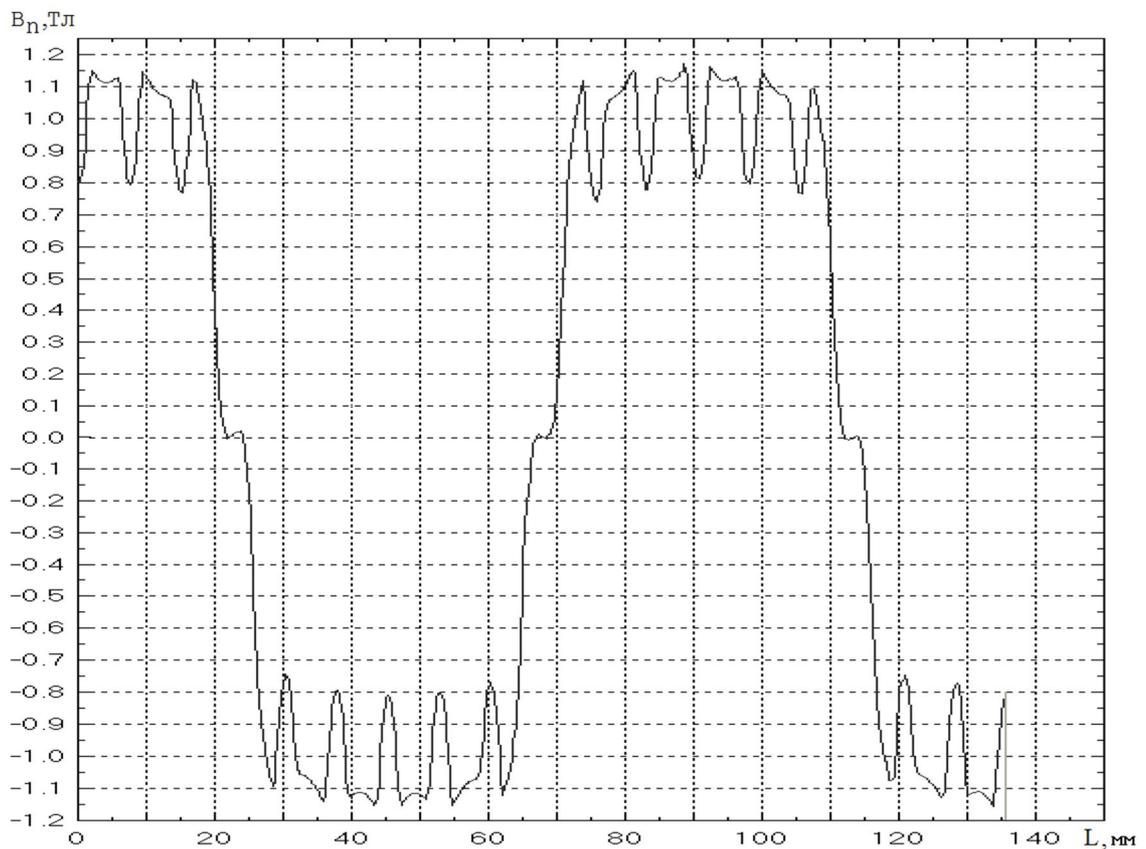


Рисунок 3.5 - Распределение радиальной составляющей магнитной индукции поля при холостом ходе

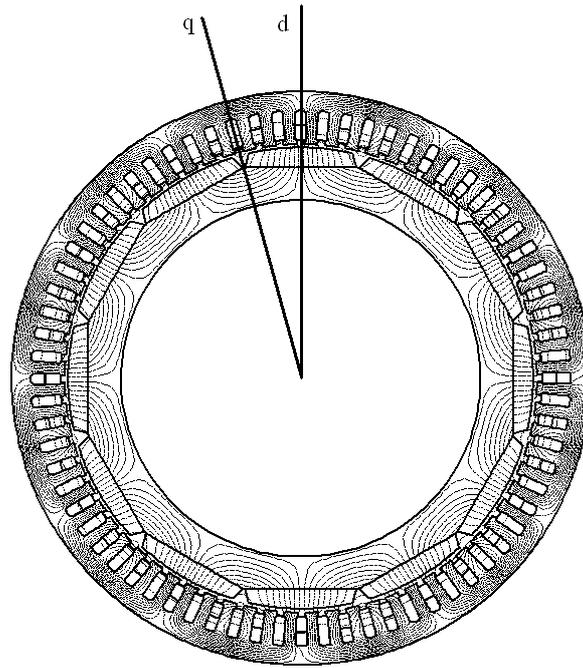


Рисунок 3.6 - Картина магнитного поля продольной реакции якоря

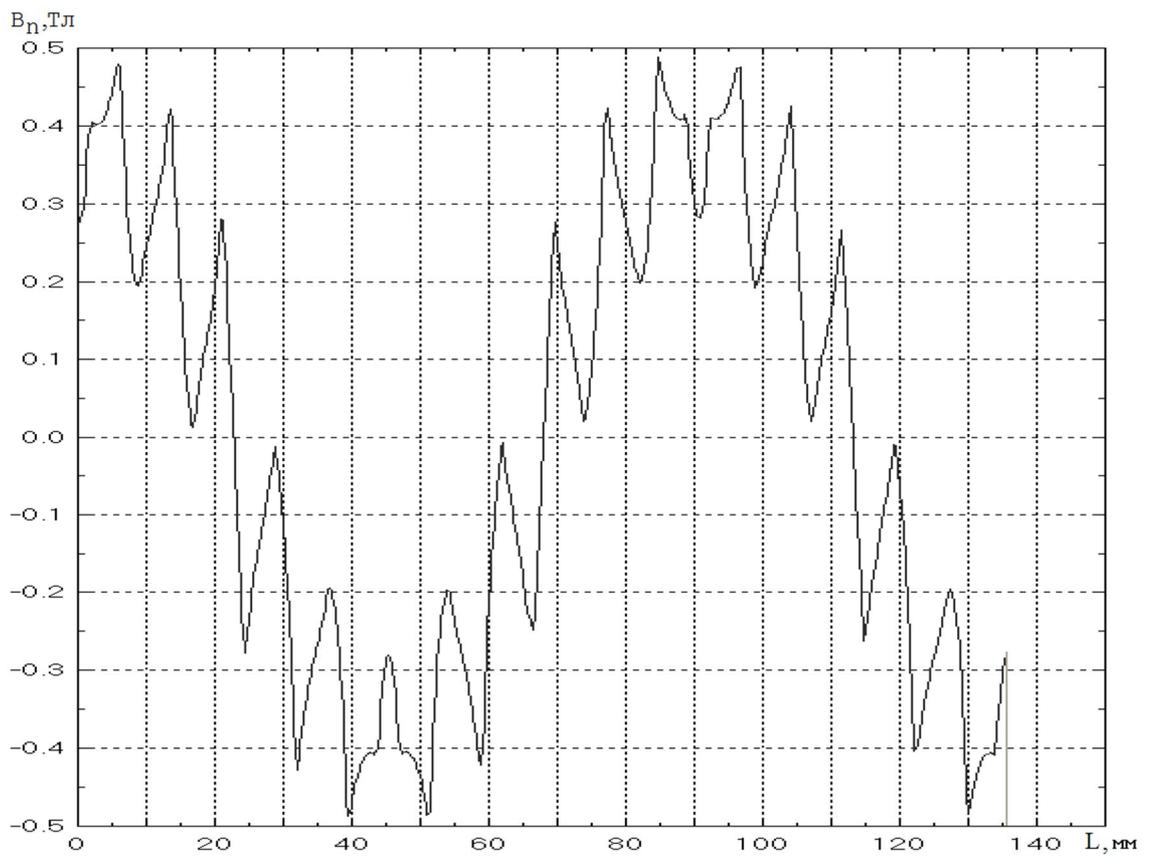


Рисунок 3.7 - Распределение радиальной составляющей магнитной индукции поля продольной реакции якоря в воздушном зазоре

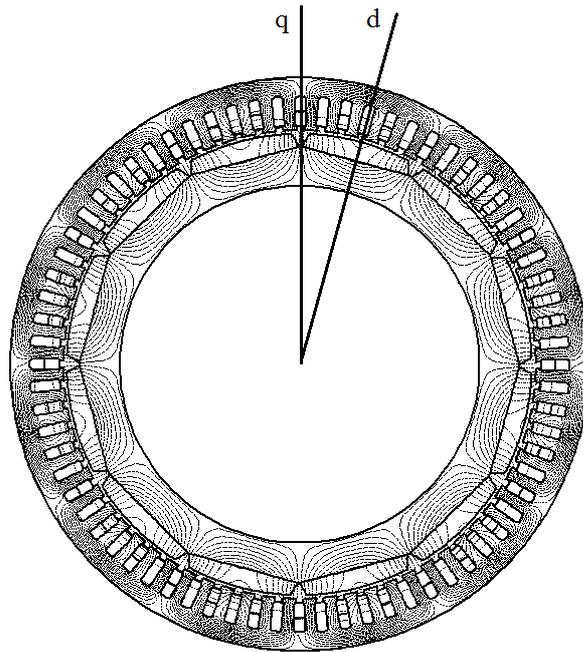


Рисунок 3.8 - Картина магнитного поля поперечной реакции якоря

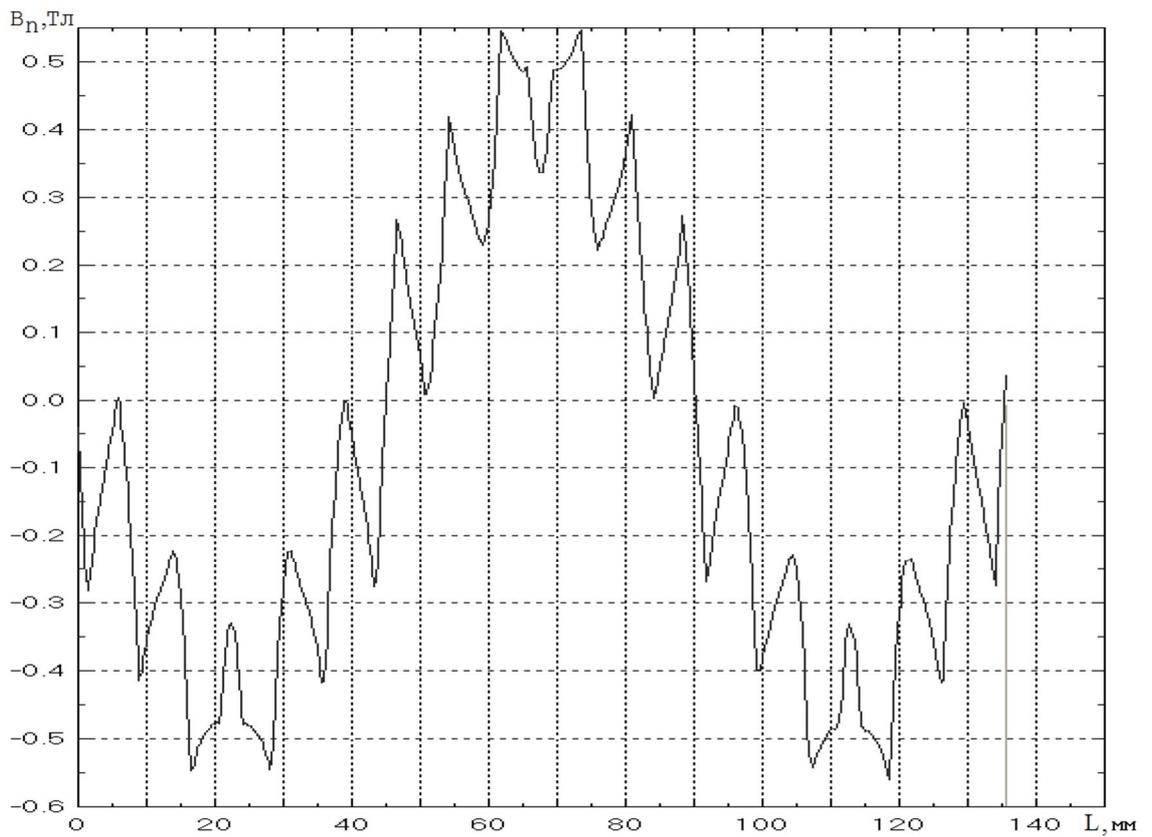


Рисунок 3.9 - Распределение радиальной составляющей магнитной индукции поля поперечной реакции якоря в воздушном зазоре

По результатам конечно-элементного моделирования полей возбуждения и реакции якоря были определены собственные индуктивности реакции якоря по продольной  $L_{ad}$  и поперечной  $L_{aq}$  осям, взаимная индуктивность между индуктором и обмоткой якоря (статора)  $M_{af}$ .

### 3.2.2 Магнитное поле ИСГ в режиме стартера

Метод расчета двигательного режима СМПМ, основанный на решении дифференциальных уравнений, описывающих процессы электромеханического преобразования энергии [108,110], не позволяет учесть большое число факторов, влияющих на выходные характеристики ИСГ. Для получения приемлемых по точности результатов в расчетах необходимо учесть зависимости индуктивностей, взаимоиндуктивностей фаз от угла поворота ротора, влияние формы и размеров постоянных магнитов, зубчатости магнитопровода статора на кривую распределения магнитной индукции в зазоре, потери в магнитопроводе статора и в постоянных магнитах ротора. Одной из величин, характеризующих работу ИСГ в режиме стартера, является величина пускового момента  $M_{п}$  для пуска ДВС.

Основными задачами исследования магнитного поля ИСГ в режиме стартера являются:

а) определение величины пускового момента ИСГ и его изменения в рабочем диапазоне угла поворота ротора  $\theta$ ;

б) расчет и анализ кривой распределения магнитной индукции в зазоре ИСГ;

Моделирование магнитного поля в стартерном режиме ИСГ предполагает задание силы намагничивания обмотки якоря. Решение задачи происходит в два этапа:

– определение зон, занимаемых одной из фаз в соответствии с типом обмотки;

– задание токов в этих зонах (фиктивных плотностей токов, относящихся ко всей зоне, занимаемой соответствующей обмоткой), обеспечивающих



необходимую ориентацию вектора силы намагничивания обмотки якоря относительно осей  $d$  и  $q$  постоянного магнита.

На рисунке 3.10 показана конфигурация магнитной системы ИСГ, полученная автором в программе ELCUT [30,40,90]. Ротор набран из отдельных сегментов постоянных магнитов, расположенных на магнитопроводе из магнитомягкого материала. В качестве ПМ используются магниты на основе соединений NdFeB. Магнитопровод статора выполнен шихтованным из электротехнической стали.

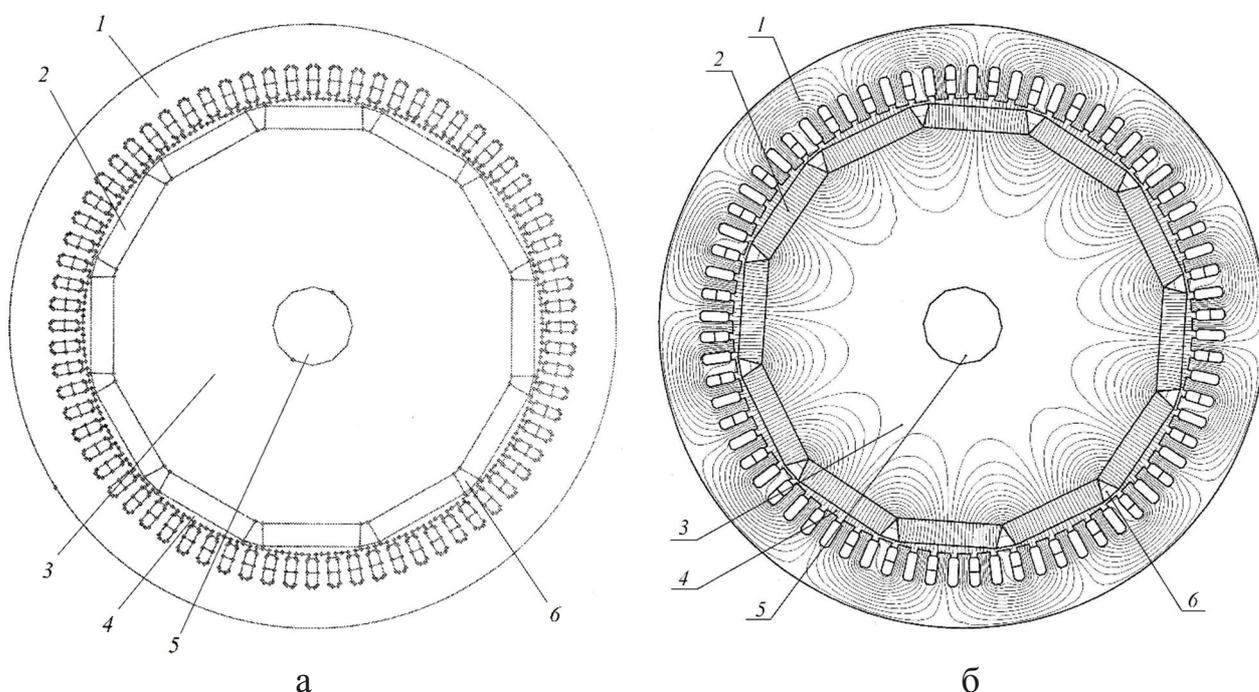


Рисунок 3.10 - Конфигурация магнитной системы ИСГ:

а) конструкция; б) картина магнитного поля

(1 – ферромагнитный сердечник статора, 2 – постоянные магниты, 3 – ферромагнитный сердечник ротора, 4 – воздушный зазор, 5 – немагнитный вал, 6 – немагнитный композитный материал)

В стартерном режиме, якорная обмотка ИСГ питается от АБ через управляемый коммутатор и в каждый момент времени в течение межкоммутационного интервала в трехфазной машине ток протекает по одной фазе в условно принятом положительном направлении, по другой – в противоположном, а третья фаза обесточена [67,95].

Таким образом в стартерном режиме направление вектора МДС статора скачкообразно изменяется от  $\pi/m$  до  $2\pi/m$  эл. рад. в течение каждого межкоммутационного интервала (изменения периода работы ИСГ). Для каждого цикла в  $360^\circ$  эл.град. осуществляется 6 переключений обмоток статора, и при этом ротор поворачивается на  $2\pi/p$  механических радиан. При скачкообразном изменении МДС статора в стартерном режиме работы ИСГ момент  $M$  по закону синуса пульсирует на протяжении межкоммутационного интервала в диапазоне изменения аргумента:  $\pi/2 \pm \pi/6$

$$M_{\max} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \pm \frac{\pi}{6}\right) \leq M \leq M_{\max}, \quad (3.16)$$

где  $M_{\max}$  – максимальный момент ИСГ, при условии, когда ось МДС статора перпендикулярна магнитной оси ротора.

Исходные данные для расчета полевой модели ИСГ в стартерном режиме приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 - Исходные данные для расчета магнитного поля стартера

Наименование	Обозначение	Ед. измерения	Величина
Число фаз	$m$	-	3
Фазный ток ИСГ в момент пуска	$I_n$	А	850
Число витков в секции	$w_e$	-	4
Число секций	$w_c$	-	6
Число витков в фазе	$w_a$	-	24
Коэрцитивная сила постоянных магнитов	$H_{св}$	кА/м	1000
Число пар полюсов	$p$	-	6
Марка стали статора и ротора	-	-	2412

Полевая модель ИСГ в стартерном режиме содержит двенадцать «меток блоков» (материалов) и три «метки ребер» - граничные условия (рисунок 3.11).

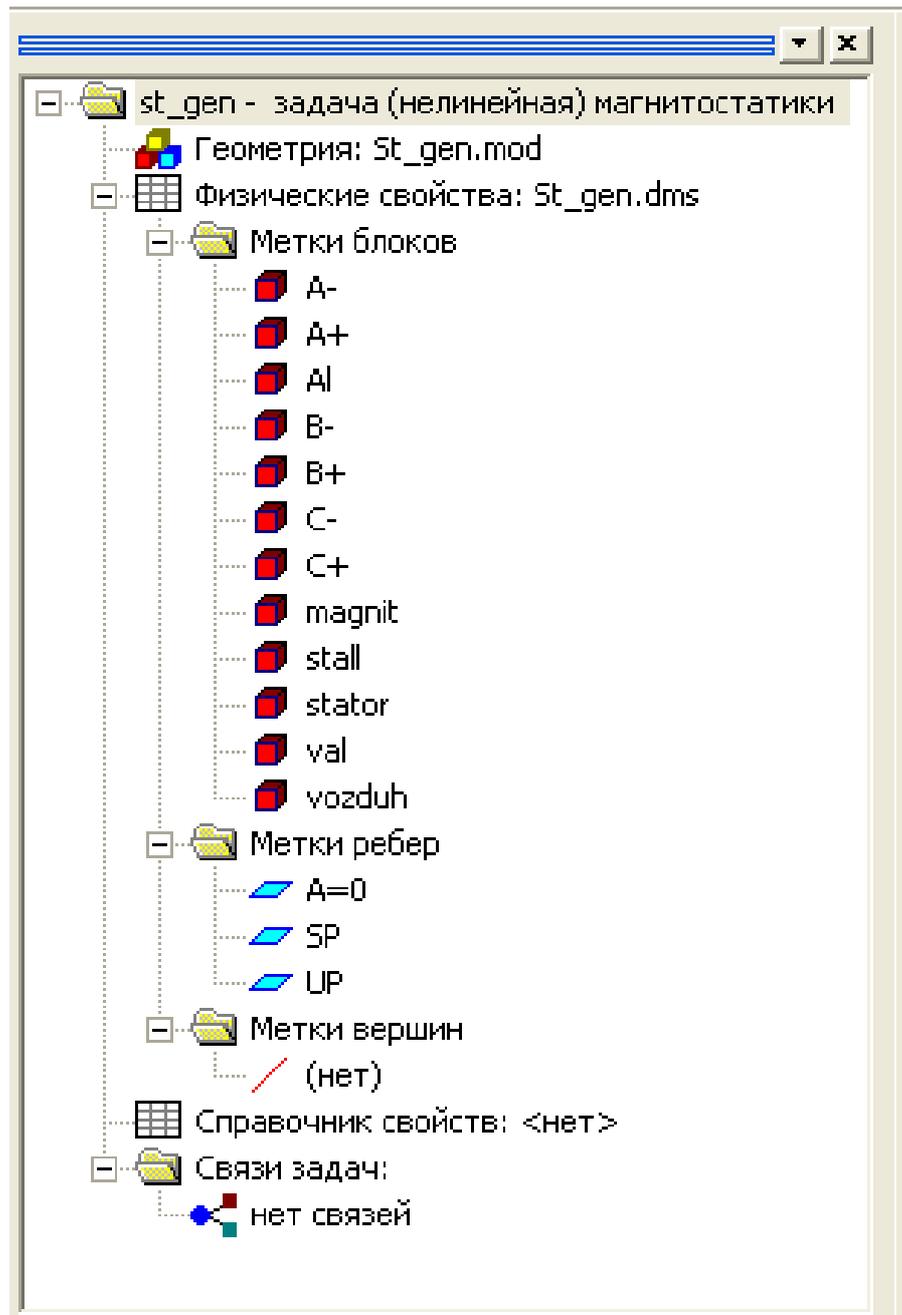


Рисунок 3.11 - Свойства задачи (стартерный режим ИСГ)

Токораспределение в секциях и расположение обмотки в пазах магнитоэлектрического ИСГ приведены в таблице 3.4.

A+, B+, C+ – токовые секции обмотки, относящиеся к фазам A, B, C с положительным направлением тока;

A-, B-, C- – токовые секции обмотки фаз A, B, C с отрицательным направлением тока.

Таблица 3.4 - Распределение тока фазных зон обмотки якоря по пазам

Номер паза	Верхняя секция	Нижняя секция	Номер паза	Верхняя секция	Нижняя секция	Номер паза	Верхняя секция	Нижняя секция
1	A+	A+	25	A+	A+	49	A+	A+
2	A+	B-	26	A+	B-	50	A+	B-
3	B-	B-	27	B-	B-	51	B-	B-
4	B-	C+	28	B-	C+	52	B-	C+
5	C+	C+	29	C+	C+	53	C+	C+
6	C+	A-	30	C+	A-	54	C+	A-
7	A-	A-	31	A-	A-	55	A-	A-
8	A-	B+	32	A-	B+	56	A-	B+
9	B+	B+	33	B+	B+	57	B+	B+
10	B+	C-	34	B+	C-	58	B+	C-
11	C-	C-	35	C-	C-	59	C-	C-
12	C-	A+	36	C-	A+	60	C-	A+
13	A+	A+	37	A+	A+	61	A+	A+
14	A+	B-	38	A+	B-	62	A+	B-
15	B-	B-	39	B-	B-	63	B-	B-
16	B-	C+	40	B-	C+	64	B-	C+
17	C+	C+	41	C+	C+	65	C+	C+
18	C+	A-	42	C+	A-	66	C+	A-
19	A-	A-	43	A-	A-	67	A-	A-
20	A-	B+	44	A-	B+	68	A-	B+
21	B+	B+	45	B+	B+	69	B+	B+
22	B+	C-	46	B+	C-	70	B+	C-
23	C-	C-	47	C-	C-	71	C-	C-
24	C-	A+	48	C-	A+	72	C-	A+

В программе ELCUT автоматически генерировалась сетка конечных элементов, содержащая 28350 узлов (рисунок 3.12). В двух фазах (А и В) был задан полный ток  $I_d$ , а в фазе С ток отсутствовал.

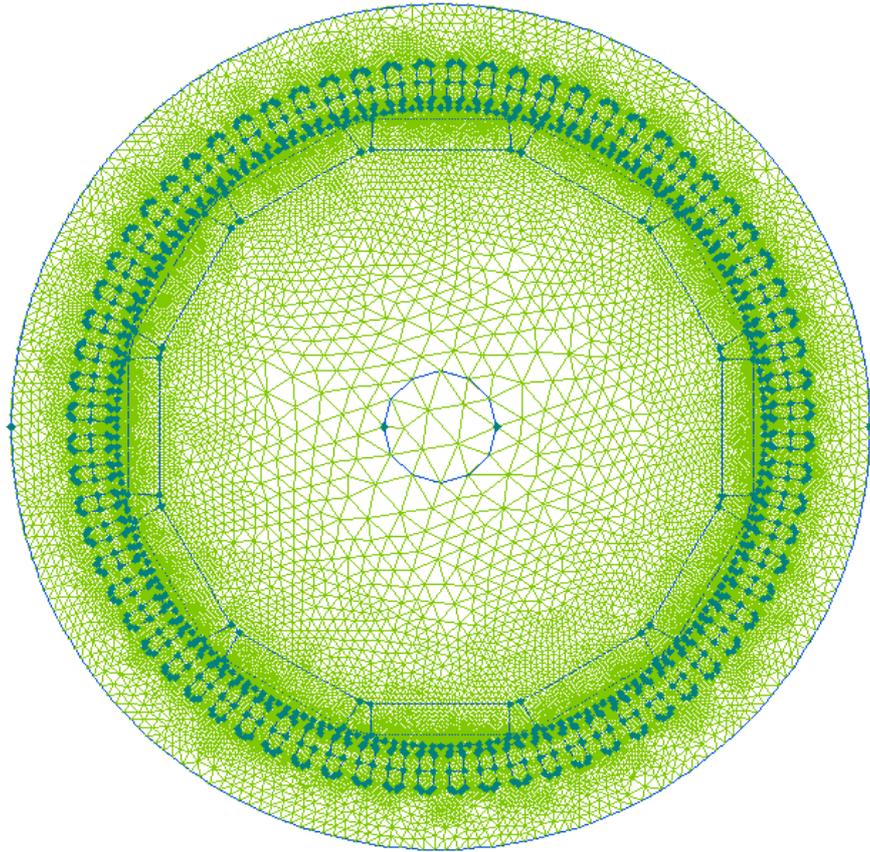


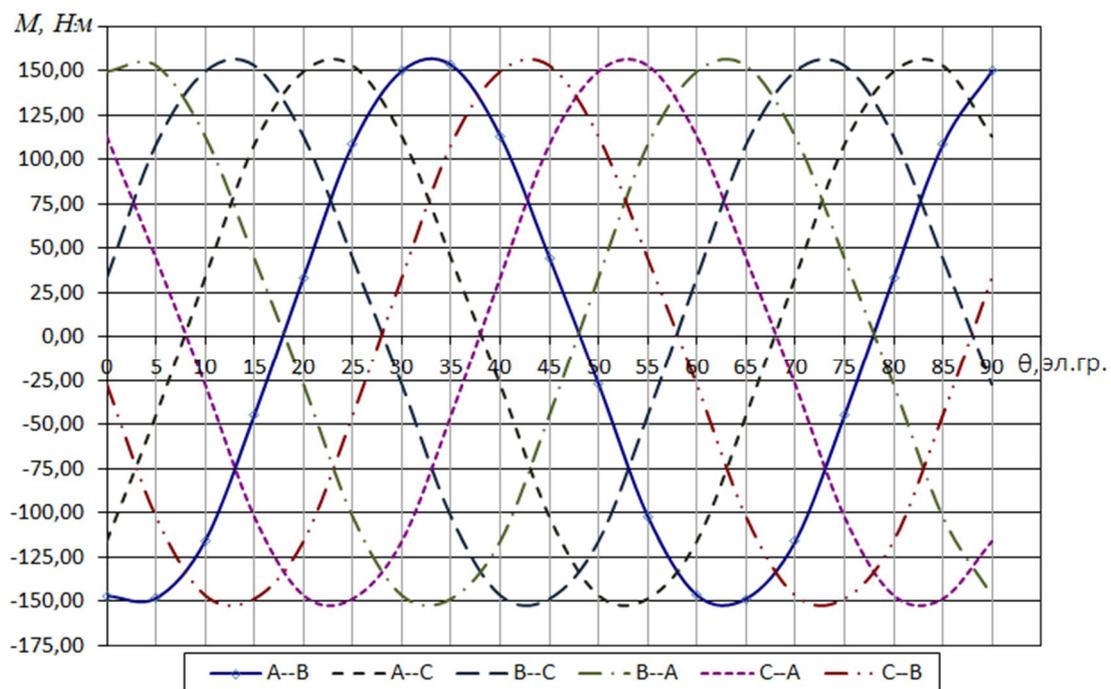
Рисунок 3.12 - Дискретизация рабочей области конечных элементов

Определение электромагнитного момента ИСГ (рисунок 3.13), кривой распределения индукции в зазоре (рисунок 3.14) и картины магнитного поля стартера (рисунок 3.15) осуществлялось в программе ELCUT посредством вращения ротора в подпрограмме Laber Mover.

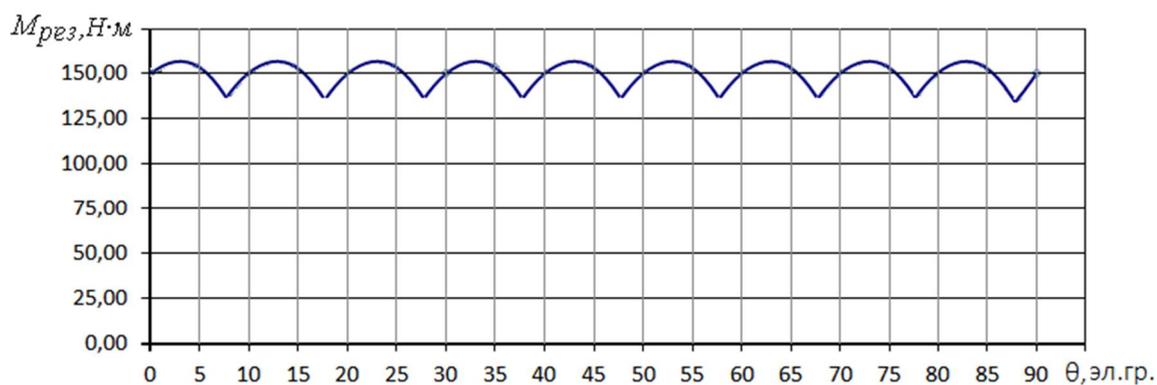
Электромагнитный момент  $M$ , при вращении ротора определялся по формуле:

$$M = M_e \cdot l_{cp},$$

где  $M_e$  – электромагнитный момент на 1м длины СМПП, рассчитанный в программе ELCUT;  $l_{cp}=l_i$  – фактическая длина ИСГ.



а



б

Рисунок 3.13 - Электромагнитный момент:  
а) по фазам А, В, С; б) результирующий

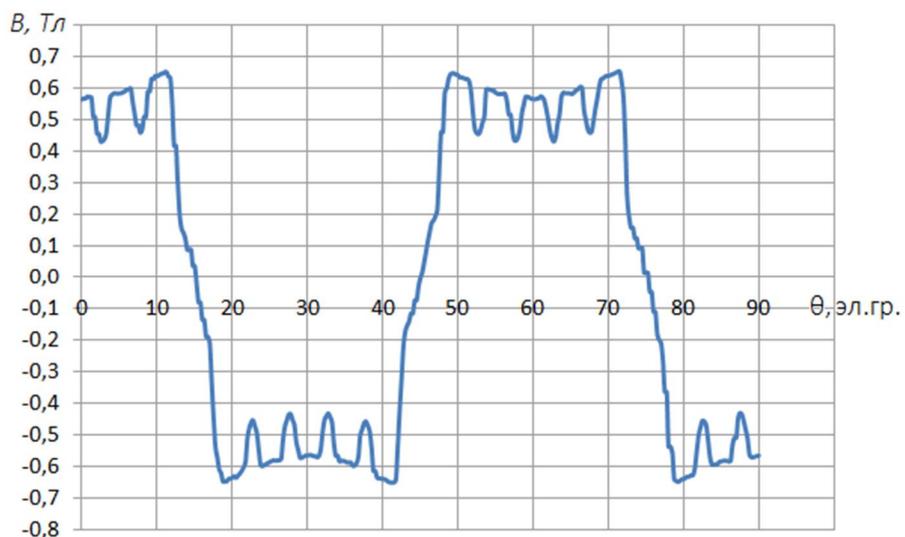


Рисунок 3.14 - Кривая распределения магнитной индукции в зазоре ИСГ

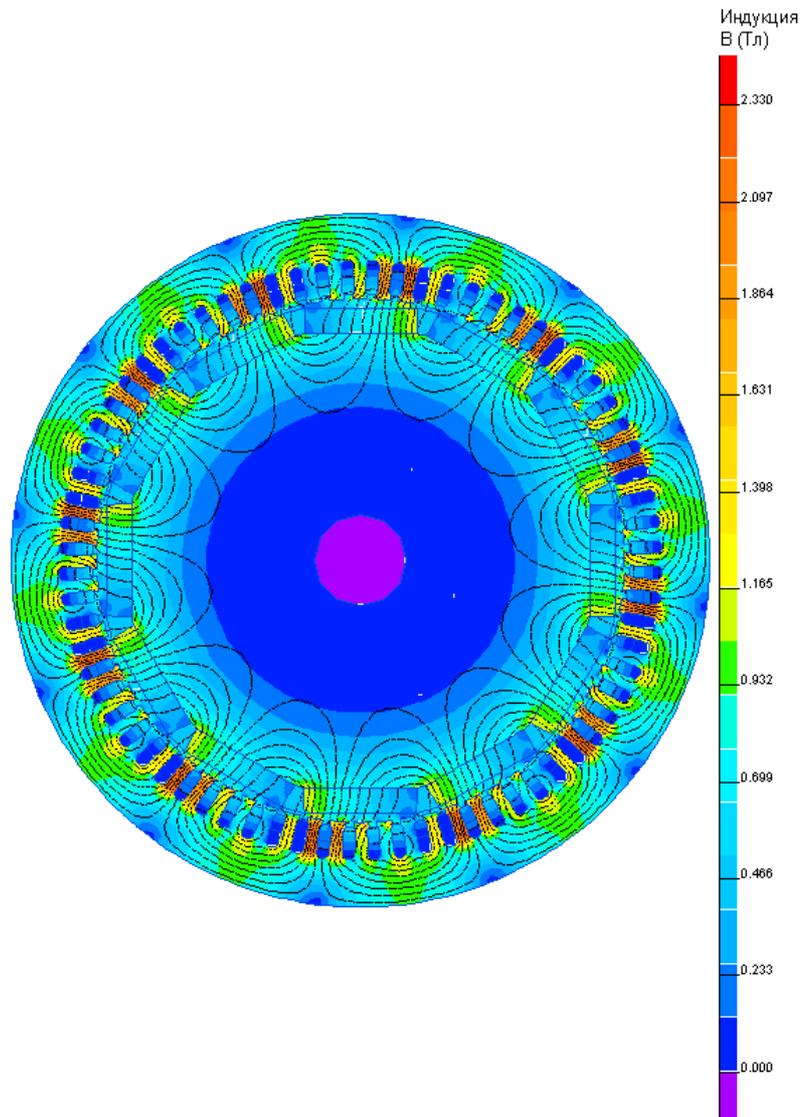


Рисунок 3.15 - Картина магнитного поля стартера

Анализ кривой распределения магнитной индукции в зазоре ИСГ в стартерном режиме показал, что она имеет трапецеидальный вид. Этот факт полностью согласуется с теоретическими положениями, проводящими аналогию между ИСГ в стартерном режиме и БДПТ.

Вид зависимости электромагнитного момента от угла поворота ротора также отвечает аналитическому выражению (3.16), что подтверждает адекватность модели стартерного режима ИСГ.

Величина магнитной индукции в элементах магнитной системы ИСГ (зубцы, спинка статора) находится в пределах значений, рекомендуемых для ЭМП данного типа.

### 3.3 Оптимизация параметров ИСГ методами математического моделирования

С применением полевой модели, представленной в разделе 3.1, проводится оптимизация энергетических параметров ИСГ численными методами. ИСГ используется как объект оптимизации для систем генерирования и запуска дизель-генераторной установки бронетанковой ВСУ.

На рисунке 3.16 изображен эскиз магнитной системы ИСГ.



Рисунок 3.16 - Эскиз магнитной системы ИСГ

В предлагаемой конструкции ИСГ применяется индуктор с радиально намагниченными ПМ, в виде сегментов и расположенными на втулке из магнитомягкого материала, установленной на валу. Использование такой конфигурации магнитной системы дает простую и технологичную конструкцию ИСГ, из-за малого значения величины индуктивных сопротивлений, возможности согласования работы стартерного и генераторного режимов в широком диапазоне частот вращения [46,121].

В таблице 3.5 приведены основные размеры и технические характеристики ИСГ.



Таблица 3.5 - Основные размеры и технические характеристики ИСГ

Наименование	Обозначение	Единица измерения	Величина
<b>Основные размеры</b>			
Наружный диаметр статора	$D_a$	мм	300
Диаметр расточки статора	$D_i$	мм	174
Активная длина статора	$l_i$	мм	55
Высота магнита	$h_m$	мм	8
Ширина магнита	$b_m$	мм	40
Длина магнита	$l_m$	мм	55
Величина воздушного зазора	$\delta$	мм	1
Число зубцов статора	$z_1$	-	72
Число полюсов	$2p$	-	12
Коэрцитивная сила постоянных магнитов	$H_{CB}$	кА/м	1000
<b>Генераторный режим</b>			
Число фаз	$m$	-	3
Номинальная мощность	$P_H$	кВт	9
Номинальное линейное напряжение	$U_L$	В	40
Пределы изменения линейного напряжения	$U_{L,пред}$	В	27-67
Номинальное выпрямленное, стабилизированное напряжение	$U_{вых.н}$	В	27,5
Пределы изменения выпрямленного, стабилизированного напряжения	$U_{вых.д}$	В	26,5÷28,5
КПД, не менее	$\eta$	%	70
Режим работы	длительный		
<b>Стартерный режим</b>			
Номинальное постоянное напряжение обмоток ИСГ	$U_{ном}$	В	24
Степень заряженности аккумуляторной батареи	$\Delta C$	%	$\geq 75$
Емкости аккумуляторных батарей, не менее	$C$	А·ч	170
Частота вращения при пуске, не более	$n$	мин <sup>-1</sup>	150
Начальный пусковой момент, не менее	$M$	Н·м	150
Режим работы	кратковременный		

Влияние марки магнита на массогабаритные, энергетические и динамические характеристики электрической машины обычно связывают с величиной максимальной удельной энергии [46,84]. Однако для выбора типа магнита одного этого показателя недостаточно. В рассматриваемом случае более рационально сравнивать магниты по их добротности ( $D_M$ ), поскольку данный критерий

связывает наиболее существенные эксплуатационные и конструктивно-технические свойства магнитов [68,84].

Что касается эффективности использования магнитной системы ИСГ, то её можно оценивать по полноте выполнения предъявляемых к ней требований:

- обеспечение максимального потока воздушного зазора в заданном объеме,
- создание оптимального распределения плотности потока в активном объеме системы,
- устойчивость, как к температурному размагничиванию, так и к размагничивающим полям.

Целью оптимизации в данном случае является обеспечение максимального значения потока в воздушном зазоре ИСГ с использованием минимального объема магнитного материала. В качестве ограничения выступает устойчивость к силовому и температурному размагничиванию. Основным критерием оптимизации, наиболее полно отвечающим сформулированным требованиям выбран максимальный электромагнитный момент  $M_{\max}$  при работе ИСГ в режиме пуска ДВС [33].

Для оптимизации использовался метод упорядоченного перебора (сетчатый метод). Исследование величины  $M_{\max}$  проводилось в зависимости от следующих варьируемых переменных (факторов):

- высота магнита,  $h_m$ ;
- толщина ярма статора,  $t_{\text{ярма}}$ ;
- величина раскрытия паза,  $t_{\text{п.паза}}$ ;
- величина рабочего зазора,  $\delta$ .

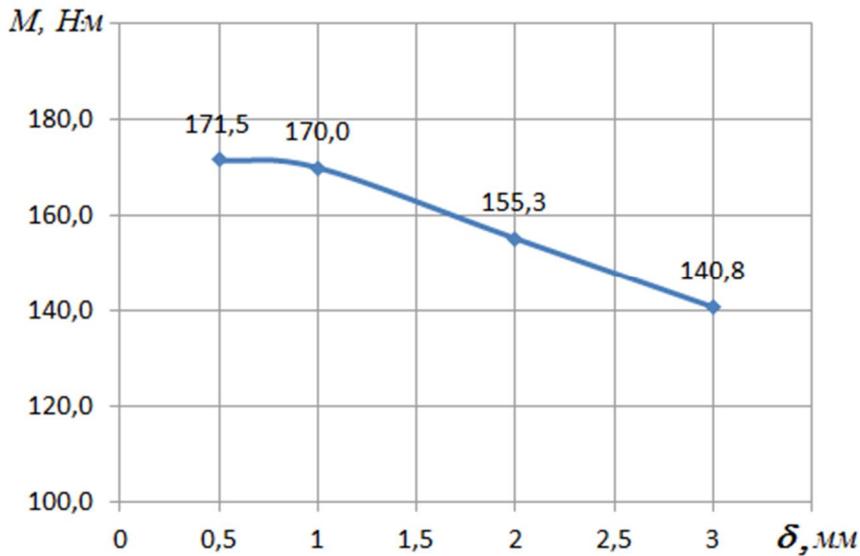
Математическая формулировка задачи оптимизации выглядит следующим образом:

$$M_{\max} = f(h_m, \delta, t_{\text{ярма}}, t_{\text{п.паза}}) = \max, \text{ при } p = \text{const.}$$

Определение вращающего момента ИСГ осуществлялось в программе ELCUT для разных углов поворота ротора. «Вращение» блока «Ротор» геометрической модели ИСГ осуществлялось в сервисной подпрограмме Label

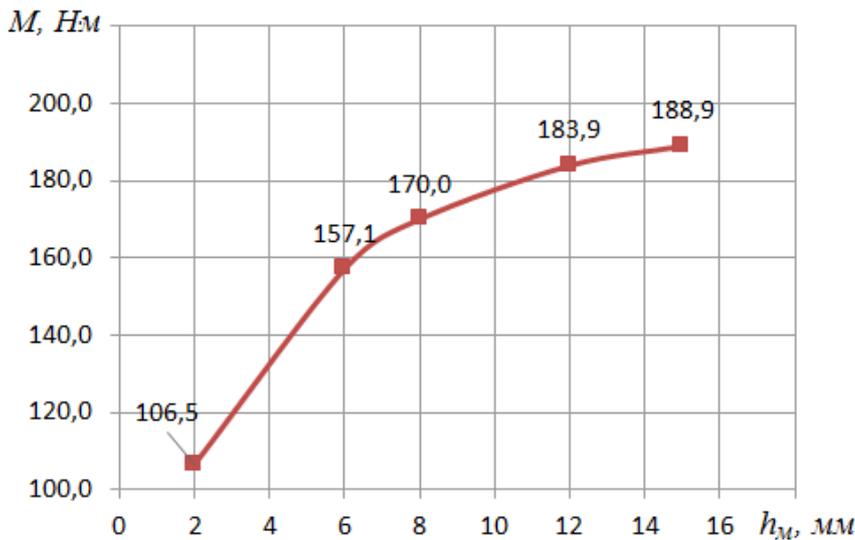
Мover. В ходе поиска фиксировался угол поворота ротора, при котором момент достигал максимума.

В процессе решения оптимизационной задачи найдены зависимости момента  $M$  в функции всех варьируемых переменных. На рисунках 3.17 и 3.18 в качестве иллюстраций приведены графики зависимости момента от величины рабочего зазора  $\delta$ , толщины магнита  $h_m$  при фиксированных значениях остальных факторов.



$\delta$ , мм	$M$ , Н·м
0,5	171,5
<b>1</b>	<b>170,0</b>
2	155,3
3	140,8

Рисунок 3.17 - Зависимость  $M=f(\delta)$ ,  
при  $h_m = 8$  мм,  $t_{ярма} = 12$  мм,  $t_{р.паза} = 1,8$  мм,  $p=6$



$h_m$ , мм	$M$ , Н·м
2	106,5
6	157,1
<b>8</b>	<b>170,0</b>
12	183,9
15	188,9

Рисунок 3.18 - Зависимость  $M=f(h_m)$ ,  
при  $\delta = 1$  мм,  $t_{ярма} = 12$  мм,  $t_{р.паза} = 1,8$  мм,  $p=6$

Графики на рисунке 3.19 показывают зависимости момента от величины зазора при различных значениях высоты магнитов  $h_m$ .

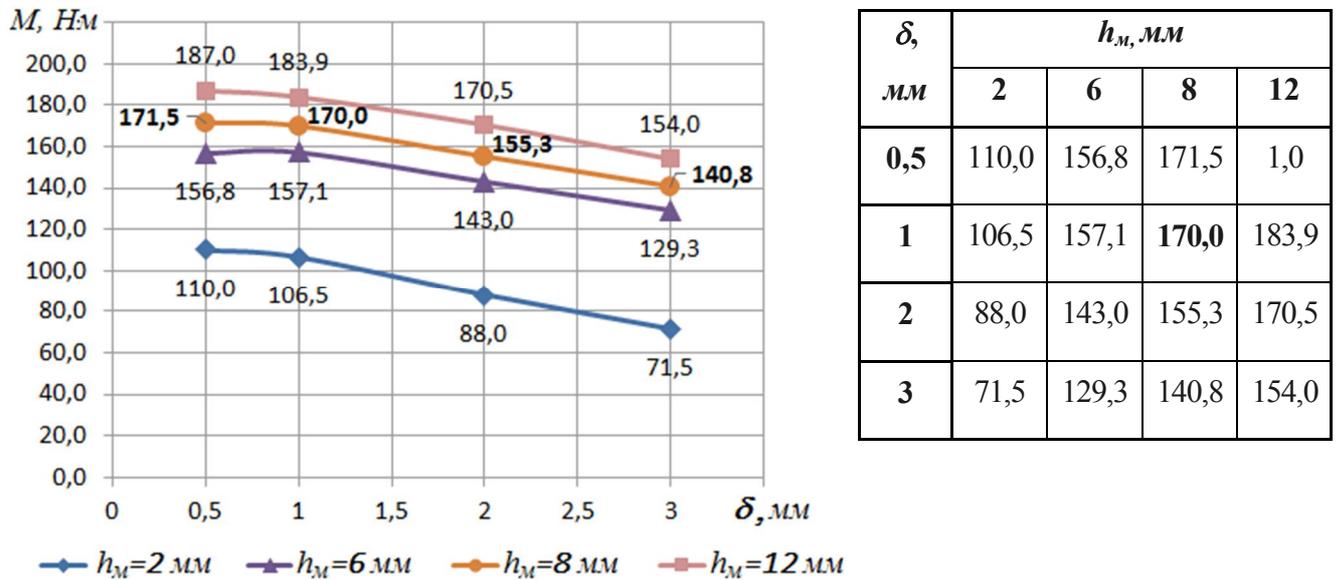


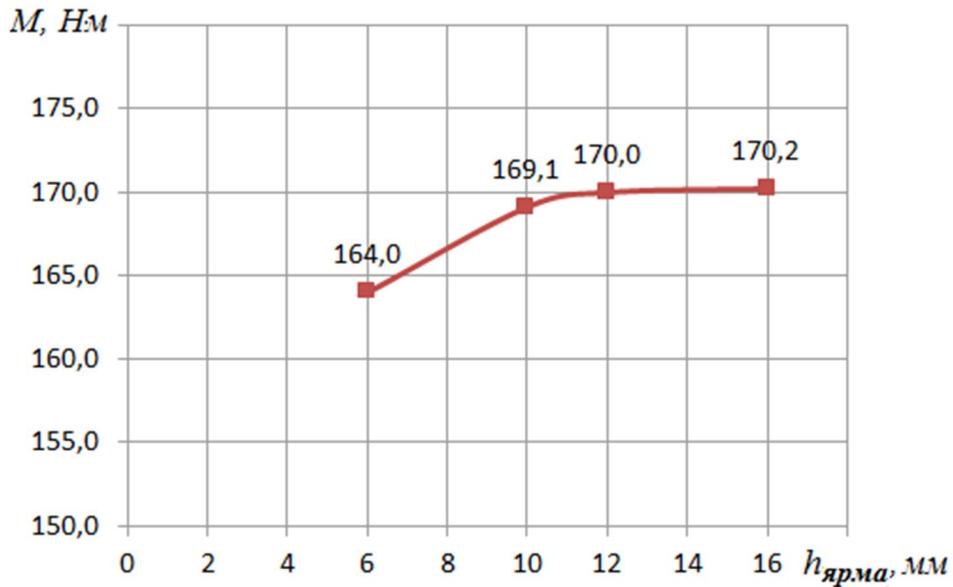
Рисунок 3.19 - Зависимость  $M=f(h_m, \delta)$ ,  
при  $t_{ярма} = 12$  мм,  $t_{р.паза} = 1,8$  мм,  $p=6$

Анализ полученных зависимостей позволил сделать следующие заключения:

- величина зазора ввиду высокой энергии неодимовых ПМ существенно влияет на уменьшение электромагнитного момента начиная с 2 мм и выше. Зазор  $\delta \leq 2$  мм удовлетворяет параметрам технического задания по значению момента ИСГ при пуске ДВС;

- высота ПМ, напрямую влияющая на плотность потока в зазоре и электромагнитный момент, не может быть выбрана менее 6 мм по условиям обеспечения момента при пуске. Уменьшение высоты ПМ приводит к росту интенсивности воздействия поля реакции якоря на параметры магнитов.

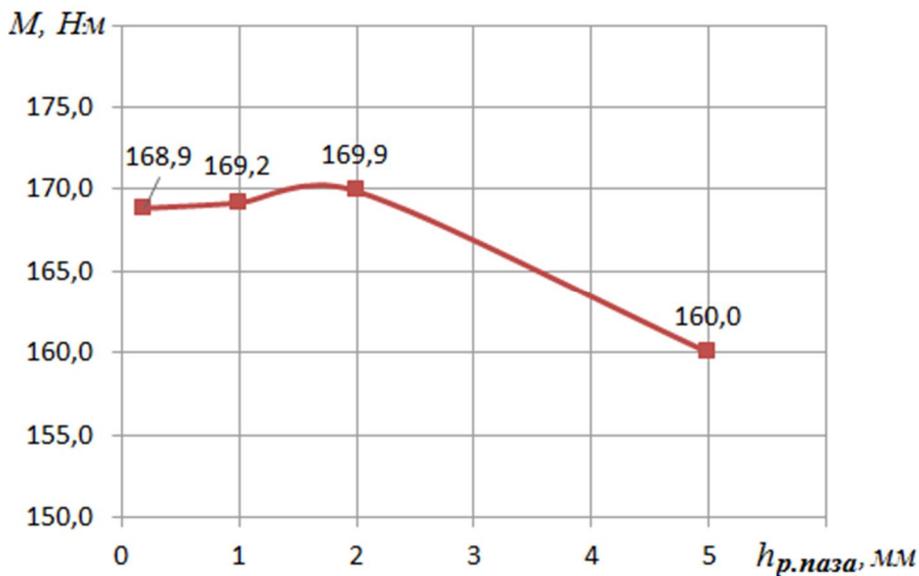
Далее исследовалась зависимость момента от высоты ярма статора  $M=f(t_{ярма})$ . На рисунке 3.20 показано изменение момента при вариации высоты ярма и фиксированных значениях зазора и высоты ПМ. Как следует из рисунка, высота ярма статора менее 10 мм приводит к падению момента из-за сильного насыщения путей замыкания магнитного потока.



$t_{ярма}, мм$	$M, Н·м$
6	164,0
10	169,1
<b>12</b>	<b>170,0</b>
16	170,2

Рисунок 3.20 - Зависимость  $M=f(t_{ярма})$ ,  
при  $h_m = 8$  мм,  $\delta = 1$  мм,  $t_{р.паза} = 1,8$  мм,  $p=6$

На последнем этапе при фиксированных значениях  $h_m$ ,  $\delta$ ,  $t_{ярма}$  исследовалась зависимость  $M=f(t_{р.паза})$  (рисунок 3.21). Величина раскрытия (шлица) паза статора оказывает существенное влияние на момент ИСГ ввиду изменения поля пазового рассеяния, рассеяния по коронкам зубцов и магнитной проводимости зазора при вариации данного параметра.



$t_{р.паза}, мм$	$M, Н·м$
0,2	168,9
1	169,2
2	169,9
5	160,0

Рисунок 3.21 - Зависимость  $M=f(t_{р.паза})$ ,  
при  $h_m = 8$  мм,  $\delta = 1$  мм,  $t_{ярма} = 12$  мм,  $p=6$

Оптимизация методом перебора параметров с учетом ограничений, накладываемых технологией изготовления ротора ИСГ, величиной размагничивания, а также стоимостью ПМ позволила определить следующие размеры элементов магнитной системы ИСГ, отвечающие максимуму функции цели (максимуму момента при заданных ограничениях):  $h_m = 8$  мм,  $\delta = 1$  мм,  $t_{ярма} = 12$  мм,  $t_{p.наза} = 1,8$  мм.

### **Выводы по 3 разделу**

1. Разработаны элементы инженерной методики проектирования СМПМ, учитывающие особенности совмещенной интегрированной конструкции. Показано что применение в конструкции ИСГ магнитов типа NdFeB и SmCo позволяет создавать необходимые значения магнитной индукции в воздушном зазоре при заданных ограничениях. РЗМ магниты обеспечивают требуемую величину электромагнитного момента в стартерном режиме и жесткость внешних характеристик ИСГ в генераторном.

2. Осуществлено численное моделирование магнитного поля ИСГ в генераторном режиме работы при помощи конечно-элементного программного комплекса ELCUT. В результате решения ряда задач определены параметры генератора – индуктивности обмотки якоря и взаимные индуктивности между якорем и индуктором для дальнейшего использования при имитационном моделировании электромагнитных и электромеханических процессов пуска ДВС и работе ИСГ в режиме генератора.

3. Проведено исследование магнитного поля ИСГ в стартерном режиме, на основании которого получена кривая распределения индукции в зазоре ИСГ при нагрузке и определена величина вращающего момента ИСГ и ее изменение в рабочем диапазоне изменения углов поворота ротора.

4. Поставлена и решена задача оптимизации размеров магнитной системы ИСГ численными методами с использованием разработанной полевой модели. В качестве главного критерия оптимизации выбран максимум электромагнитного момента при работе ИСГ в режиме пуска ДВС. Анализ результатов решения

оптимизационной задачи позволил определить размеры индуктора, зубцово-пазовой зоны статора, величину зазора, обеспечивающих максимальное значение пускового момента ИСГ при запуске ДВС.

#### 4. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОПИСАНИЕ И ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ИСГ

Наряду с исследованием влияния конструктивных особенностей исполнения ИСГ на его массо-габаритные и энергетические показатели весьма важным этапом разработки и исследования таких машин является изучение статических характеристик ИСГ при работе в генераторном режиме и его динамических показателей: начального пускового момента, времени пуска при работе в стартерном режиме.

Известно, что любую электромеханическую систему можно охарактеризовать следующими показателями:

- совокупностью определенных физических и конструктивных признаков;
- набором основных параметров, входящих в уравнения динамики и статики;
- характеристиками установившихся и переходных режимов работы, определяющими ее эксплуатационные возможности [35].

ИСГ, как электрическая машина в совокупности с устройствами управления и регулирования характеризуется основными параметрами, такими как постоянная времени, активное и индуктивное сопротивление, момент инерции ротора, характер и вид нагрузки и т.д. По реакциям на управляющие и возмущающие воздействия, статическим и динамическим характеристикам оцениваются её эксплуатационные возможности.

В настоящее время разработано большое количество специализированных программных средств, по моделированию сложных динамических систем. Одни из наиболее известных – это Visual system Simulation, Matlab Simulink, System View и др. Для математического описания и моделирования электромагнитных и электромеханических процессов ИСГ из всего многообразия программ был выбран пакет Matlab Simulink, разработанный компанией Mathworks, так как он имеет в своем составе широко развитые расширения (Toolboxes) и пакет Simulink со своими расширениями (Blocksets, Sim Power System), предназначенные для имитационного моделирования электромеханических устройств [22].



Среда Matlab Simulink предоставляет исследователю самые различные возможности, начиная от структурного (математического) представления системы и кончая имитационным (виртуальным) моделированием в реальном времени. Использование имитационного моделирования в среде Matlab Simulink позволяет исследовать не только динамические характеристики мехатронных систем, но и их статические характеристики, такие как нагрузочные, регулировочные, энергетические [22,86,109].

В данном разделе проведено исследование работы ИСГ в генераторном и стартерном режимах работы. Генераторный режим моделировался при двух способах построения контура регулирования напряжения: без стабилизации напряжения, со стабилизацией выходного напряжения. В стартерном режиме исследовался пуск ДВС в схеме без ограничения по току статора и с ограничением по току.

#### 4.1 Моделирование генераторного режима работы ИСГ

ИСГ в генераторном режиме работы представляет собой синхронный генератор с постоянными магнитами (СГПМ), работающий на выпрямительную нагрузку. Функциональная схема генераторного режима работы изображена на рисунке 4.1.

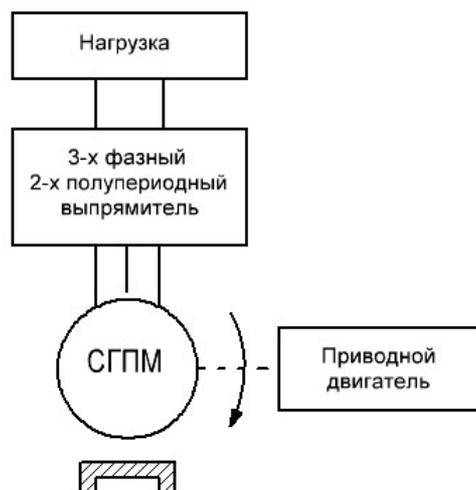


Рисунок 4.1 - Функциональная схема работы ИСГ в режиме генератора

Для управления работой ИСГ в генераторном режиме используется силовой преобразователь, изображенный на рисунке 4.2 и содержащий 3-х фазный инвертор (коммутатор-выпрямитель).

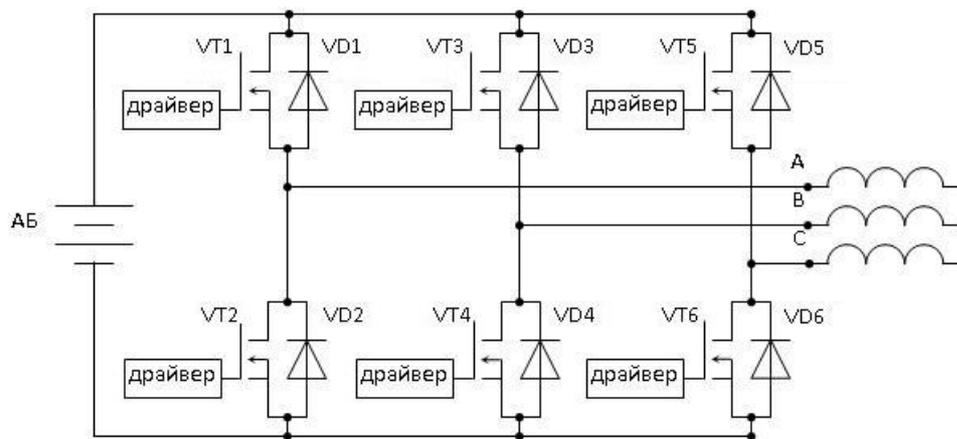


Рисунок 4.2 - Силовой преобразователь ИСГ в генераторном режиме работы

#### 4.1.1 Моделирование генераторного режима без стабилизации выходного напряжения

ИСГ в генераторном режиме представляет собой вентильный магнитоэлектрический генератор (ВМГ) на основе СГПМ. Электрическая схема ВМГ представлена на рисунке 4.3.

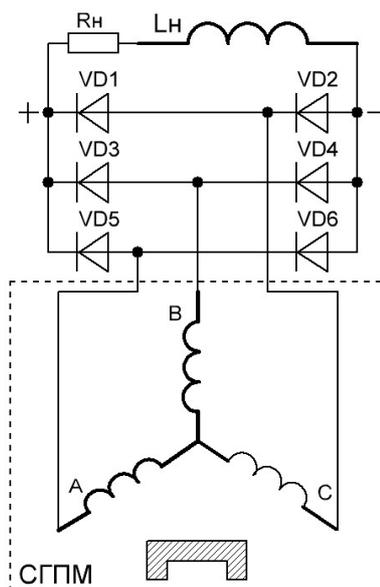


Рисунок 4.3 - Схема ВМГ с 3-х фазным двухполупериодным выпрямителем

В указанном режиме силовые транзисторные MOSFET ключи инвертора VT1-VT6 закрыты, а шунтирующие ключи диоды VD1-VD6 образуют 3-х фазную двухполупериодную схему выпрямления [52,66].

При моделировании генераторного режима без стабилизации выходного напряжения исследовалась работа ИСГ при холостом ходе и различной частоте вращения ротора. Использование имитационного моделирования позволяет исследовать статические и динамические характеристики ИСГ при работе на выпрямительную нагрузку [64].

Исходная система уравнений генераторного режима ИСГ в ортогональных осях d-q, жестко связанных с ротором [76]:

$$\begin{cases} u_d = \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega_{эл} \Psi_q + R \cdot i_d \\ u_q = \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega_{эл} \Psi_d + R \cdot i_q \\ \Psi_d = L_d i_d + \Psi_0 \\ \Psi_q = L_q i_q; \Psi_0 = w \cdot \Phi_0 = const; \omega_{эл} = p \cdot \omega_r \\ M_{эл} = \frac{3}{2} p (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) \end{cases} \quad (4.1)$$

где  $i_d, i_q$  – проекции тока статора на оси d и q соответственно;

$u_d, u_q$  – проекции напряжения подводимого к статору на оси d и q соответственно;

$L_d, L_q$  – индуктивности синхронной машины по продольной и поперечной осям;

$R$  – активное сопротивление фазы статора;

$p$  – число пар полюсов;

$\omega_{эл}$  – электрическая угловая скорость ротора;

$\omega_r$  – угловая частота вращения ротора;

$\Psi_d, \Psi_q$  – потокосцепления по осям d и q, соответственно;

$\Psi_0$  – потокосцепление постоянных магнитов с обмоткой статора;

$M_{эм}$  – электромагнитный момент.

Структурная схема модели ИСГ в генераторном режиме приведена на рисунке 4.4 [51].

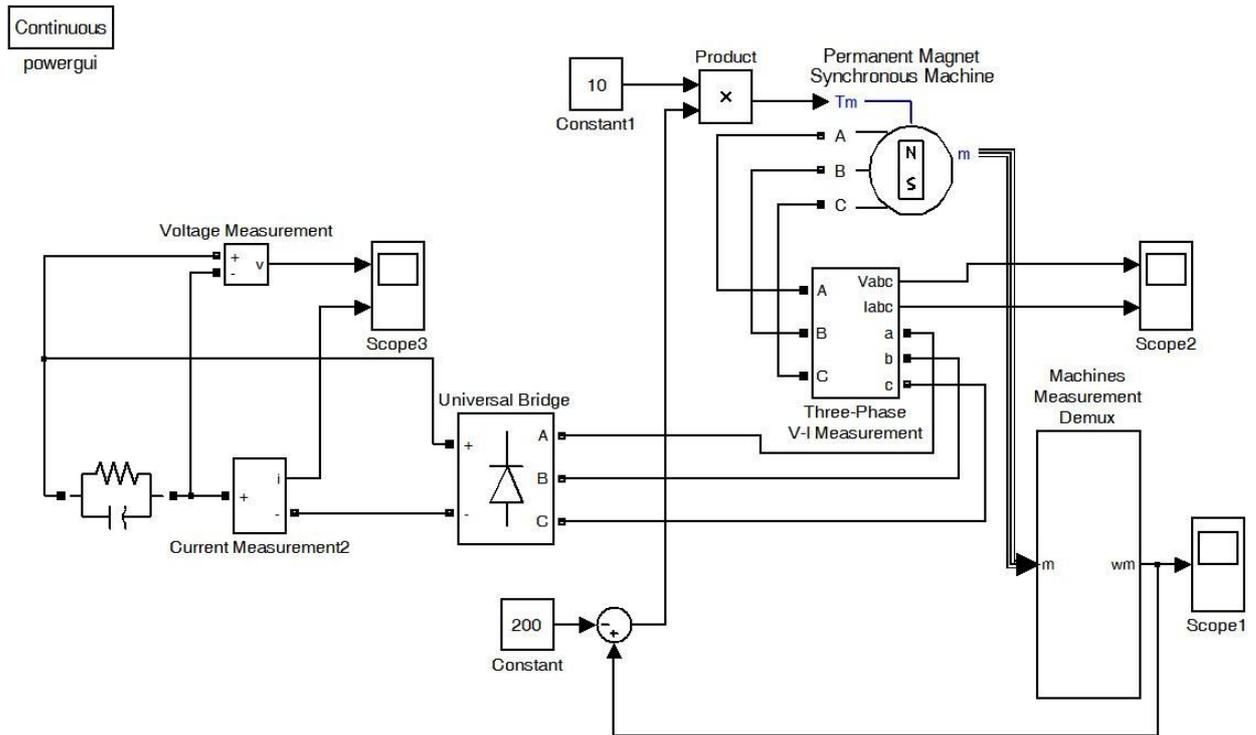


Рисунок 4.4 - Структурная схема модели ИСГ в генераторном режиме

Основными компонентами модели являются:

- блок Permanent Magnet Synchronous Machine (PMSM), моделирующий СМПСМ;
- 3-х фазный двухполупериодный выпрямитель (блок Universal Bridge);
- измерительные блоки Tree-Phase V-I Measurement и Machines Measurement Demux, служащие для согласования работы блоков модели, а также позволяющие измерять переменные токи и напряжения. Выходными сигналами измерительных блоков являются сигналы моделей Simulink, которые подаются на блоки визуализации Scope;
- нагрузка на выходе 3-х фазного двухполупериодного выпрямителя (блок Parallel RCL Branch). При моделировании холостого хода сопротивление нагрузки составляет несколько МОм;
- измерители напряжения (блок Voltage Measurement) и тока нагрузки (блок Current Measurement);
- блок PMSM совместно с блоком Universal Bridge и блоком Constant1 задания частоты вращения привода генератора моделирует ВМГ.

В таблице 4.1 приведены параметры блока PMSM.

Таблица 4.1 - Параметры блока PMSM

Параметр	Единица измерения	Величина	Примечание
Электрическое сопротивление фазы, R	Ом	$8 \cdot 10^{-3}$	–
Индуктивность, $L_d$ и $L_q$	Гн	$160 \cdot 10^{-6}$	$L_d=L_q$
Потокосцепление фазы, $\Psi$	Вб	0,02	$\Psi=\Phi_0 \cdot W \cdot k_{ol}$ , где $\Phi_0$ – магнитный поток в воздушном зазоре, равный $0,9 \cdot 10^{-3}$ Вб; $W$ – число витков фазы статора, равное 24; $k_{ol}$ – обмоточный коэффициент, равный 0,966.
Момент инерции ротора электрической машины, J	кг·м <sup>2</sup>	5	–
Число пар полюсов электрической машины, p	–	6	–
Коэффициент, учитывающий трение, F	Н·м·с	0	–

Основной элемент модели, блок PMSM, описывается следующей системой дифференциальных уравнений в форме Коши во вращающейся синхронно с ротором системе координат d-q:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d} u_d - \frac{R}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} p \cdot \omega_r \cdot i_q, \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q} u_q - \frac{R}{L_q} i_q - \frac{L_d}{L_q} p \cdot \omega_r \cdot i_q - \frac{\Psi_0 \cdot p \cdot \omega_r}{L_q} \\ M_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\Psi_0 \cdot i_q + (L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q), \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (M_m - F \cdot \omega_r - M_{эм}). \end{array} \right. \quad (4.2)$$

где  $M_m$  – механический момент привода;  $F$  – коэффициент, учитывающий трение в подшипниках электрической машины;  $J$  – момент инерции вращающейся части ИСГ.

При моделировании генераторного режима ИСГ на холостом ходу проводилось определение среднего значения выпрямленного напряжения на выходе 3-х фазного вентильного генератора и сопоставление полученных значений с результатами аналитического расчета. Формула для аналитического расчета среднего значения напряжения вентильного генератора в режиме холостого хода имеет вид [93]:

$$U_d = 4k_u k_\gamma k_{ol} \frac{pn}{60} \Phi_0 \cdot W, \quad (4.3)$$

где  $k_u = U_d / U_\phi$  – коэффициент выпрямления, зависящий от числа и схемы соединения фаз. Для 3-х фазной двухполупериодной схемы выпрямления  $k_u = 2,34$ ;  
 $k_\gamma = (1 - \cos\gamma) / 2$  – коэффициент выпрямления, учитывающий реальную коммутацию выпрямительных диодов 3-х фазной схемы выпрямления, принимаемый для режима холостого хода генератора, равным 1;

В таблице 4.2 приведены результаты моделирования в Matlab Simulink, аналитического расчета и экспериментальные данные.

Таблица 4.2 - Напряжение холостого хода,  $U_{d0} = f(n)$

Частота вращения $n$ , мин <sup>-1</sup>	$U_{d0}$ , В			Расхождение, %
	модель	расчет	эксперимент	
1500	28,08	28,10	27,5	2,11
2400	45,65	45,67	44,28	3,03
3000	57,37	57,39	55,2	3,82
3450	66,16	66,18	63,4	4,20

Анализ данных таблицы 4.2 показал, что численная и аналитическая модели довольно близки по точности предсказания величины напряжения холостого хода ИСГ. Некоторое отличие расчетных данных с экспериментом объясняется приближенным описанием кривой намагничивания электротехнической стали и магнитных свойств материала ПМ.

#### 4.1.2 Моделирование генераторного режима со стабилизацией выходного напряжения

Применение ИСГ в системах электроснабжения транспортных средств и в подвижных автономных объектах накладывает определенные требования к стабильности выходного напряжения в широком диапазоне изменения частоты вращения ДВС и нагрузок [20,27,104].

Функциональная схема работы ИСГ в режиме генератора со стабилизацией выходного напряжения приведена на рисунке 4.5.

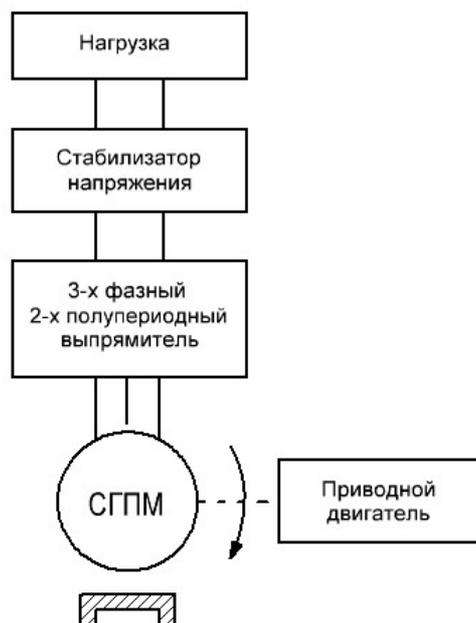


Рисунок 4.5 - Обобщенная функциональная схема работы ИСГ в режиме генератора со стабилизацией выходного напряжения

Стабильность выходного напряжения, которая обеспечивается за счет работы регулятора на выходе магнитоэлектрического генератора, служит обязательным условием надежной работы АБ и других потребителей.

Основными задачами моделирования являются:

- изучение работы ИСГ в генераторном режиме со стабилизацией выходного напряжения на холостом ходу и под нагрузкой;
- определение рациональных параметров стабилизатора напряжения в рабочем диапазоне частот вращения ротора генератора;

– исследование работы ИСГ в переходных режимах (при внезапном изменении нагрузки на выходе).

Структурная схема модели ИСГ со стабилизацией выходного напряжения в генераторном режиме приведена на рисунке 4.6 [53].

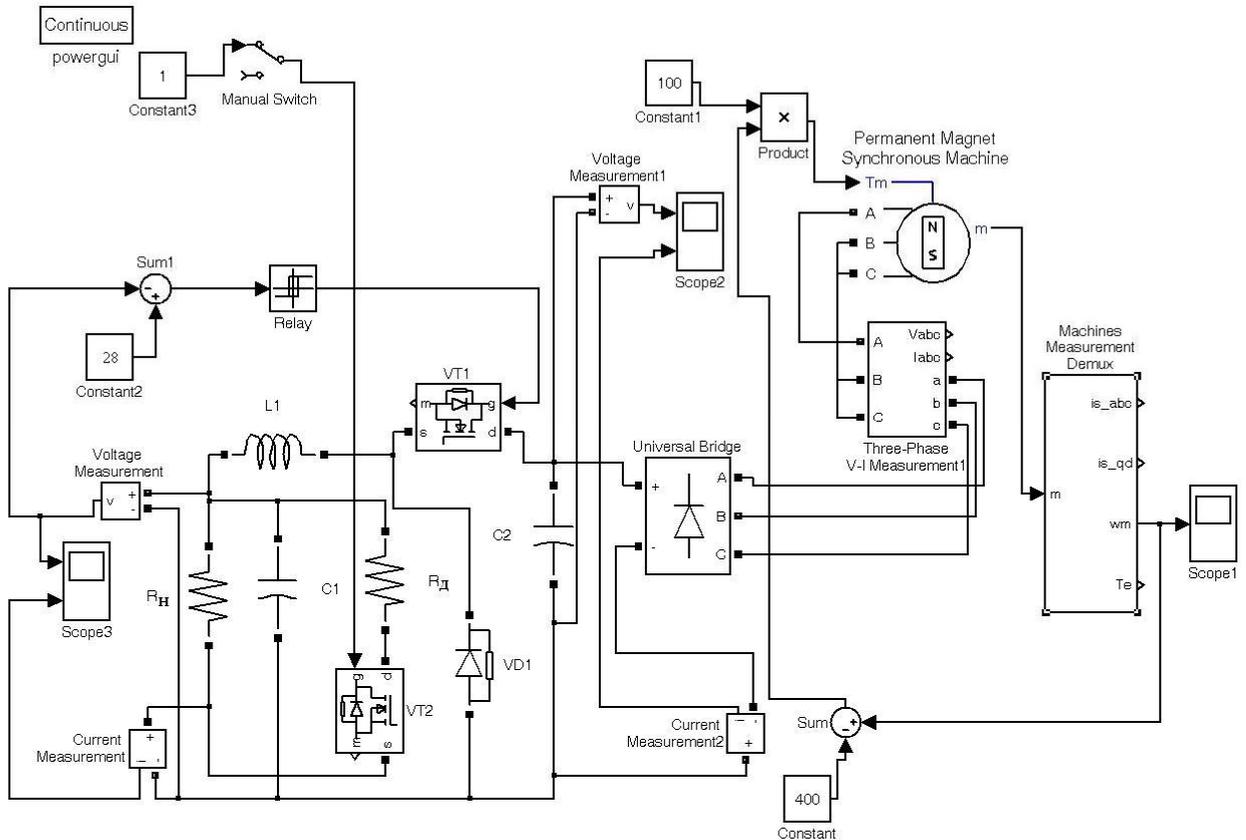


Рисунок 4.6 - Структурная схема модели генераторного режима со стабилизацией выходного напряжения

Основными элементами модели являются:

- блок Permanent Magnet Synchronous Machine (PMSM), моделирующий вентильный магнитоэлектрический генератор;
- блок Universal Bridge, моделирующий работу трехфазного двухполупериодного выпрямителя, на выходе ВМГ;
- измерительный блок Tree-Phase V-I Measurement и Machines Measurement Demux;
- блок, моделирующий стабилизатор напряжения, содержащий схему понижающего импульсного регулятора напряжения (ИРН). Модель ИРН содержит последовательно включенный дроссель  $L_1$ , регулирующий MOSFET



транзистор VT1 и диод VD1, который открывается на время протекания тока самоиндукции сразу после запираания основного транзистора VT1, конденсатор  $C_1$ , подключенный параллельно нагрузке ИРН. Блоки Relay, измеритель напряжения V, устройство сравнения (Sum1), Constant2 предназначены для моделирования релейного режима работы ИРН;

- блок конденсатора  $C_2$  на входе ИРН, служащий для сглаживания пульсаций и провалов выпрямленного напряжения при набросах нагрузки;
- блок Parallel RC Branch моделирует нагрузку на выходе ИСГ;
- модуль задания частоты вращения привода генератора содержит блок умножения Product и блоки Constant, Constant1.

Подробная работа модуля задания частоты вращения привода ИСГ описана в [62].

Моделирование внезапного изменения нагрузки в бортовой сети транспортного средства или подвижного автономного объекта осуществляется резистором  $R_D$ , который подключается при помощи транзисторного ключа VT2 параллельно основной нагрузке  $R_H$ . Источник Constant3 и переключатель Manual Switch предназначены для управления работой транзистора VT2.

Стабилизация напряжения на выходе 3-х фазного двухполупериодного выпрямителя вентильного генератора осуществляется импульсным регулятором напряжения, принципиальная схема которого приведена на рисунке 4.7.

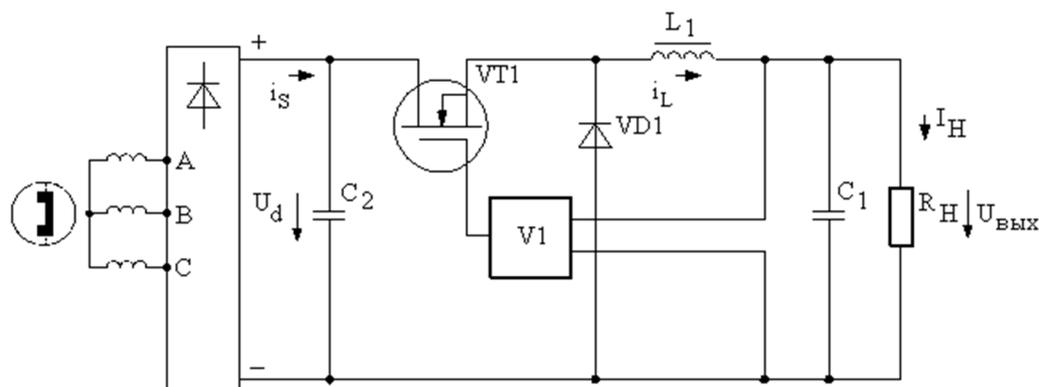


Рисунок 4.7 - Принципиальная схема ИРН

Для использования мощных полупроводниковых приборов в силовых преобразователях на входе и выходе ИСГ требуется разработка эффективных схем импульсных преобразователей постоянного напряжения, а так же методов их анализа и моделирования.

ИРН содержит регулирующий полевой MOSFET транзистор VT1, диод VD1, дроссель  $L_1$ , конденсаторы  $C_1$ ,  $C_2$ , работа которых управляется микросхемой V1. Из индуктивности  $L_1$  и емкости  $C_1$  формируется выходной низкочастотный фильтр. Назначение последнего - подавление составляющих напряжения на выходе стабилизатора с частотами, равными или превышающими частоту переключения ИРН  $f_s$ . Такое подавление будет обеспечено, в том случае, если частота  $f_c$  среза низкочастотного фильтра, определяемая по формуле (4.4), будет меньше частоты переключения  $f_s$  [89]:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} < f_s, \quad (4.4)$$

где  $f_s = \frac{1}{T}$  – частота переключения.

В качестве источника питания ИРН служит генераторный режим ИСГ. В кривой выходного тока ИСГ имеются пульсации и искажения, величина которых зависит от значения и характера нагрузки. В большинстве случаев при практическом использовании ИРН на величину пульсаций тока  $i_s$  накладываются жесткие ограничения. Тогда на вход ИРН ставится входной низкочастотный фильтр для сглаживания таких пульсаций. В рассматриваемом случае входной LC-фильтр образован эквивалентной индуктивностью  $L_2$  статорной обмотки ИСГ и емкостью конденсатора  $C_2$  на входе ИРН.

В данной части исследования генераторного режима ИСГ решены следующие задачи:

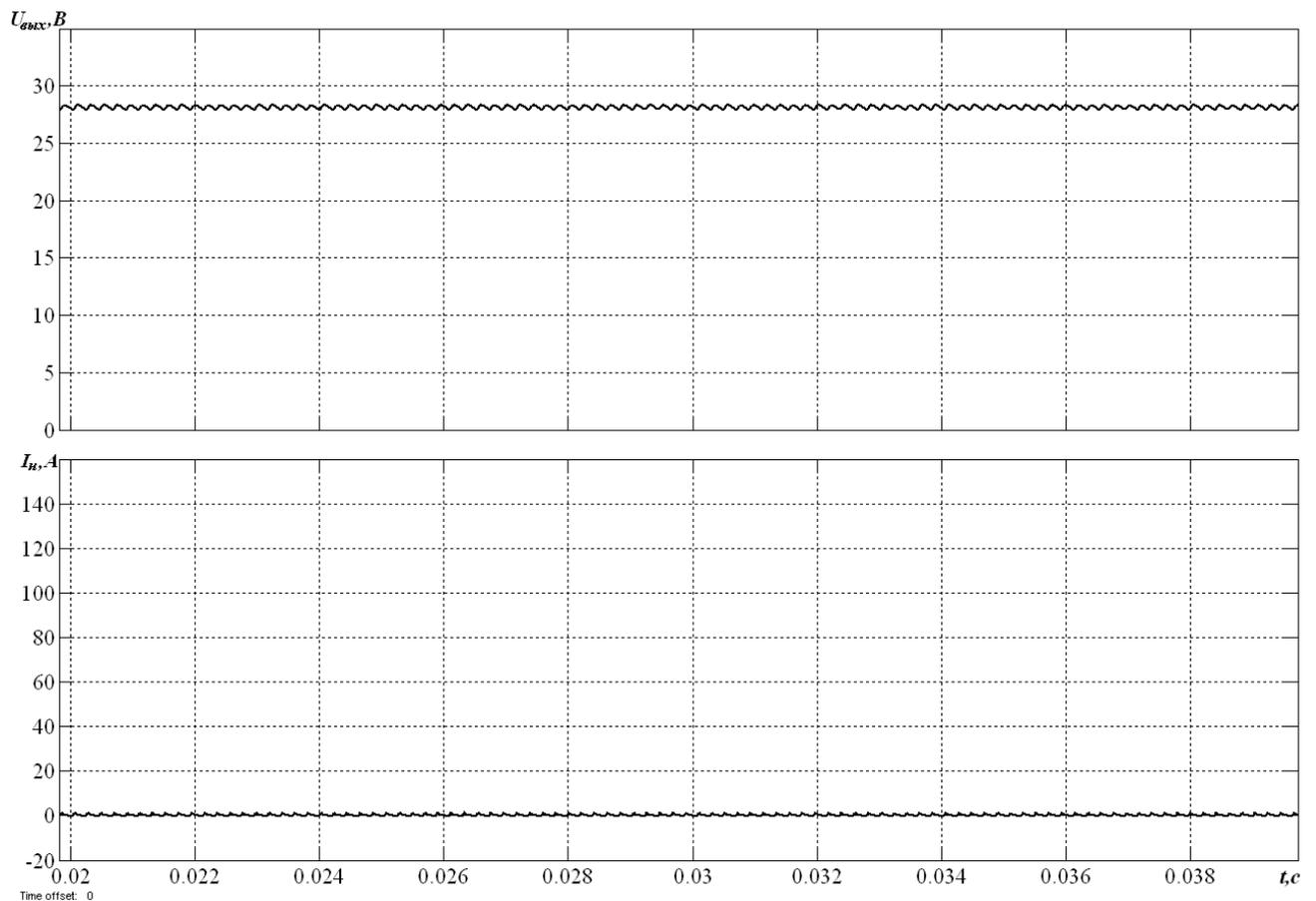
- смоделированы установившиеся процессы работы ИСГ в широком диапазоне нагрузок и частот вращения ДВС;

– смоделированы переходные процессы при скачкообразном изменении нагрузки, имитирующие как увеличение (наброс), так и уменьшение (сброс) нагрузки в бортовой сети ТС или АО.

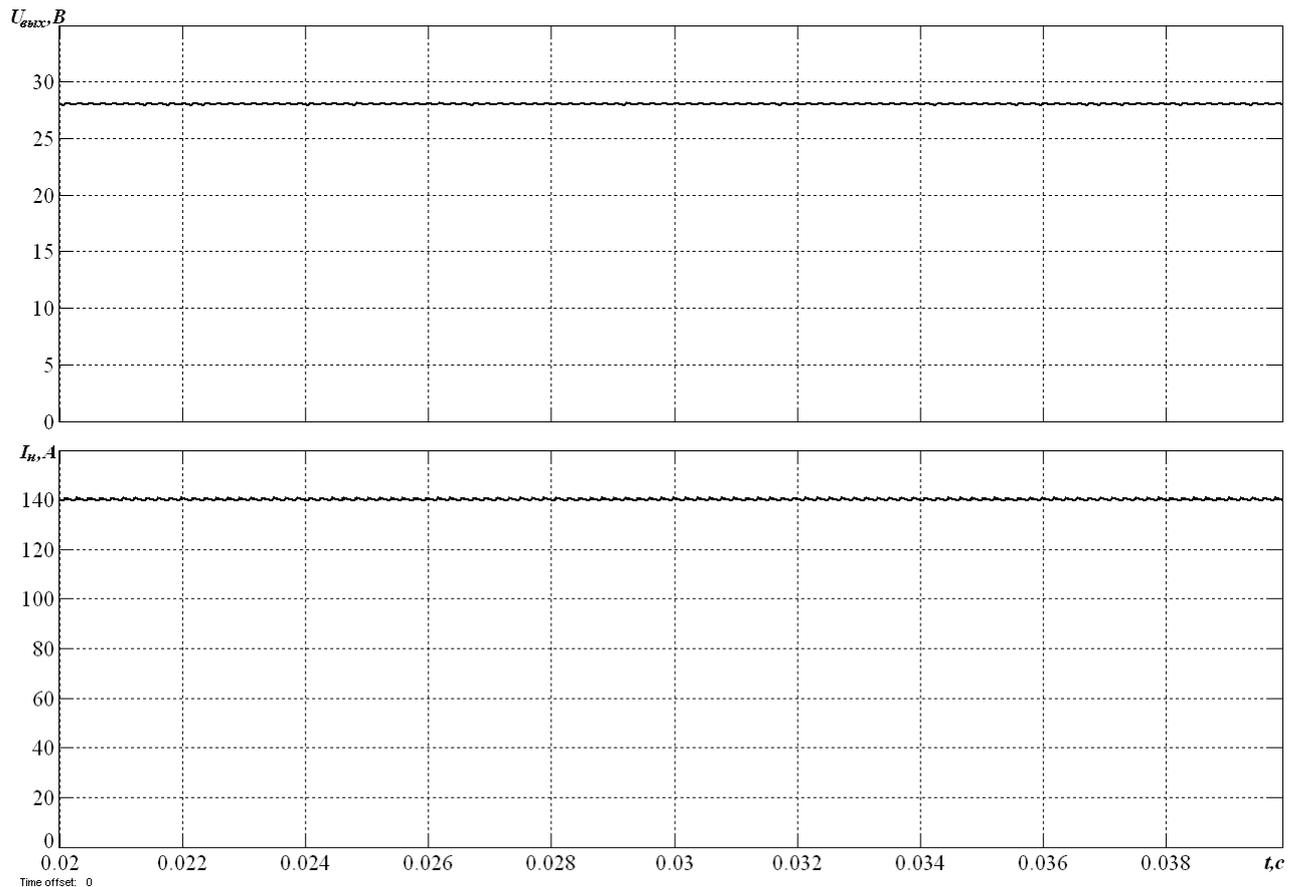
Моделирование задач установившихся процессов (первого типа) проводится в соответствии с полученной структурной схемой, представленной на рисунке 4.6, в широком диапазоне частот вращения ротора генератора  $n=1500\div 3450$  мин<sup>-1</sup> при различных нагрузках генератора:

- близких к холостому ходу  $I_H \approx 0,5$  А ( $R_H = 100$  Ом);
- близких к короткому замыканию  $I_H \approx 140$  А ( $R_H = 0,2$  Ом).

Осциллограммы напряжения и тока на выходе генератора, полученные в результате моделирования, приведены на рисунке 4.8.



а



б

Рисунок 4.8 - Осциллограммы напряжения и тока на выходе ИСГ при  $n=3450 \text{ мин}^{-1}$ : а) при  $R_{\text{H}}=100 \text{ Ом}$ ; б) при  $R_{\text{H}}=0,2 \text{ Ом}$

Пульсации напряжения на выходе ИСГ не превышают 0,5В при работе как на холостом ходу (рисунок 4.8, а), так и под нагрузкой (рисунок 4.8, б). Осциллограммы выпрямленного тока по форме аналогичны осциллограммам напряжения (нагрузка активная).

В соответствии с аналитической методикой в режиме непрерывного тока, протекающего в дросселе  $L_1$ , регулировочная характеристика ИСГ удовлетворяет выражению [48]:

$$U_{\text{вых}} = U_d \cdot \gamma = U_d \frac{t_u}{T} = U_d \cdot t_u \cdot f_s, \quad (4.5)$$

где  $U_d$  – среднее напряжение на выходе 3-х фазного двухполупериодного выпрямителя;  $U_{\text{вых}}$  – напряжение на выходе ИРН;  $\gamma = \frac{t_u}{T}$  – относительная

длительность (коэффициент заполнения), открытого состояния транзистора VT1, изменяющаяся в диапазоне от  $\gamma_{\min}$  до  $\gamma_{\max}$  при работе ИСГ в диапазоне частот вращения генератора  $n=1500\div 3450$  мин<sup>-1</sup>.

В таблице 4.3 приведены значения коэффициента заполнения  $\gamma$  при различных частотах вращения ИСГ, полученные при моделировании и аналитическом расчете. Сравнительный анализ результатов моделирования с расчетом по формуле (4.5) показал, что расхождение результатов моделирования и результатов аналитического расчета не превышает 4%, что указывает на адекватность аналитического описания установившихся режимов работы ИСГ при работе генератором.

Таблица 4.3 - Коэффициент заполнения  $\gamma$  ИРН при различных частотах вращения и нагрузках

Частота вращения $n$ , мин <sup>-1</sup>	Нагрузка на выходе ИРН		Напряжение на выходе ИРН, $U_{\text{вых}}$ , В	Коэффициент заполнения $\gamma$		Расхождение, %
	$I_H$ , А	$R_H$ , Ом		модель	расчет	
1500	140	0,2	28,01	0,0787	0,0772	1,90
	0,3	100	28,05	0,0658	0,0643	2,27
2400	140	0,2	28,015	0,06	0,0589	2,48
	0,45	100	28,07	0,0508	0,0493	2,95
3000	140	0,2	28,02	0,0483	0,047	2,71
	0,48	100	28,08	0,0416	0,04	3,45
3450	140	0,2	28,03	0,0467	0,0452	3,21
	0,5	100	28,10	0,0411	0,0396	3,64

Существенным моментом в работе схемы стабилизатора напряжения является обеспечение работы ИРН в режиме непрерывного тока, что обеспечивается выполнением условия [48]:

$$L_1 > \frac{R_{H \max} (1 - \gamma_{\min})}{2f_s}, \quad (4.6)$$

Из формулы (4.6) следует, что для работы ИРН в режиме непрерывного тока требуется значительная индуктивность дросселя  $L_1$  – от единицы до нескольких десятков мГн. Такая индуктивность предполагает большие габариты и высокую

стоимость дросселя, а при технической реализации ИРН параметры индуктивности  $L_1$  и емкости  $C_1$  как правило выбирают по нескольким критериям: минимальной массы, объёма и стоимости [89]. Решением в ИСГ данного противоречия служит выбор значения  $L_1$ , обеспечивающего при средней мощности нагрузки работу ИРН в режиме непрерывного тока.

Переменная составляющая напряжения на выходе ИРН определяется соотношением:

$$U_{\sim \text{вых}} = \frac{U_{\text{вых}}(1 - \gamma_{\min})}{16f_s^2 L_1 C_1}, \quad (4.7)$$

Из последнего выражения следует, что емкость  $C_1$  выходного  $L_1 C_1$  фильтра:

$$C_1 = \frac{U_{\text{вых}}(1 - \gamma_{\min})}{16f_s^2 L_1 U_{\sim \text{вых}}}, \quad (4.8)$$

При работе ИРН полагается, что индуктивность  $L_2$  и емкость  $C_2$  конденсатора входного низкочастотного  $LC$ -фильтра достаточно велики, ток  $i_s$  практически постоянен, а переменная составляющая тока  $i_{\sim}$  определяет ток  $i_{C2}$  через конденсатор  $C_2$ . Оба эти допущения совместимы с практическими требованиями к ИРН по низкому уровню пульсаций входного тока и выходного напряжения.

В процессе работы ИСГ в генераторном режиме наряду с изменением частоты вращения ротора часто происходит внезапное изменение нагрузки. Изменение частоты вращения ротора, в отличие от изменения нагрузки, происходит относительно плавно. Продолжительность этого процесса обусловлена значительной инерционностью ДВС. Изменение нагрузки генератора может происходить скачкообразно, как при ее набросе (включение мощных потребителей), так и при сбросе (отключение потребителей). Возможность использования аналитических методов для количественного описания переходных процессов в ИСГ весьма ограничена и требуемая точность анализа не обеспечивается [89].

В работе моделирование ИСГ в переходных режимах проводилось средствами Matlab Simulink. Имеющиеся стандартные блоки в разделах библиотек Sim Power System и Simulink позволяют смоделировать работу ИСГ и схемы ИРН

в режиме скачкообразного изменения нагрузки. Имитация наброса нагрузки в бортовой сети автомобиля осуществлялась включением дополнительного сопротивления  $R_{д}=0,2$  Ом в схеме (рисунок 4.6). Подключение  $R_{д}$  происходит с помощью транзистора VT2, работающего от источника Constant3, который при соответствующем положении ключа Manual Switch периодически подключает дополнительное сопротивление  $R_{д}$  параллельно сопротивлению нагрузки  $R_{н}$ . На рисунке 4.9 приведены осциллограммы напряжения и тока на выходе ИСГ при внезапном набросе нагрузки из режима, близкого к холостому ходу  $I_{н}\approx 0,5$  А, в режим, близкий к короткому замыканию  $I_{н}\approx 140$  А.

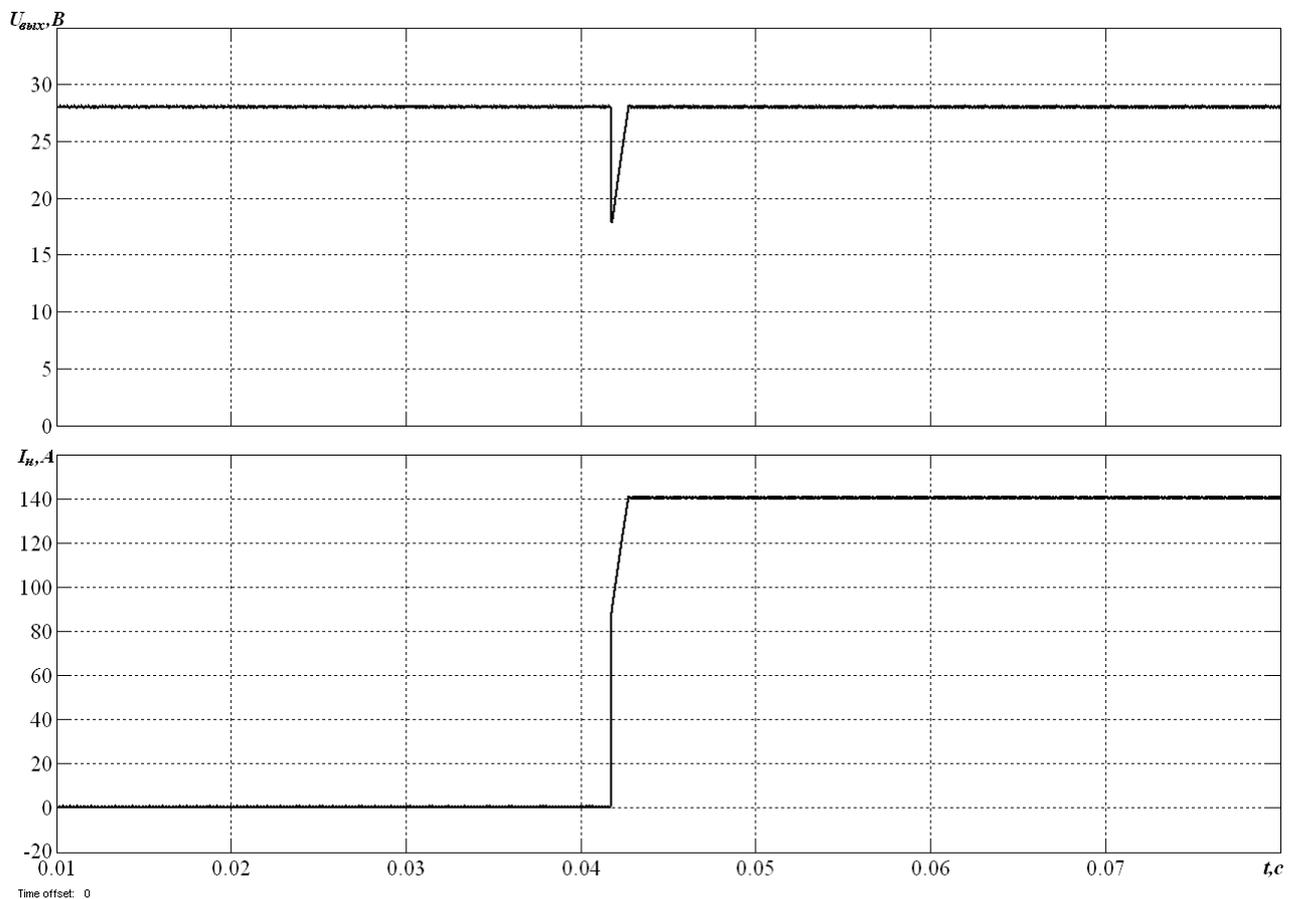


Рисунок 4.9 - Осциллограммы напряжения и тока при внезапном набросе нагрузки (моделирование)

Анализ осциллограмм показал, что при внезапном набросе нагрузки в момент подключения дополнительного сопротивления  $R_{д}$  наблюдается кратковременный провал выходного напряжения величина которого составляет 35%, а длительность

не превышает 2 мс. Этот провал обусловлен тем, что наброс нагрузки в модели осуществляется идеальным коммутирующим элементом (транзистором VT2) и при этом не учитывается реальная индуктивность бортовой сети ТС или автономного объекта. На реальном объекте указанные провалы напряжения снижаются до допустимого для бортовой сети ТС или автономного объекта уровня.

Следует заметить, что моделирование переходных процессов ИСГ служит также проверкой правильности выбора параметров ИРН с точки зрения обеспечения быстродействия и точности поддержания выходного напряжения в системе стабилизации.

#### 4.2 Моделирование работы ИСГ в режиме пуска ДВС

В режиме пуска ДВС базовая ЭМ СГУ, представляет собой синхронный двигатель с магнитоэлектрическим возбуждением [7,8,12]. Такие двигатели в зависимости от построения системы управления и формы магнитной индукции в рабочем зазоре разделяются на два типа: вентильные двигатели с постоянными магнитами (ВДПМ) [2,12] и БДПТ [16,22,91,95]. БДПТ – устройства, в которых магнитоэлектрическая синхронная машина с трапецеидальным распределением магнитного поля в воздушном зазоре включена в замкнутую систему с использованием датчиков положения ротора (ДПР) и полупроводникового коммутатора. В режиме пуска ДВС ИСГ работает как БДПТ [52,59,65,66,98].

Функциональная схема ИСГ в стартерном режиме приведена на рисунке 4.10.

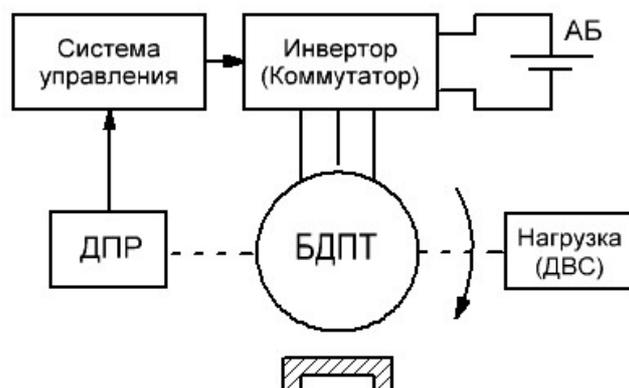


Рисунок 4.10 - Функциональная схема стартерного режима работы ИСГ



#### 4.2.1 Математическая модель ИСГ в двигательном режиме

Обзор литературных источников [69,91,95,108,110] показывает, что в настоящее время достаточно полно разработаны математические модели для ВДПМ и отсутствуют математические модели многополюсных БДПТ, отражающие процессы электромеханического преобразования энергии в стартерном режиме работы ИСГ. Отсутствие или недостаточная полнота последних частично объясняется частично двойственной природой БДПТ, а именно сходством с характеристиками коллекторной машины постоянного тока при его математическом представлении как машины переменного тока. Это обстоятельство обуславливает различные подходы к анализу статических и динамических режимов его работы. Известные модели анализа двигательного режима ИСГ на базе СМПМ описывают электрическую машину как квазинепрерывную систему с импульсными воздействиями и требуют для анализа квазиустановившихся процессов применения метода коммутационных функций, использования операторно-рекуррентного анализа [21], что является трудоемким и не всегда адекватно отражает процессы электромеханического преобразования энергии, происходящие в двигательном режиме работы ИСГ.

При разработке математической модели ИСГ [56] были приняты допущения:

- насыщение магнитопроводов отсутствует;
- магнитные потоки рассеяния, создаваемые постоянными магнитами ротора, минимальны и не учитываются;
- потери на гистерезис и вихревые токи отсутствуют;
- в процессе пуска ДВС ИСГ работает в диапазоне угловых скоростей от 0 до  $20 \div 40$  рад/с;
- коммутационный интервал значительно меньше межкоммутационного и не учитывается при выводе уравнений;
- взаимные индуктивности между фазами обмотки статора пренебрежимо малы.

С учетом сделанных допущений электромагнитные процессы ИСГ в фазных координатах описываются следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} u_A = R_s i_A + L_s \frac{di_A}{dt} + e_A \\ u_B = R_s i_B + L_s \frac{di_B}{dt} + e_B \\ u_C = R_s i_C + L_s \frac{di_C}{dt} + e_C \end{cases} \quad (4.9)$$

где  $u_A, u_B, u_C$  – фазные напряжения;  $i_A, i_B, i_C$  – фазные токи;  $e_A, e_B, e_C$  – фазные ЭДС вращения обмоток статора;  $R_s, L_s$  – активное сопротивление и индуктивность.

При постоянной угловой скорости ротора форма фазных ЭДС вращения  $e_k$ , индуцированных в статорных обмотках будет подобна кривой распределения индукции  $B_\delta(\theta_{эл})$  в воздушном зазоре [95]:

$$e_k = -\frac{d\Psi_{mk}(\theta_{эл})}{dt} = -\frac{d\Psi_{mk}(\theta_{эл})}{d\theta_{эл}} \cdot \frac{d\theta_{эл}}{dt} = C_k B_\delta(\theta_{эл}) \cdot \omega_{эл}, \quad (4.10)$$

где  $\omega_{эл} = \frac{d\theta_{эл}}{dt}$  – электрическая угловая скорость ротора;  $\theta_{эл}$  – электрический угол поворота ротора относительно статора;  $C_k$  – конструктивная постоянная;  $\Psi_{mk}$  – потокосцепление постоянных магнитов с  $k$ -й обмоткой статора;  $B_\delta$  – магнитная индукция в воздушном зазоре.

Электромагнитный момент ИСГ:

$$M = \frac{P_{эм}}{\omega_r} = \frac{e_A i_A + e_B i_B + e_C i_C}{\omega_r}, \quad (4.11)$$

где  $\omega_r = \omega_{эл}/p$  – механическая угловая скорость ротора;  $P_{эм}$  – электромагнитная мощность;  $p$  – число пар полюсов.

Как видно из рисунка 3.14 (раздел 3), построенного с помощью программы ELCUT, магнитная индукция  $B_\delta$  в воздушном зазоре ИСГ с возбуждением от ПМ распределена трапецеидально и может быть в первом приближении аппроксимирована гладкой трапецией (рисунок 4.11).

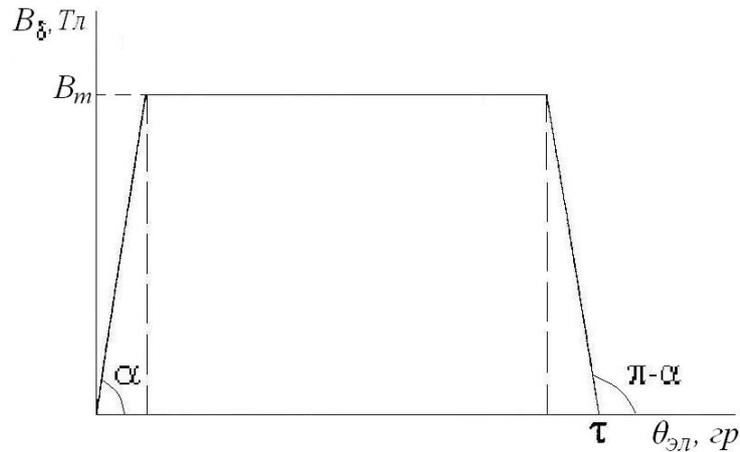


Рисунок 4.11 - Аппроксимирующая кривая индукции на одном полюсном делении

Поскольку распределение МДС и индукции повторяется на каждом периоде расточки машины, для получения исчерпывающего представления о поле взаимной индукции достаточно знать распределение МДС и  $B_\delta$  в модели ИСГ, представляющей собой двухполюсную электрическую машину.

Малые величины постоянных времени фазных обмоток по сравнению с длительностью межкоммутационного интервала позволяют не учитывать время нарастания и спада токов в фазах при коммутации и считать фазные токи в процессе пуска ДВС прямоугольными импульсами.

Из теории электрических машин известно, что моделью  $p$ -периодической машины является однопериодическая (двухполюсная) модель, в которой многопериодическая обмотка заменена эквивалентной однопериодической, имеющей то же число фаз, пазов на полюс и фазу [34]. На рисунке 4.12 представлены кривые аппроксимированных фазных токов и противоЭДС на периоде модели ИСГ.

С учетом вышесказанного длина окружности зазора в модели ИСГ равна  $2\tau$ . По сравнению с длиной окружности зазора в реальной машине она уменьшена в  $p$  раз. Поэтому диаметр зазора в модели должен быть также уменьшен в  $p$  раз и равен  $D/p$ . Угловой период обмотки модели в  $p$  раз больше, чем угловой период реальной многополюсной обмотки.

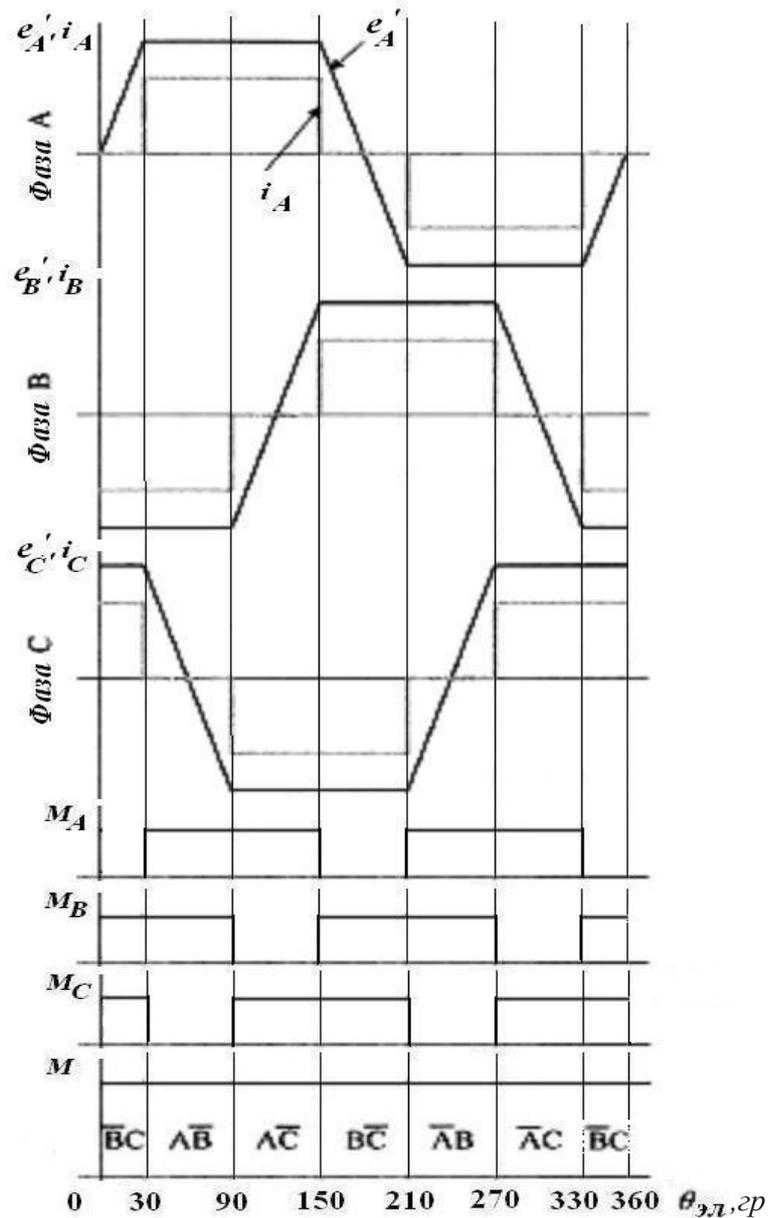


Рисунок 4.12 - Кривые токов, ЭДС и момента однопериодической модели ИСГ

Представленные на рисунке 4.12 аппроксимированные кривые фазных ЭДС при постоянной угловой скорости  $\omega_{эл}$  вращения имеют трапецеидальную форму и, следовательно, согласно выражению (4.10) кривые распределения магнитной индукции  $B_{\delta}(\theta_{эл})$  в воздушном зазоре повторяют форму ЭДС. Трапецеидальную функцию  $B_{\delta}(\theta_{эл})$  с наклоном ребер  $\alpha$  и  $(\pi - \alpha)$  электрических градусов в положительном полупериоде можно записать через разложение в ряд Фурье [13]:

$$B_{\delta_q}(\theta_{эл}) = \frac{4B_m}{\alpha\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1)\alpha}{(2n-1)^2} \cdot \sin(2n-1) \left[ \theta_{эл} - (k-1) \frac{2\pi}{3} \right], \quad (4.12)$$

где  $k$  – номер фазы обмотки статора:  $k=1$  – для фазы А,  $k=2$  – для фазы В,  $k=3$  – для фазы С;  $B_m$  – максимальное значение магнитной индукции в воздушном зазоре.

В ИСГ для реализации обратной связи по положению ротора необходимо осуществлять коммутацию фазных обмоток каждые  $60^\circ$  электрических градусов. Для этого используются три датчика Холла. ЭДС вращения вычисляется по известной формуле, называемой в отечественной и зарубежной литературе BLV законом (методом) [87,110]:

$$e_B = -w \cdot l \cdot v \frac{\partial}{\partial x} \int_{x_1}^{x_2} B_n dx = -w \cdot v \cdot l (B_{2n} - B_{1n}) \quad (4.13)$$

В нашем случае эта формула преобразуется к виду:

$$e(\theta) = w \cdot l \cdot v \frac{\partial}{\partial \theta} \int_{\theta_1}^{\theta_2} B(\theta) d\theta = w \cdot v \cdot l [B_2(\theta) - B_1(\theta)], \quad (4.14)$$

где  $v = \omega_r \frac{D}{2} = \omega_{эл} \frac{D}{2p}$  – линейная скорость вращения ротора.

Известно [34,110], что в обмотках с диаметральной шагом:  $B_1(\theta) = -B_2(\theta)$ , что приводит к выражению для ЭДС фазы:

$$e(\theta_{эл}) = 2w \cdot B_\delta(\theta_{эл}) \cdot l \cdot v = 2w \cdot B_\delta(\theta_{эл}) \frac{l \cdot D}{2p} \omega_{эл} = w \cdot B_\delta(\theta_{эл}) \cdot D \cdot l \cdot \omega_r, \quad (4.15)$$

где  $w$  – число витков в фазных обмотках статора.

Поставляя в полученное выражение (4.15) аппроксимированное значение  $B_{\delta_q}(\theta_{эл})$  из (4.12) получим следующие выражения для фазных ЭДС вращения:

$$\begin{cases} e'_A(\theta_{эл}) = k_{01} w \cdot D \cdot l \cdot B_m \left[ \frac{4}{\alpha \cdot \pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1)\alpha}{(2n-1)^2} \cdot \sin(2n-1)\theta_{эл} \right] \omega_r \\ e'_B(\theta_{эл}) = k_{01} w \cdot D \cdot l \cdot B_m \left[ \frac{4}{\alpha \cdot \pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1)\alpha}{(2n-1)^2} \cdot \sin(2n-1) \left( \theta_{эл} - \frac{2\pi}{3} \right) \right] \omega_r \\ e'_C(\theta_{эл}) = k_{01} w \cdot D \cdot l \cdot B_m \left[ \frac{4}{\alpha \cdot \pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1)\alpha}{(2n-1)^2} \cdot \sin(2n-1) \left( \theta_{эл} - \frac{4\pi}{3} \right) \right] \omega_r \end{cases} \quad (4.16)$$

где  $k_{0l}$  – обмоточный коэффициент,  $\Psi_m = k_{0l} w \cdot D \cdot l \cdot B_m$  – амплитуда потокосцепления постоянных магнитов с обмотками статора.

Введем функции  $f_A(\theta_{эл})$ ,  $f_B(\theta_{эл})$ ,  $f_C(\theta_{эл})$ , которые описывают изменение трапецеидальных ЭДС в фазах в зависимости от положения ротора с предельными значениями от -1 до 1:

$$\begin{cases} f_A(\theta_{эл}) = \frac{4}{\alpha \cdot \pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1)\alpha}{(2n-1)^2} \cdot \sin(2n-1)\theta_{эл} \\ f_B(\theta_{эл}) = \frac{4}{\alpha \cdot \pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1)\alpha}{(2n-1)^2} \cdot \sin(2n-1)\left(\theta_{эл} - \frac{2\pi}{3}\right), \\ f_C(\theta_{эл}) = \frac{4}{\alpha \cdot \pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1)\alpha}{(2n-1)^2} \cdot \sin(2n-1)\left(\theta_{эл} - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (4.17)$$

С учетом введённых обозначений имеем следующие выражения для ЭДС вращения однопериодической модели в фазах А, В, С:

$$\begin{cases} e'_A(\theta_{эл}) = \Psi_m \cdot f_A(\theta_{эл}) \cdot \omega_r \\ e'_B(\theta_{эл}) = \Psi_m \cdot f_B(\theta_{эл}) \cdot \omega_r \\ e'_C(\theta_{эл}) = \Psi_m \cdot f_C(\theta_{эл}) \cdot \omega_r \end{cases} \quad (4.18)$$

При переходе от однопериодической модели к  $p$ -периодической число катушек каждой фазы при последовательном соединении увеличивается в  $p$  раз.

Тогда соотношения для фазных ЭДС  $2p$  полюсной модели будут иметь вид:

$$\begin{cases} e_A = p e'_A(\theta_{эл}) \\ e_B = p e'_B(\theta_{эл}), \\ e_C = p e'_C(\theta_{эл}) \end{cases} \quad (4.19)$$

Подставляя соотношения для фазных ЭДС в (4.11) получим выражение для мгновенного значения электромагнитного момента ИСГ:

$$M = p \cdot \Psi_m \cdot f_A(\theta_{эл}) \cdot i_A + p \cdot \Psi_m \cdot f_B(\theta_{эл}) \cdot i_B + p \cdot \Psi_m \cdot f_C(\theta_{эл}) \cdot i_C = M_A + M_B + M_C, \quad (4.20)$$

где  $M_A$ ,  $M_B$ ,  $M_C$  – электромагнитные моменты, образуемые фазами А, В, С при протекании в них фазных токов

К полученным уравнениям следует добавить уравнение движения:

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = M - M_c, \quad (4.21)$$

где  $J$  – суммарный момент инерции системы ИСГ – ДВС;  $M_c$  – момент сопротивления на валу ИСГ в режиме пуска ДВС.

Полученные соотношения (4.9), (4.16), (4.19), (4.20), (4.21) описывают математическую модель ИСГ в стартерном режиме работы. Разработанная математическая модель позволяет осуществлять исследование работы ИСГ в режиме пуска ДВС: оценивать величины пусковых токов, протекающих по фазам инвертора и обмоткам статора, пускового момента, изучать динамику работы системы ИСГ – ДВС.

#### **4.2.2 Математическая модель стартерного режима ИСГ на основе уравнений эквивалентного БДПТ для анализа систем управления и регулирования**

Основной задачей ИСГ в стартерном режиме является достижение заданной частоты вращения – частоты запуска ДВС, при удовлетворительной динамике работы системы ИСГ-ДВС в целом.

При эксплуатации ИСГ наиболее распространенным является прямое включение в режиме пуска ДВС [3,23]. При прямом пуске статорные обмотки ИСГ через инвертор (коммутатор) подключаются на полное напряжение питания (напряжение АБ). Прямой пуск ДВС неблагоприятен для источника питания - АБ, при ограниченной емкости которой напряжение в ней падает на (30-40%), что нарушает работу как других потребителей в ТС и ДГУ автономных объектов. К недостаткам прямого пуска следует также отнести нерациональный расход емкости АБ из-за значительной неравномерности тока, низкий КПД (до 35%).

Предложенный автором (Патент РФ) [79] регулируемый запуск устраняет перечисленные недостатки и при этом дополнительно обеспечивает выбор люфтов в редукторе коробке передач при небольшой начальной частоте вращения. В режиме регулируемого пуска ИСГ с системой управления образует одноконтурную систему автоматического регулирования, замкнутую по скорости [4,52,55].

При синтезе регуляторов в системе управления приходится упрощать математическое описание ИСГ, заменяя его эквивалентным БДПТ. Обзор литературных источников [22,39,108,110] показал, что в настоящее время отсутствует строгое обоснование выбора и расчета параметров эквивалентных схем замещения. В известных схемах замещения эквивалентного ДПТ в их состав без должного обоснования включены такие параметры как постоянные момента  $\kappa_M$  и ЭДС  $e_E$ . В ряде работ проводится сравнительный анализ 2-фазных и 3-х фазных БДПТ с коллекторным ДПТ, дается определение  $\kappa_E$  для 3-х фазного БДПТ, как отношения линейного напряжения к угловой частоте вращения ротора  $\omega_r$ , но отсутствует вывод формулы.

Перечисленные недостатки известных моделей не могут обеспечить корректное, с достаточной степенью точности моделирование работы системы управления и ИСГ при пуске ДВС. Как следствие, возникла необходимость уточнения состава и обоснованного выбора параметров схемы замещения эквивалентного БДПТ для обеспечения адекватного моделирования процесса запуска ДВС посредством ИСГ.

На основании принципа действия 3-х фазного БДПТ [91,95] в установившемся режиме на протяжении углового интервала в 60 эл. град. токи, имеющие одинаковую амплитуду, протекают только по двум фазным обмоткам, причем ЭДС фаз (например, А и В)  $e_A$  и  $e_B$ , через которые протекают токи имеют тот же знак, что и знак протекающих токов (рисунок 4.12). С учетом вышеизложенного выражение для момента (4.20) может быть дополнительно упрощено и для межкоммутационного 60 - градусного интервала, когда к источнику напряжения подключены фазные обмотки А и В преобразуется к виду [57,58]:

$$M = M_A + M_B = 2p \cdot \Psi_m \cdot i_A = \kappa_M \cdot i, \quad (4.22)$$

где  $i$  – установившейся ток, протекающий в двух фазах, подключенных к источнику питания в течении межкоммутационного интервала;  $\kappa_M = 2p\Psi_m$  – постоянная момента;  $p$  – число пар полюсов ИСГ.



Для остальных межкоммутационных интервалов работы, когда подключены фазные обмотки: А и С, В и С, выражение для момента аналогично (4.22).

Полагая коммутацию фаз мгновенной, в каждый момент времени к источнику питания подключены две фазы 3-х фазного ИСГ. Для случая, когда подключены обмотки фаз А и В, уравнение электрического равновесия для контура источник питания – фаза А – фаза В

$$U_{AB} = U_d = 2R_s i + 2L_s \frac{di}{dt} + e_{AB} = R_a i + L_a \frac{di}{dt} + \kappa_E \omega_r, \quad (4.23)$$

где  $U_d$  – напряжение питания коммутатора;  $U_{AB} = U_A - U_B$  – линейное напряжение между фазами А и В;  $R_a = 2R_l$  – суммарное активное сопротивление двух фаз;  $L_a = 2L_l$  – эквивалентная индуктивность обмоток двух фаз;  $e_{AB}$  – амплитудное значение ЭДС фаз А и В.

$$e_{AB} = (e_A - e_B) = 2|e_A| = 2p\Psi_m \omega_r = \kappa_E \omega_r, \quad (4.24)$$

где  $\kappa_E$  – постоянная ЭДС, равная отношению амплитудного значения линейной ЭДС  $e_{AB}$  к угловой частоте вращения ротора  $\omega_r$ .

Для остальных межкоммутационных интервалов, составляющих 60 эл. градусов по углу поворота, когда к источнику питания  $U_d$  подключены одна из фаз А, В и новая фаза, соотношения (4.23), (4.24), записанные для других комбинаций фаз аналогичны. Таким образом, на протяжении каждого периода работы стартера:

$$\kappa_E = \kappa_M = 2p\Psi_m \quad (4.25)$$

На основании изложенного эквивалентный БДПТ, замещающий реальный ИСГ будет описываться следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} U_d = L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + \kappa_E \omega_r, \\ J \frac{d\omega_r}{dt} = M - M_n, \\ M = \kappa_M i; e_a = e_{AB} = \kappa_E \omega_r. \end{cases}, \quad (4.26)$$

Полученная система уравнений позволяет осуществлять моделирование ИСГ в режиме пуска ДВС.

### 4.2.3 Моделирование стартерного режима без ограничения тока статора

Представим уравнения (4.26) в операторной форме:

$$\begin{cases} U_d(s) = R_a(T_\gamma s + 1) \cdot i(s) + \kappa_E \omega_r(s) \\ M(s) = \kappa_M \cdot i(s) \\ J \cdot s \cdot \omega_r(s) = M(s) - M_H(s) \\ e_\gamma(\omega) = \kappa_E \omega_r(s) \end{cases} \quad (4.27)$$

где  $T_\gamma = \frac{L_a}{R_a}$  – электромагнитная постоянная времени.

В соответствии с системой уравнений (4.27) построена структурная схема эквивалентного БДПТ замещающего ИСГ (рисунок 4.13).

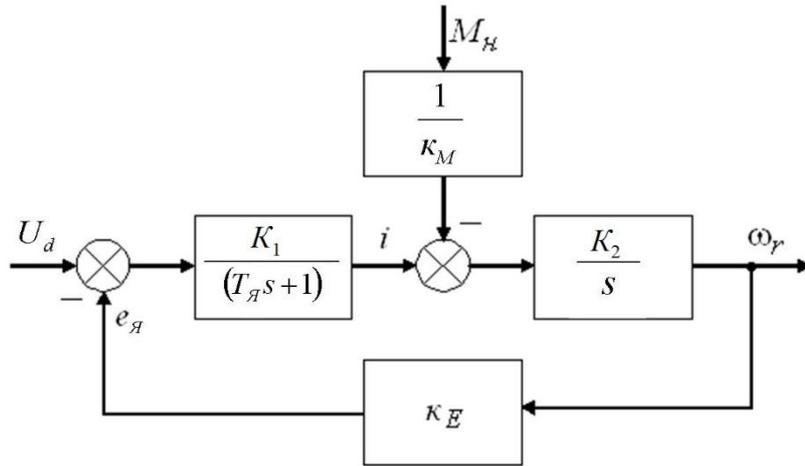


Рисунок 4.13 - Структурная схема эквивалентного БДПТ, замещающего ИСГ

На рисунке 4.13  $K_1 = \frac{1}{R_a}$ ,  $K_2 = \frac{\kappa_M}{J}$  – постоянные коэффициенты в уравнениях.

Анализ структурной схемы показывает, что передаточная функция скоростного контура ИСГ по управляющему воздействию может быть представлена выражением:

$$W(s) = \frac{\omega_r(s)}{U_d(s)} = \frac{\frac{1}{\kappa_E}}{\frac{T_\gamma}{K_1 K_2 \kappa_E} s^2 + \frac{1}{K_1 K_2 \kappa_E} s + 1}. \quad (4.28)$$

Корни характеристического уравнения определяются следующим выражением:

$$s_{1,2} = -\frac{1}{2T_{я}} \pm \frac{1}{2T_{я}} \sqrt{1 - 4T_{я}K_1K_2\kappa_E}, \quad (4.29)$$

где:  $T_M = \frac{1}{K_1K_2\kappa_E} = \frac{R_a J}{\kappa_M \kappa_E}$  – электромеханическая постоянная времени.

Корни характеристического уравнения являются вещественными, так как выполняется условие  $4T_{я}K_1K_2\kappa_E < 1$ . В этом случае передаточная функция ИСГ по управляющему воздействию может быть представлена в виде двух последовательно включенных аperiodических звеньев первого порядка с постоянными времени  $T_1, T_2$  и коэффициентом передачи  $1/\kappa_E$  и записана в виде:

$$W(s) = \frac{1}{\kappa_E (T_1s + 1)(T_2s + 1)}, \quad (4.30)$$

где  $T_1 = -\frac{1}{s_1}, T_2 = -\frac{1}{s_2}$  – постоянные времени.

Структурная схема одноконтурной системы регулирования по скорости ИСГ показана на рисунке 4.14.

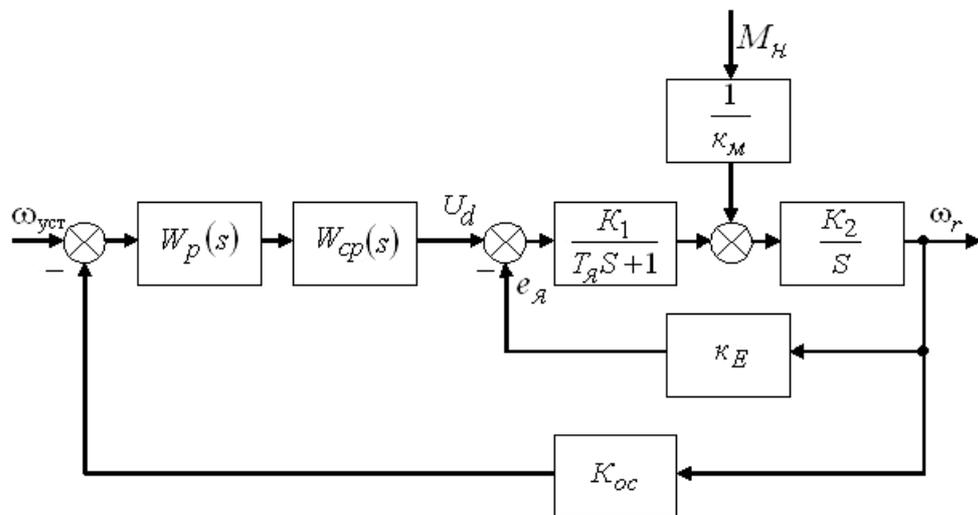


Рисунок 4.14 - Структурная схема одноконтурной системы ИСГ

ИСГ управляется от силового регулятора, представленного звеном  $W_{cp}$  и регулятора скорости с передаточной функцией  $W_p(s)$ , на вход которого подается разность сигнала управления и обратной связи по скорости. Силовой регулятор представляет собой управляемый источник постоянного напряжения и инвертор, питающий статорные обмотки ИСГ.

Поскольку  $T_2 \gg T_1$  целесообразно использовать в качестве регулятора скорости ПИ-регулятор, который компенсировал бы большую постоянную времени ( $T_2$ ) объекта регулирования – ДВС [41,79,80]. Передаточная функция ПИ-регулятора:

$$W_p(s) = \frac{(T_2s + 1) \cdot K_p}{T_2s} = K_p + \frac{K_p}{T_2s} = K_{II} + \frac{K_{II}}{s} \quad (4.31)$$

Передаточная функция разомкнутой системы запишется как:

$$W_{раз}(s) = \frac{(T_2s + 1)K_{cp}K_pK_{oc}}{T_2s} \frac{1}{\kappa_E} \frac{1}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} = \frac{K_{cp}K_pK_{oc}}{T_2s(T_1s + 1)\kappa_E} \quad (4.32)$$

Оптимум по модулю достигается при выполнении условия:

$$\frac{T_2\kappa_E}{K_{cp}K_pK_{oc}} = 2T_1 \quad (4.33)$$

Коэффициенты передачи пропорциональной и интегральной части регулятора:

$$K_{II} = K_p = \frac{T_2\kappa_E}{2T_1K_{cp}K_{oc}}; K_{II} = \frac{K_p}{T_2} \quad (4.34)$$

Параметры рассматриваемого ИСГ:  $R_a = 8 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$ ,  $L_a = 160 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$ ,  $\Psi_m = 0,133 \text{ Вб}$ ,  $J = 10 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ,  $p = 6$ ,  $\kappa_0 \cdot w_a = 24$ ,  $M_{н0} = 120 \text{ Н} \cdot \text{м}$ . При  $K_{cp} = 10$ ,  $K_{oc} = 0,1$  параметры ПИ-регулятора будут равны  $K_{II} = 0,32$ ;  $K_{II} = 32 \text{ с}^{-1}$ .

Модель синхронной машины, возбуждаемой от постоянных магнитов, с трапецеидальным распределением магнитного поля в зазоре, представленная в системе Matlab Simulink, состоит из двух частей – электромагнитной и электромеханической [60]. Наличие в библиотеке пакета Sim Power System

виртуальных моделей: БДПТ (PMSM), 3-х фазного инвертора, управляемого источника напряжения, позволяет использовать виртуальные (имитационные) модели для исследования динамических характеристик ИСГ в режиме пуска ДВС [61].

Модель замкнутой системы ИСГ–ДВС показана на рисунке 4.15.

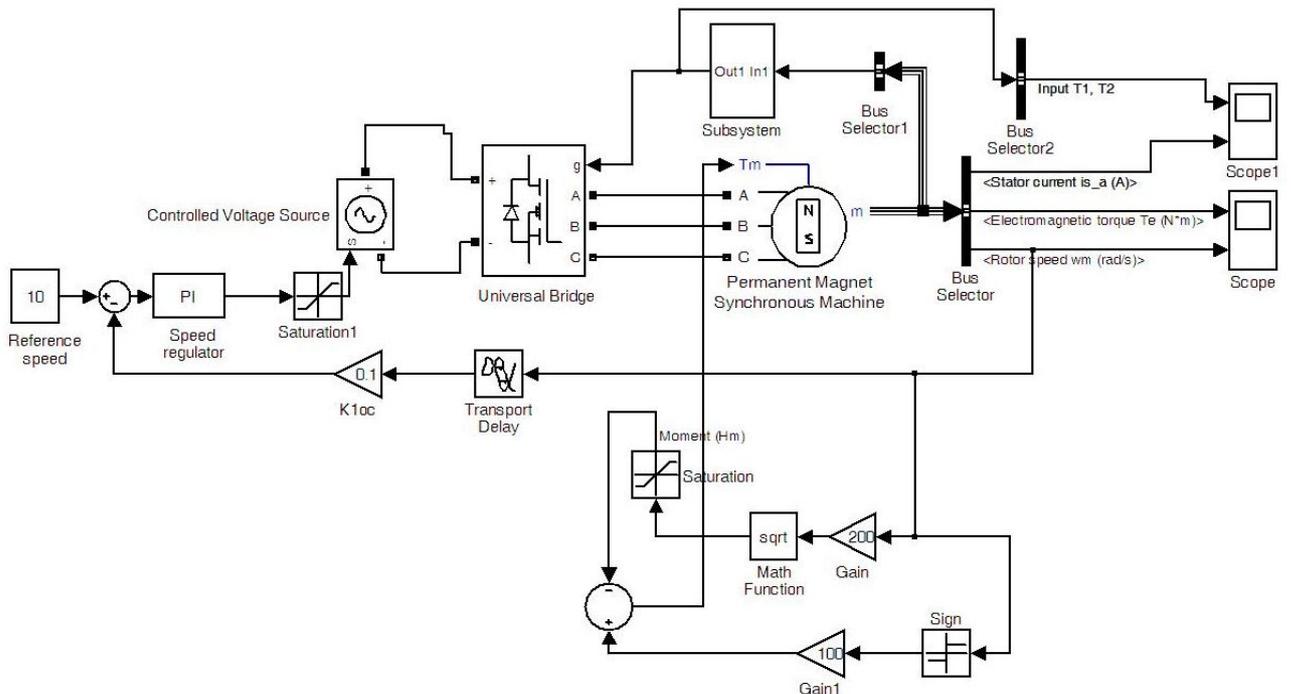


Рисунок 4.15 - Имитационная модель ИСГ в стартерном режиме

Допущения, принятые при моделировании:

- напряжение АБ постоянно и не зависит от нагрузки ИСГ;
- ИСГ симметричен в магнитном отношении, потери в стали не учитываются;
- реакция якоря отсутствует;
- 3-х фазный инвертор, выполняющий роль коммутатора, идеализирован, т.е. силовые транзисторные ключи имеют большое сопротивление (0,5 МОм) в закрытом состоянии, а их сопротивление в открытом состоянии имеет малое значение ( $10^{-3}$  Ом);
- величина напряжения питания инвертора при работе в пусковом режиме учитывает падение напряжения на АБ и в проводах, соединяющих ИСГ и АБ;

– при моделировании механической нагрузки на валу ИСГ учитывается среднее значение момента сопротивления  $M_c$  ДВС.

– угол опережения коммутации ключей инвертора  $\beta_0=0$ .

Модель содержит:

– синхронную магнитоэлектрическую машину с трапецеидальным распределением поля в зазоре (PMSM);

– блоки BusSelector1, Subsystem, служащие для измерения трех логических сигналов с датчиков Холла и получения сигналов управления 3-х фазным инвертором (коммутатором);

– 3-х фазный инвертор (Universal Bridge), выполняющий роль коммутатора;

– источник напряжения (Controlled Voltage Source), управляемый от регулятора скорости (PC) через блок ограничения напряжения (Saturation1). Управляемый источник напряжения моделирует работу высокочастотного ( $f=4\text{кГц}$ ) широтно-импульсного регулятора (ШИР). Напряжение на его выходе пропорционально средней величине напряжения на выходе реального ШИР, прикладываемого к обмоткам ИСГ;

– блок ограничения напряжения (Saturation1) на выходе PC моделирует насыщение, обусловленное конечной величиной напряжения питания от АБ;

– модель нагрузки, состоящая из двух звеньев: сухого трения (Sign), имитирующего среднее значение стартового крутящего момента (ST) и звена, имитирующего снижение стартового крутящего момента до рабочего (ET) [25].

Переходные процессы в замкнутой одноконтурной системе регулирования частоты вращения по моменту и скорости при подаче входного (управляющего) сигнала и появлении возмущения (момента сопротивления на валу ИСГ) в момент времени  $t=0$ , представлены осциллограммами на рисунках 4.16 – 4.18.

Анализ полученных в ходе моделирования осциллограмм показал достаточную величину пускового момента для проворота вала ДВС.

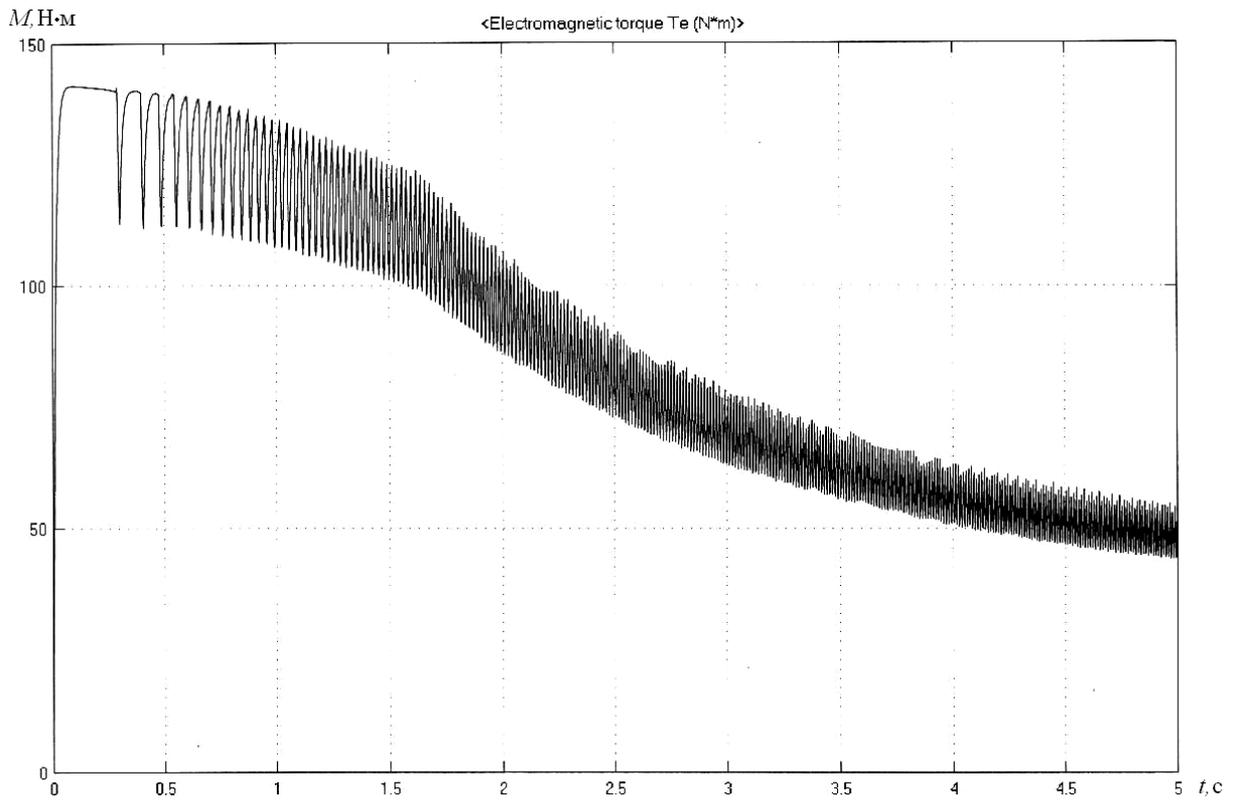


Рисунок 4.16 - Электромагнитный момент ИСГ

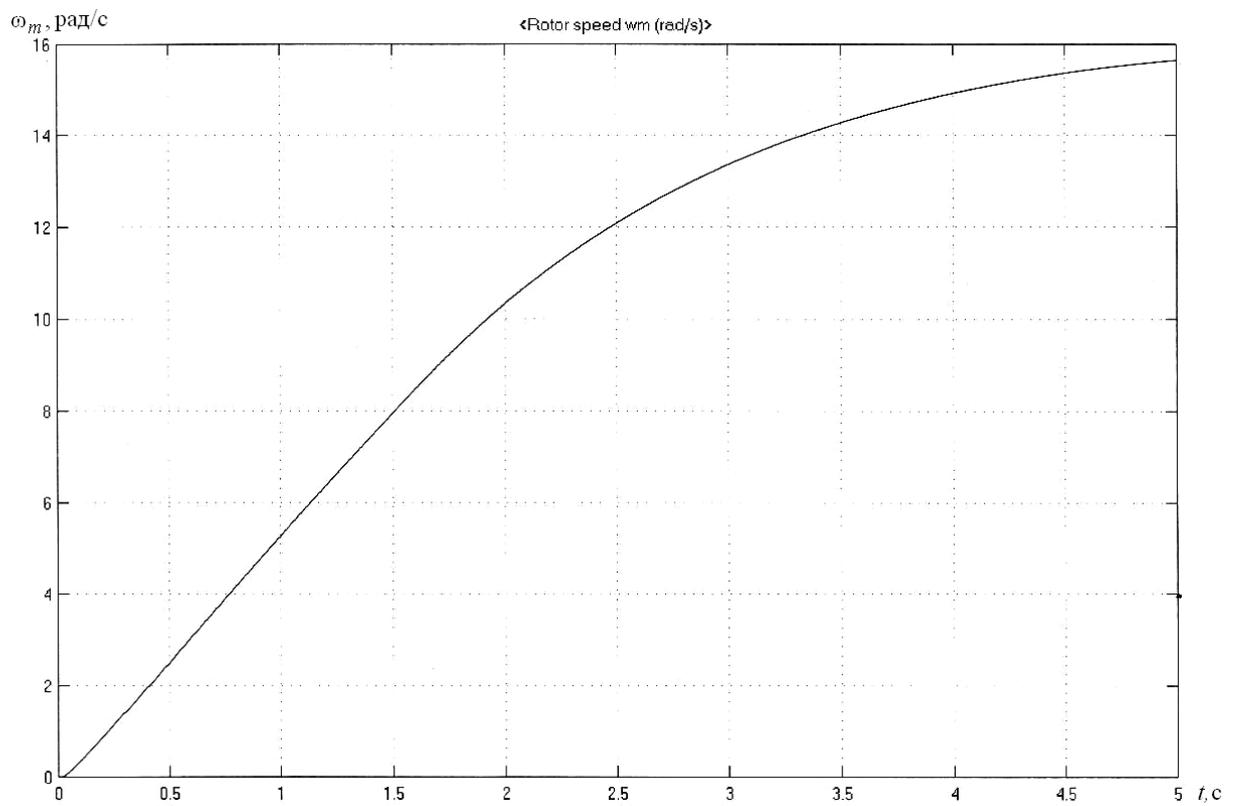


Рисунок 4.17 - Частота вращения ИСГ

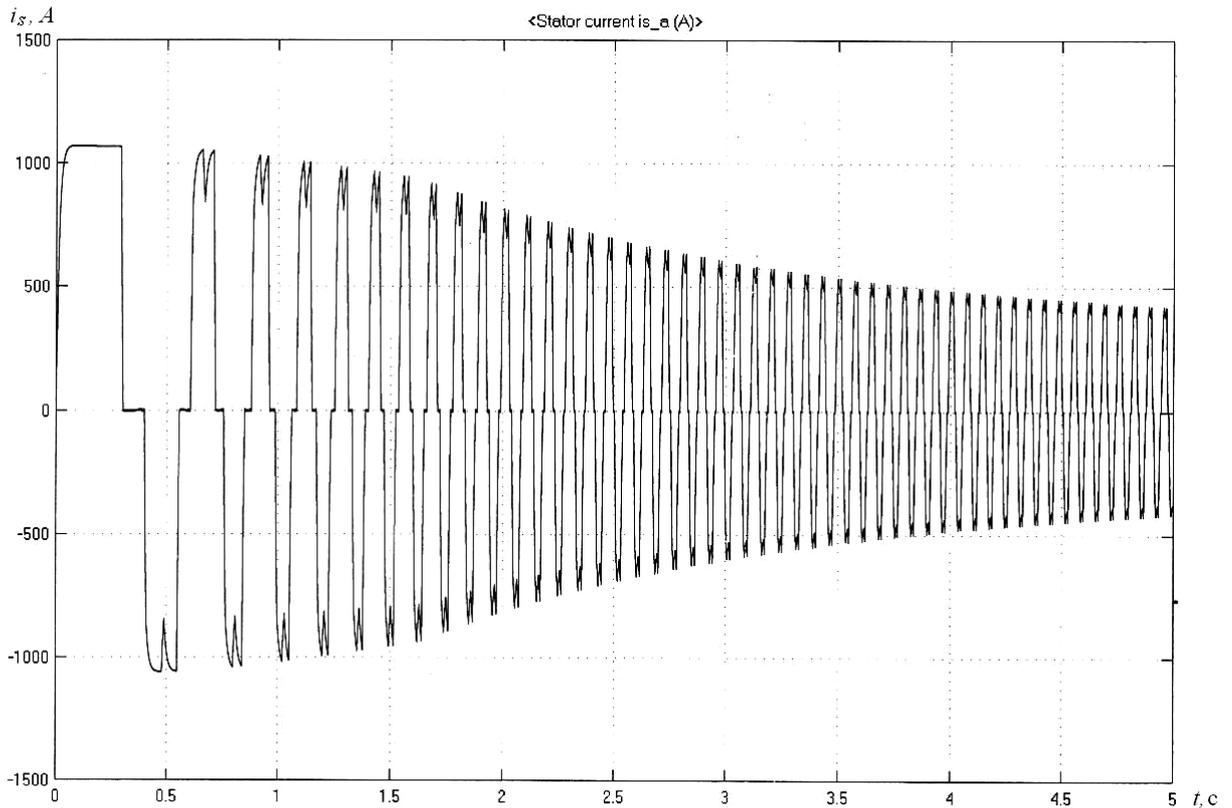


Рисунок 4.18 - Ток в фазе статора ИСГ

Частота вращения ИСГ в режиме пуска достигает значения  $\omega = 14,3 \text{ рад/с}$  ( $n \approx 150 \text{ мин}^{-1}$ ) за 3,5с от момента начала пуска, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к электропусковым системам ТС. Величина пускового тока превышает 1000А, что негативно сказывается на бортовых потребителях и АБ.

#### 4.2.4 Моделирование стартерного режима с ограничением тока статора

При исследовании работы системы электропуска, рассмотренной ранее, отмечено наличие значительных пусковых токов в фазах ИСГ в начальной стадии пуска. Это обстоятельство потребовало проведения дополнительных исследований для реализации ограничения величины пускового тока ИСГ. Основным назначением ИСГ при пуске ДВС является достижение заданной частоты вращения коленчатого вала при скомпенсированной постоянной времени объекта регулирования с учетом ограничения пускового тока [41,54,79].

Для синтеза регулятора скорости приходится упрощать математическое описание ИСГ, заменяя его эквивалентным двигателем постоянного тока, что и



было сделано ранее при реализации одноконтурной системы регулирования.

Структурная схема эквивалентной 2-х контурной системы с нелинейной обратной связью по току показана на рисунке 4.19 [63].

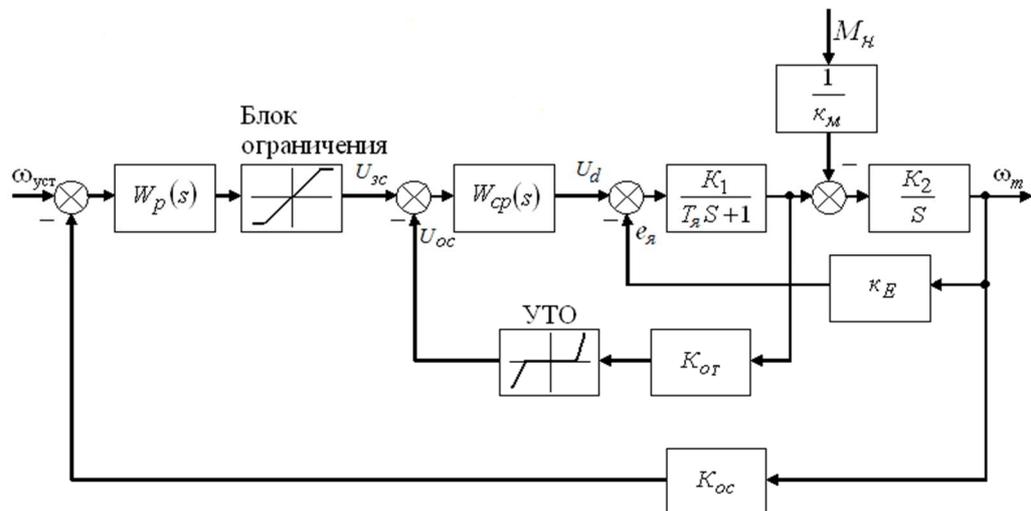


Рисунок 4.19 - Структурная схема эквивалентной 2-х контурной системы регулирования ИСГ

Нелинейность приводит к разделению области электромеханической характеристики на две зоны 1 и 2 (рисунок 4.20).

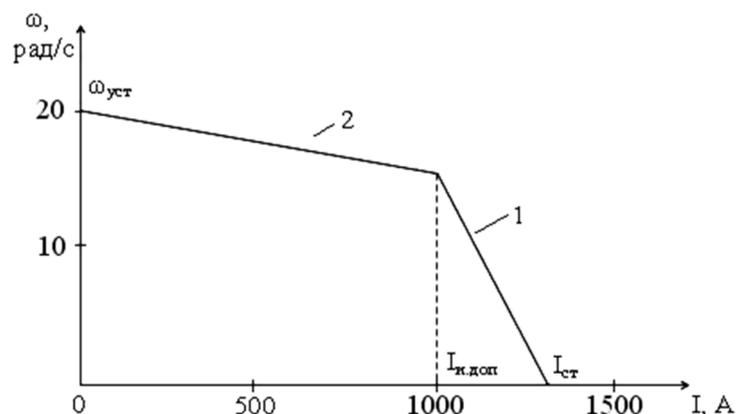


Рисунок 4.20 - Электромеханическая характеристика ИСГ при моделировании пуска ДВС с ограничением тока:  $\omega_{уст}=20$  рад/с ( $n \approx 200$  мин<sup>-1</sup>);  $I_{и.доп}=1000$  А

На первом этапе пуска (зона 1,  $I_{и} \geq I_{и доп}$ , где  $I_{и доп}$  – допустимый ток инвертора) действует нелинейная обратная связь по току, которая ограничивает пусковой ток ИСГ. На втором этапе (зона 2,  $I_{и} < I_{и доп}$ ) действует только обратная связь по угловой скорости, обеспечивая требуемое нарастание скорости вращения ИСГ.



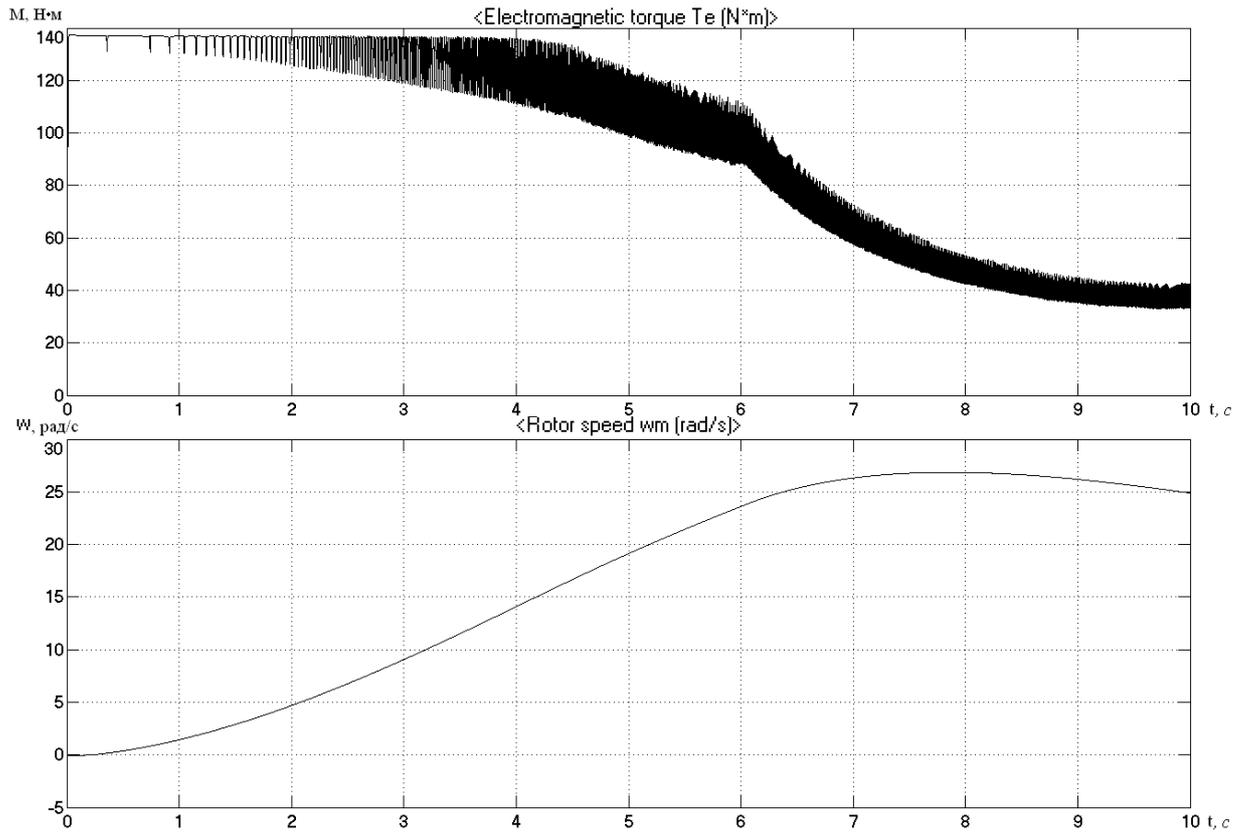


Рисунок 4.22 - Момент и частота вращения ИСГ в системе с ограничением пускового тока

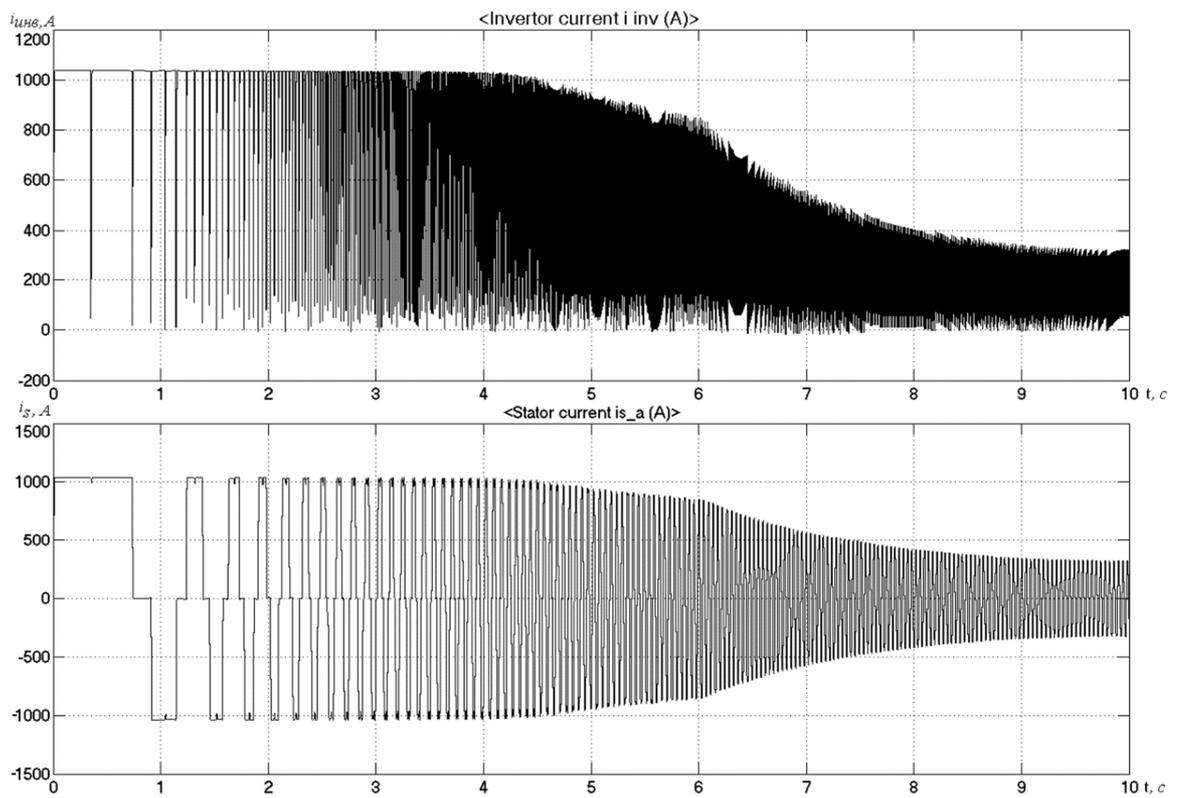


Рисунок 4.23 - Токи инвертора и фазы статора

Анализ полученных осциллограмм процесса пуска показывает, что время достижения заданной частоты  $\omega=20$  рад/с ( $n\approx 200$  мин<sup>-1</sup>) при ограничении пускового тока составляет 5,2с, что на 0,8с больше, чем время без ограничения пускового тока и в общем, это время удовлетворяет требованиям, предъявляемым к времени пуска ДВС электропусковыми системами ТС. При этом пусковой ток, протекающий через инвертор и фазы обмотки статора ИСГ не превышает допустимого значения  $I_{don} = 1000$  А.

### **Выводы по 4 разделу**

По результатам проведенных в четвертом разделе аналитических исследований и численных расчетов ИСГ с магнитоэлектрическим возбуждением в составе систем автоматической стабилизации напряжения в генераторном режиме и регулирования частоты вращения в режиме стартера можно сделать следующие выводы:

1. Разработанная математическая модель ИСГ позволяет анализировать установившиеся и переходные режимы его работы с приемлемой точностью, что подтверждено численным моделированием работы ИСГ и сравнением результатов расчета по аналитической методике и экспериментальных данных.

2. Имитационным моделированием работы ИСГ со стабилизацией выходного напряжения интегральным регулятором установлено, что ИСГ при работе генератором является практически безынерционным звеном относительно возмущающего воздействия (скачков нагрузки), обладая малой электромагнитной постоянной времени ( $t_{\text{пн}}$  не превышает 2 мс).

3. Получены соотношения, позволяющие рассчитывать параметры ИСГ и регулятора напряжения, обеспечивающие работу в режиме непрерывного тока в замкнутой системе стабилизации выходного напряжения

4. Разработаны математическая модель, описывающая электромеханическое преобразование энергии в стартерном режиме работы ИСГ, и модель эквивалентного БДПТ, замещающая ИСГ при расчете параметров системы регулирования частоты вращения и моделировании процесса запуска ДВС.

5. Предложены структурные схемы одноконтурной и двухконтурной систем автоматического регулирования скорости ИСГ, на основе которых разработаны их имитационные модели. Результаты моделирования процесса пуска ДВС показали, что ИСГ обеспечивает требуемые значения момента и времени запуска как в системе без ограничения пускового тока, так и с ограничением тока. На технические решения, реализованные в соответствии разработанными моделями, получены патенты РФ.

## 5. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИСГ

Данный раздел посвящен практической реализации действующего образца интегрированного стартер-генератора и экспериментальной верификации теоретических положений и выводов диссертационной работы.

### 5.1 Опытный образец и практическая реализация систем управления

В рамках инициативной НИР кафедры «ЭМАЭ» СамГТУ был спроектирован и изготовлен с участием индустриального партнера ООО «НОТОР» опытный образец ИСГ (рисунок 5.1) с системой управления (рисунок 5.2), предназначенный для системы электроснабжения вспомогательной ДГУ автономных объектов и ТС. Основные характеристики и геометрические размеры опытного образца ИСГ приведены в таблице 3.5.

ИСГ осуществляет запуск дизельного двигателя, работая в стартерном режиме, и осуществляет выработку электроэнергии в генераторном режиме.

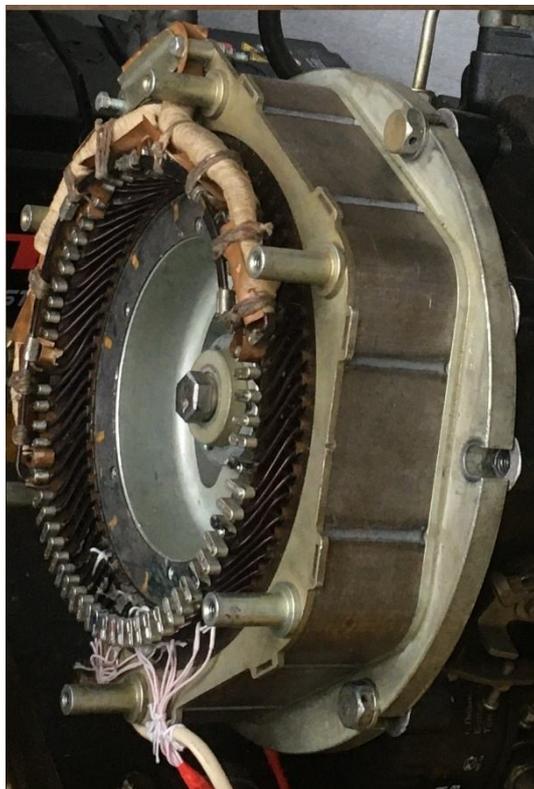


Рисунок 5.1 - Опытный образец ИСГ

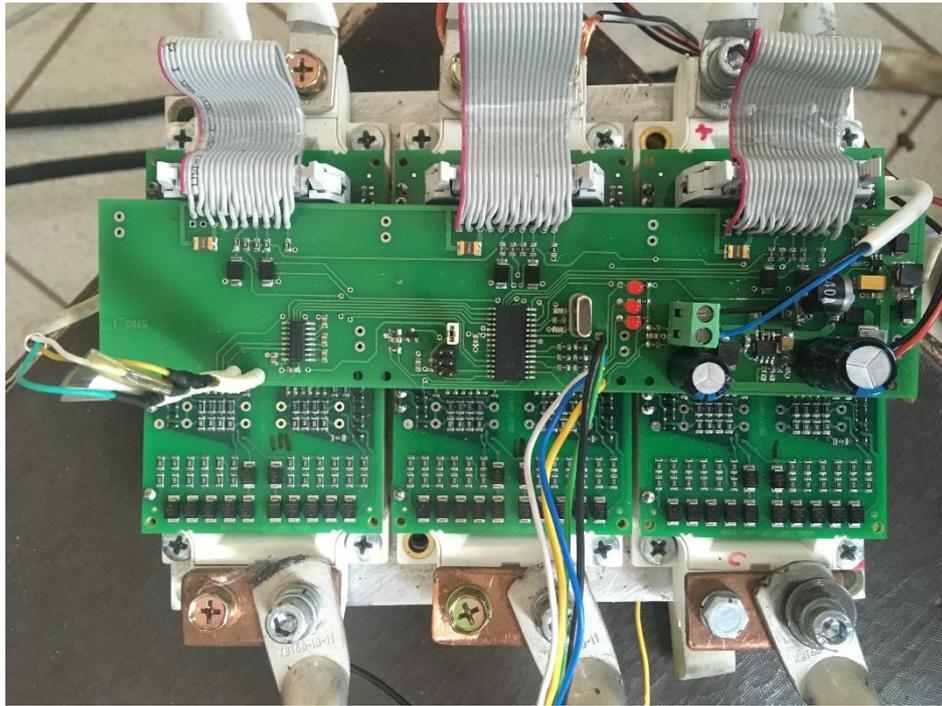


Рисунок 5.2 - Система управления ИСГ

### 5.1.1 Система регулирования ИСГ в генераторном режиме работы

На рисунке 5.3 приведена структурная схема ИСГ в генераторном режиме с системой стабилизации выходного напряжения.

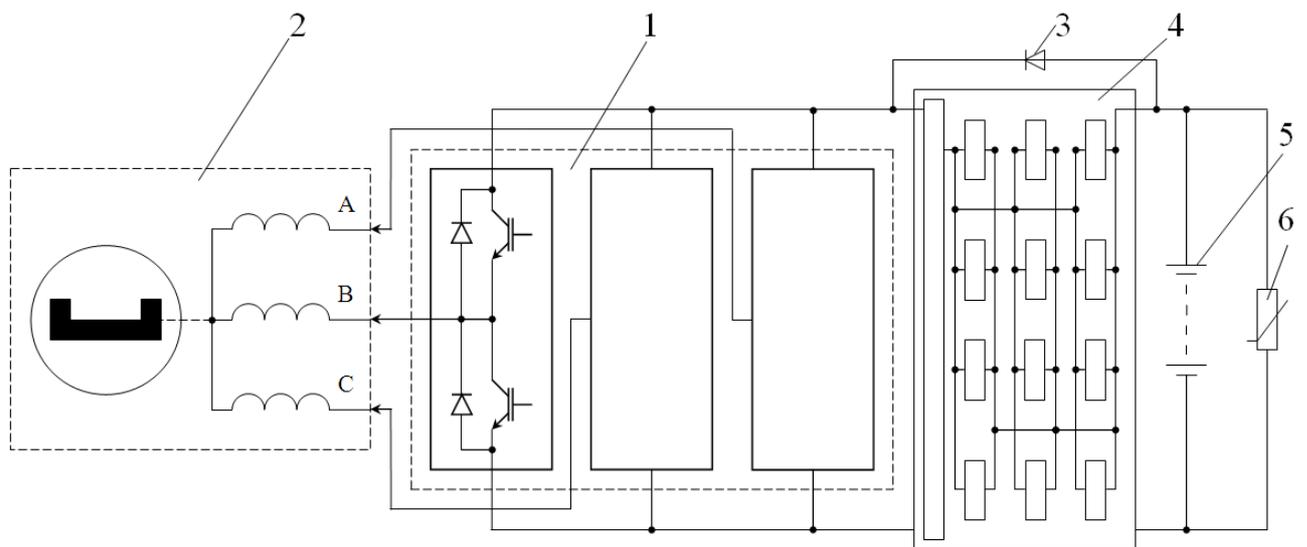


Рисунок 5.3 - Структурная схема ИСГ в генераторном режиме со стабилизацией выходного напряжения:

1 – выпрямитель (3 блока силовых полумостов); 2 – ИСГ; 3 – выпрямительный диод; 4 – проходной стабилизатор напряжения (плата согласования с 12 блоками); 5 – АБ; 6 – нагрузка

3-х фазный двухполупериодный выпрямитель выполнен на базе полумостов FF600K06ME3 (с функцией выпрямления).

Стабилизатор напряжения состоит из 12 блоков, работающих на общую нагрузку. Использовался стандартный стабилизатор PKY 400PI SERIES фирмы ERICSSON, электрическая схема которого показана на рисунке 5.4. Блок стабилизации имеет следующие параметры:  $U_{\text{ВХ}} = 36 \div 75 \text{ В}$ ;  $U_{\text{ВЫХ}} = 28,2 \text{ В}$ ;  $I_{\text{ВЫХ}} = 25\text{А}$ ;  $P_{\text{ВЫХ}} = 700 \text{ Вт}$ .

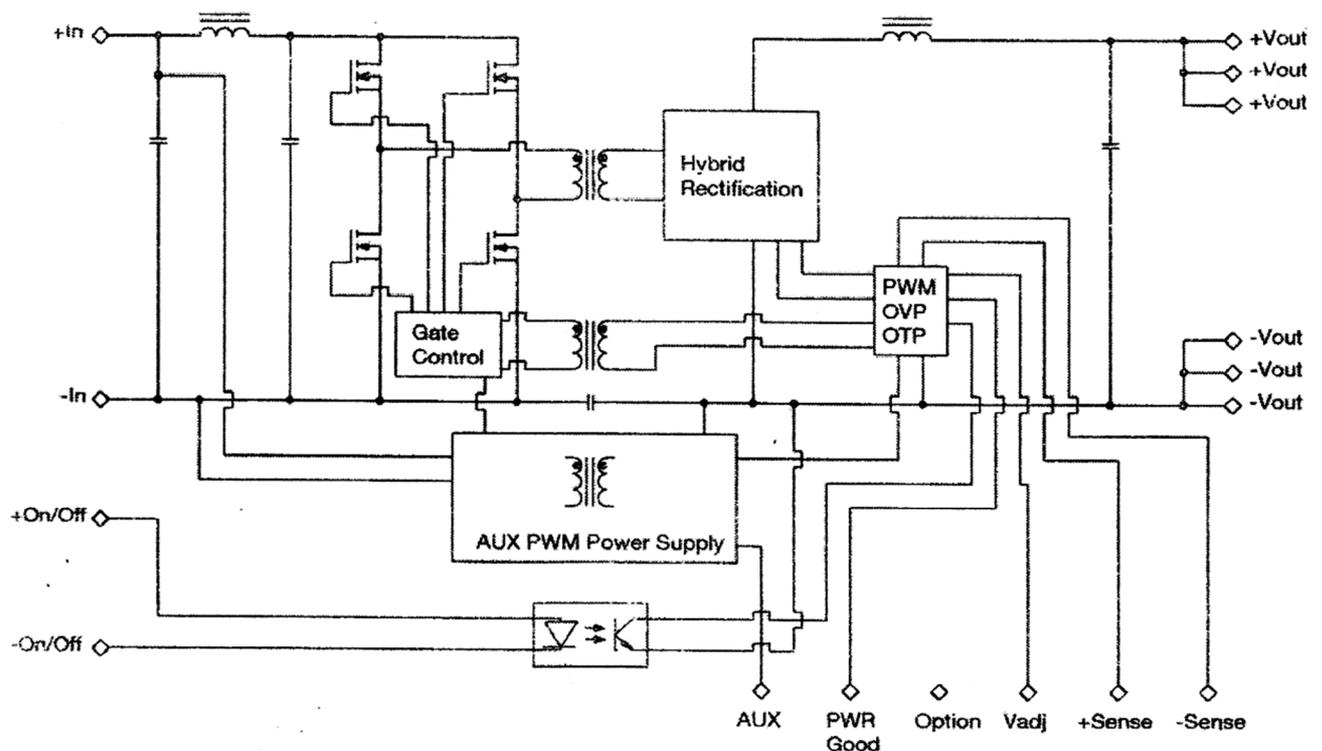


Рисунок 5.4 - Блок стабилизатора

### 5.1.2 Система управления в стартерном режиме работы

Структурная схема системы управления ИСГ в стартерном режиме приведена на рисунке 5.5.



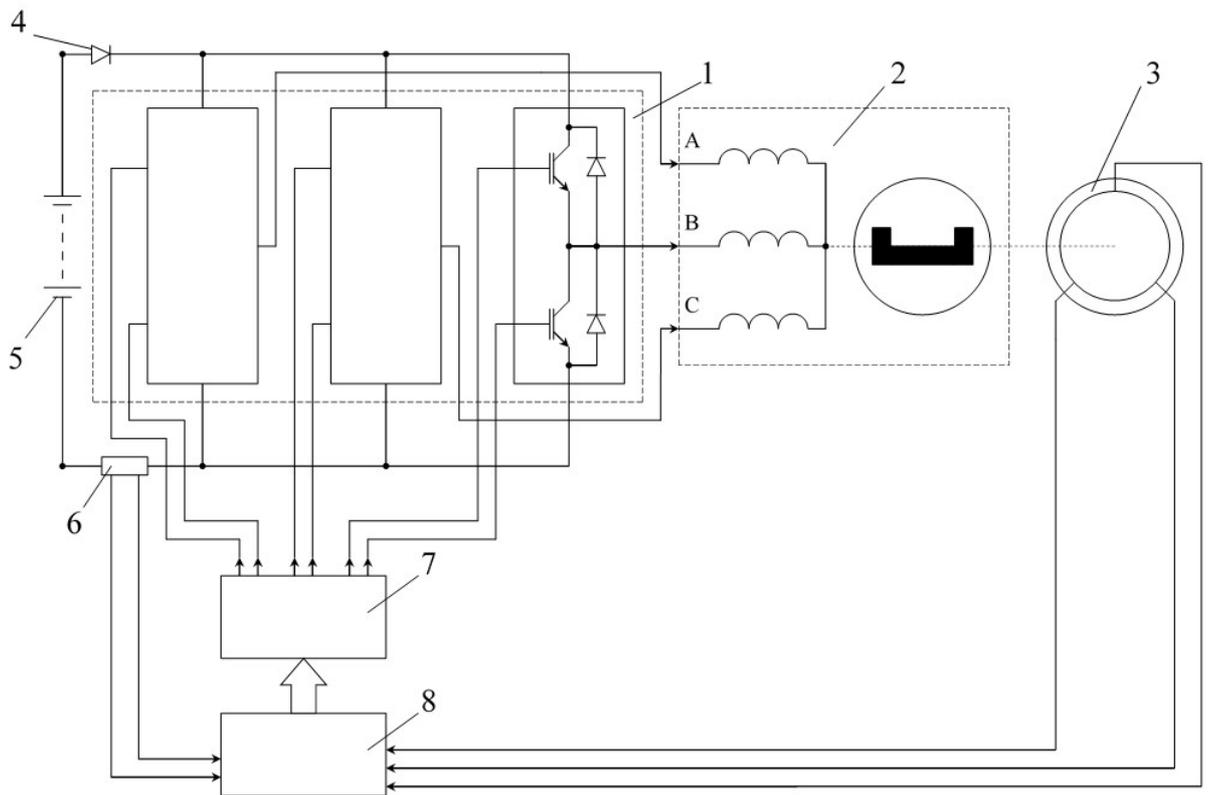


Рисунок 5.5 - Структурная схема системы управления ИСГ в стартерном режиме:

- 1 – инвертор (3 блока силовых полумостов); 2 – ИСГ; 3 – ДТР;  
 4 – выпрямительный диод; 5 – АБ; 6 – шунт;  
 7 – драйверы силовых ключей; 8 – микроконтроллер

Принципиальная электрическая схема системы управления ИСГ в стартерном режиме приведена на рисунке П.1 (Приложение Д).

В схеме используются:

- полумосты FF600R06ME3 (по технологии IGBT) – ключи инвертора (A1, A2, A3);
- HIP 4086ABZ – микросхема драйверов (D6);
- PIC 18F2431 – I/SO – микроконтроллер (МК) для управления 3-х фазным двигателем с программной реализацией ПИ-регулятора скорости и ограничения тока инвертора с использованием сигнала с шунта (D4);
- микросхема MAX 3232 – в качестве COM-порта для связи (с компьютером) (D7).

### 5.1.3 Практическая реализация запуска ДГУ ИСГ

Предназначение дизель генераторной установки (ДГУ) – выработка электроэнергии для АО. Для пуска дизельного двигателя необходима подготовка всех систем запуска [83]. При этом применяется автоматическая система управления дизельным двигателем (АСУД), которая после подготовки систем дизельного двигателя к запуску дает команду МК на запуск стартерного режима БДПТ. МК, согласно алгоритму управления БДПТ, начинает открывать ключи инвертора, в соответствии с сигналами датчиков положения ротора (ДПР). Ток, протекающий от АБ через выпрямительный диод, минуя стабилизатор, поступает на обмотки электрической машины, заставляя ротор вращаться, преодолевая сопротивление коленчатого вала дизельного двигателя. Происходит запуск дизельного двигателя, частота вращения коленчатого вала, а значит и ротора стартера возрастает, вызывая нарастание противоЭДС в обмотках статора [32].

При превышении вырабатываемой ИСГ ЭДС напряжения на АБ – ток, протекающий через ключи инвертора, падает до нуля. МК по частоте вращения и величине напряжения на обмотках статора определяет, что дизельный двигатель запущен и выключает управление ключами инвертора (отключается стартерный режим работы ИСГ).

ИСГ переходит в генераторный режим работы, МК не подключает нагрузку к ДГУ до определенной температуры прогрева дизельного двигателя. После достижения заданной температуры прогрева дизельного двигателя МК подключает по определенному алгоритму ячейки стабилизатора, по которым начнет протекать ток от обмоток ИСГ для заряда АБ и питания потребителей электроэнергии бортовой сети АО.

## 5.2 Экспериментальные исследования работы ИСГ

Экспериментальные исследования работы ИСГ в генераторном и стартерном режимах выполнялись на специализированных стендах, показанных на рисунках 5.6, 5.7 [125].



Рисунок 5.6 - Стенд для исследования генераторного режима



Рисунок 5.7 - Стенд для исследования стартерного режима

### 5.2.1 Экспериментальное исследование генераторного режима работы

Электрическая схема станда для определения внешних характеристик ИСГ без стабилизации выходного напряжения приведена на рисунке 5.9.

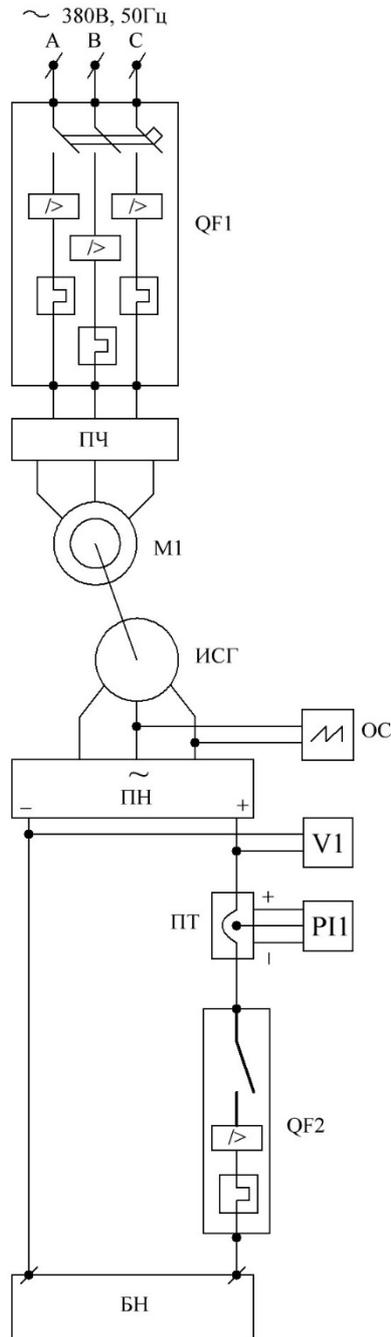


Рисунок 5.8 - Электрическая схема станда для определения внешних характеристик ИСГ в генераторном режиме без стабилизации выходного напряжения

В состав станда входят: коммутационная аппаратура (QF1, QF2), асинхронный двигатель с КЗ ротором М1 (АИР 160М2, 18,5 кВт, 2930 мин<sup>-1</sup>),

преобразователь частоты ПЧ (Mitsubishi FR-F740-470-EC, 22кВт), разработанный ИСГ, преобразователь напряжения ПН (3-х фазный 2-х полупериодный мост на базе 3-х блоков силовых полумостов типа FF600R06ME3 при работе в режиме выпрямления), блок нагрузки БН (блок резисторов), осциллограф ОС (марки С1-114), измерительный прибор для измерения напряжения V1 (вольтметр универсальный цифровой В7-65/2), универсальный измерительный преобразователь тока ПТ (PHOENIX CONTACT MCR-SL-CUC-600-I 2308098) с двухканальным измерителем Р11 (ОВЕН 2ТРМ0).

В таблице 5.1 приведены экспериментальные данные внешних характеристик  $U_d=f(I_H)$  генератора в рабочем диапазоне нагрузок ( $I_H=0\div 250A$ ) при различной частоте вращения без стабилизации выходного напряжения  $U_d$ .

Таблица 5.1 - Экспериментальные данные внешних характеристик генератора

Частота вращения $n$ , мин <sup>-1</sup>	Значения напряжений $U_d$ и токов $I_H$											
	$U_d$ , В	27,5	26,8	26,5	26,35	26,17	25,9	25,8	25,5	25,15	23,7	22,48
1500	$I_H$ , А	0	10	20	30	40	50	60	75	95	180	250
	$U_d$ , В	44,28		43,4		42,2		41,5		40,15		38,3
2400	$I_H$ , А	0		15		60		90		150		225
	$U_d$ , В	55,2		53,55		52,5		51,5		51	49,35	47
3000	$I_H$ , А	0		39,2		75,7		112		123	184	250
	$U_d$ , В	63,4		61,7		60,3		55,9		53		
3450	$I_H$ , А	0		45,5		87,2		206		233		

При работе генератора на выпрямительную нагрузку существенное влияние на выходное напряжение оказывают индуктивность обмоток статора, активное сопротивление обмотки и внутреннее сопротивление вентилей. Во время коммутации коммутирующие фазы с соответствующими вентилями работают одновременно и параллельно. Длительность коммутации нагруженного выпрямителя, выраженную в электрических градусах, называют углом коммутации  $\gamma$  [10].

Величина выпрямленного напряжения:

$$U_d = U_{d0} \frac{1 + \cos \gamma}{2} - \left( 2I_n R_a - \frac{m}{2\pi} I_n R_a \gamma \right) - 2\Delta U_d, \quad (5.1)$$

где  $U_d$  – постоянная составляющая выпрямленного напряжения на нагрузке;

$U_{d0}$  – постоянная составляющая выпрямленного напряжения при холостом ходе, определяемая выражением:

$$U_{d0} = \frac{m_2}{2\pi} \int_{-\beta/2}^{\beta/2} u_{d0}(\omega t) d(\omega t) = \kappa_{сх} \kappa_B U_{\phi 0}, \quad (5.2)$$

где  $\beta = \frac{2\pi}{m}$  – угол пульсаций;  $U_{\phi 0}$  – фазное напряжение в режиме холостого

хода;  $\kappa_{сх} = \frac{U_{d0 \max}}{U_{\phi 0 \max}}$  – коэффициент схемы;  $\kappa_B = m_2 \frac{\sqrt{2}}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{m_2}\right)$  – коэффициент

выпрямления;  $m_2 = 2m$  – периодичность пульсаций выпрямленного напряжения;  $m$  – число фаз выпрямителя.

На рисунке 5.10 приведены экспериментальные внешние характеристики генератора и теоретически рассчитанные по формуле (5.1).

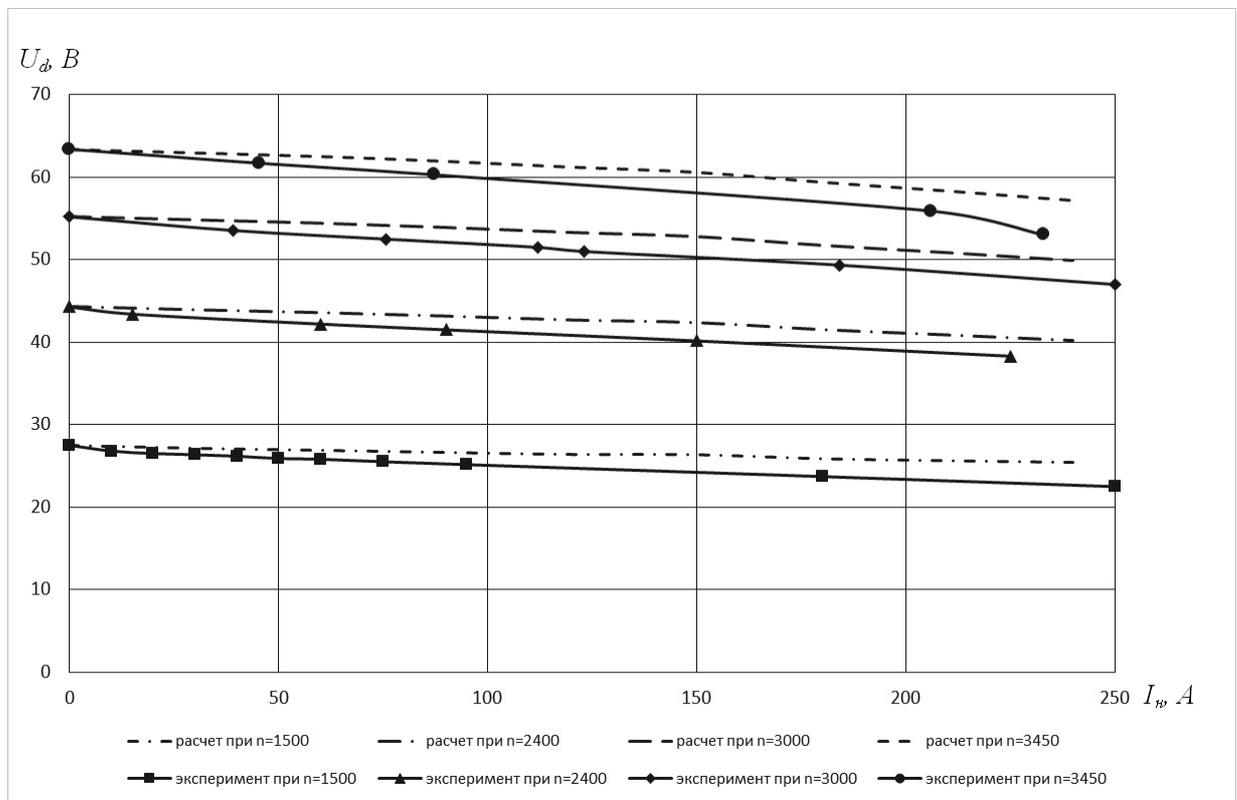


Рисунок 5.9 - Опытные и расчетные внешние характеристики вентильного генератора

Сравнение экспериментально опытных и расчетных характеристик показало достаточно хорошее их совпадение (расхождение не более 5%).

На рисунках 5.10 – 5.15 приведены осциллограммы установившегося режима работы генератора без стабилизации выходного напряжения (эксперимент).

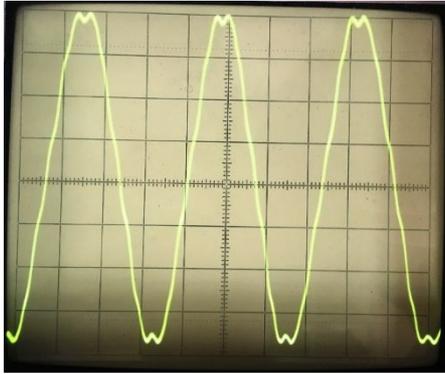


Рисунок 5.10 - Линейное напряжение в режиме близком к х.х. ( $I_n = 10A$ )



Рисунок 5.11 - Линейное напряжение при нагрузке ( $I_n = 200A$ )

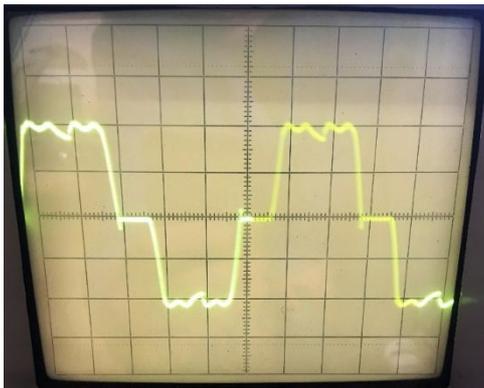


Рисунок 5.12 - Фазный ток в режиме близком к х.х. ( $I_n = 10A$ )

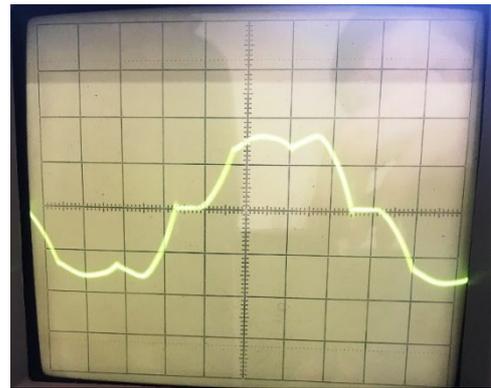


Рисунок 5.13 - Фазный ток при нагрузке ( $I_n = 200A$ )

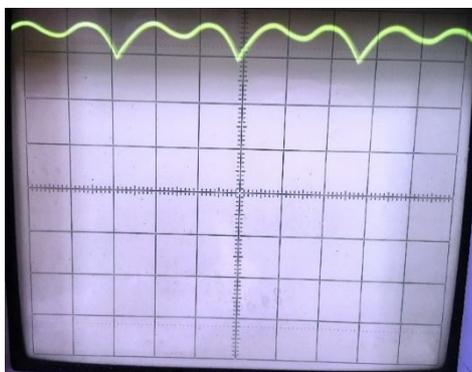


Рисунок 5.14 - Выпрямленное напряжение в режиме близком к х.х. ( $I_n = 10A$ )

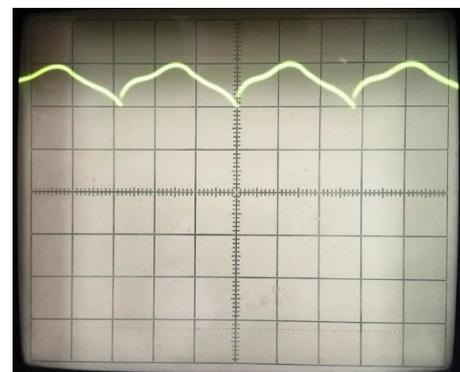


Рисунок 5.15 - Выпрямленное напряжение при нагрузке ( $I_n = 200A$ )

На рисунках 5.16 – 5.18 приведены осциллограммы наброса нагрузки на генератор без стабилизации выходного напряжения при  $n=1500 \text{ мин}^{-1}$ ;  $2400 \text{ мин}^{-1}$ ;  $3000 \text{ мин}^{-1}$  соответственно (эксперимент).

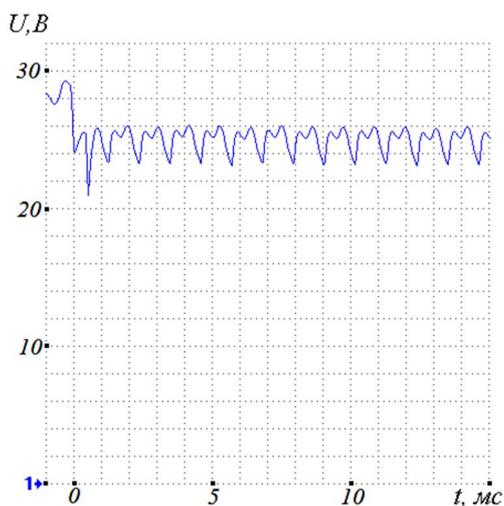


Рисунок 5.16 - Наброс нагрузки на генератор без стабилизации напряжения при  $n=1500 \text{ мин}^{-1}$  (эксперимент)

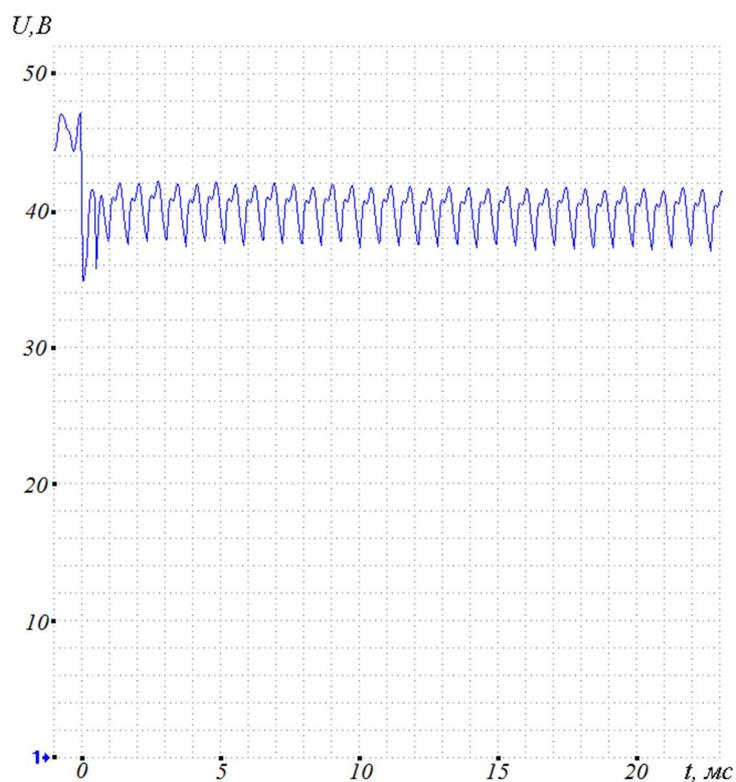


Рисунок 5.17 - Наброс нагрузки на генератор без стабилизации напряжения при  $n=2400 \text{ мин}^{-1}$  (эксперимент)



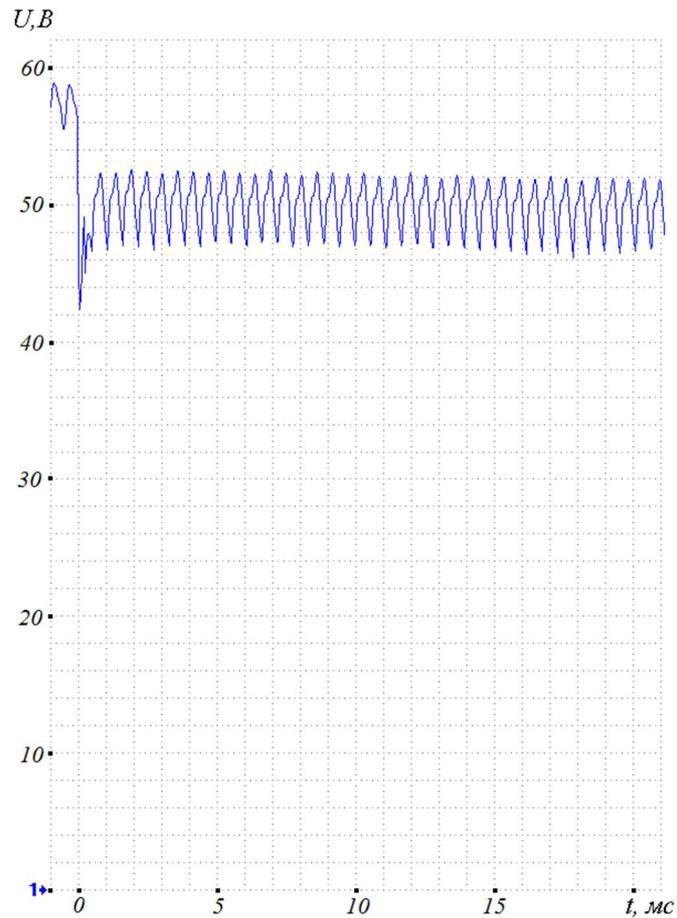


Рисунок 5.18 - Наброс нагрузки на генератор без стабилизации напряжения при  $n=3000 \text{ мин}^{-1}$  (эксперимент)

На рисунке 5.19 приведена осциллограмма наброса нагрузки на генератор со стабилизацией выходного напряжения  $n=2400 \text{ мин}^{-1}$  (эксперимент).

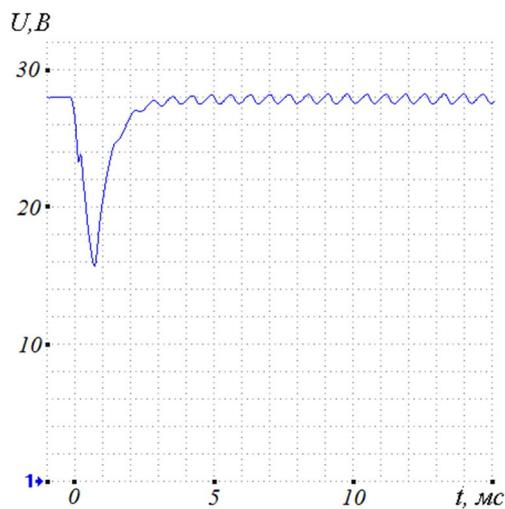


Рисунок 5.19 - Наброс нагрузки на генератор со стабилизацией напряжения при  $n=2400 \text{ мин}^{-1}$  (эксперимент)

Приведенные экспериментальные зависимости динамики генераторного режима хорошо согласуются с рассчитанными по модели в разделе 4 по величине провала напряжения при внезапном набросе нагрузки и длительности переходного процесса. Расхождение не превышает 3%.

### 5.2.2 Эксплуатационные характеристики ИСГ в стартерном режиме работы

Ранее (раздел 4) были получены соотношения, связывающие электромагнитный момент с током, протекающим через две фазы, включенные параллельно на межкоммутационном интервале:

$$M = \kappa_T \cdot i,$$

где  $\kappa_T = 2p\Psi_m$  – коэффициент крутящего момента.

С учетом соотношения (4.24) для установившегося режима имеем:

$$U_d = R_a I + \kappa_e \omega_r, \quad (5.3)$$

где  $I$  – ток инвертора.

С учетом потерь мощности в инверторе можно получить следующее выражение для потребляемой стартером электрической мощности:

$$P_1 = U_d I = R_a I^2 + \kappa_e \omega_r I + \Delta U_{тр} I = R_a I^2 + \frac{\pi n_r}{30} \kappa_e I + \Delta U_{тр} I, \quad (5.4)$$

$$P_1 = P_M + P_e + P_T, \quad (5.5)$$

где  $\omega_r$  – угловая частота вращения ротора ИСГ;

$P_M = R_a I^2$  – мощность потерь в обмотках статора (потери в меди);

$P_e = \kappa_e \omega_r \cdot I = \frac{\pi n_r}{30} \kappa_e I$  – электромагнитная мощность;

$P_T = \Delta U_{тр} I$  – потери мощности в инверторе;

$\Delta U_{тр}$  – падение напряжения на транзисторах инвертора.

Полезная механическая мощность на валу ИСГ

$$P_2 = P_e - P_0, \quad (5.6)$$

где  $P_0$  – потери на холостом ходу,  $P_0 = P_{\text{маг}} + P_{\text{тр}}$ ;

$P_{\text{маг}}$  – магнитные потери;  $P_{\text{тр}}$  – потери на трение.

Коэффициент полезного действия:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - (P_m + P_o + P_{\text{тр}})}{P_1} = 1 - \frac{\sum P}{P_1} \quad (5.7)$$

При анализе работы ИСГ в стартерном режиме необходимо учитывать эксплуатационные характеристики АБ (рисунок 5.5).

Напряжение на выводах АБ  $U_{\delta}$  равно:

$$U_{\delta} = E_{\delta} - R_{\delta}I \quad (5.8)$$

где  $E_{\delta}$  – ЭДС АБ;  $R_{\delta}$  – внутреннее сопротивление АБ

Пренебрегая потерями в подводящих проводах, потребляемая ИСГ мощность  $P_1$  от АБ равна:

$$P_1 = U_d I = U_{\delta} I, \quad (5.9)$$

Электромагнитная мощность  $P_e$ :

$$P_e = \frac{\pi}{30} \kappa_e n_r I = (E_{\delta} - \Delta U_{\text{тр}})I - (R_{\delta} + R_a)I^2 = (E_{\delta} - \Delta U_{\text{тр}})I - R_{\Sigma}I^2, \quad (5.10)$$

где,  $R_{\Sigma} = R_{\delta} + R_a$  – суммарное сопротивление АБ и обмоток статора.

Экстремум функции  $P_e = f(I)$  позволяет определить величину тока якоря (статора), соответствующего максимальной электромагнитной мощности:

$$\frac{\partial P_e}{\partial I} = (E_{\delta} - \Delta U_{\text{тр}}) - R_{\Sigma} 2I = 0 \Rightarrow I_m = \frac{E_{\delta} - \Delta U_{\text{тр}}}{2R_{\Sigma}} \quad (5.11)$$

где  $I_m$  – ток якоря, соответствующий максимальной электромагнитной мощности.

Зависимость электромагнитной мощности ИСГ в стартерном режиме от тока якоря представляет собой симметричную параболу с максимумом.

Максимальная электромагнитная мощность с учетом соотношения (5.11):

$$P_{e \text{ max}} = \frac{(E_{\delta} - \Delta U_{\text{тр}})^2}{4R_{\Sigma}} \quad (5.12)$$

Полезная мощность, вырабатываемая на валу ИСГ в стартерном режиме работы меньше электромагнитной мощности на величину магнитных потерь.

Потери на трение о воздух и вентиляционные потери при работе ИСГ в стартерном режиме малы и могут не учитываться в расчетах.

Полезный момент на валу ИСГ в стартерном режиме:

$$M_2 = \frac{P_2}{\omega_r} = \frac{30P_2}{\pi n_r}, \quad (5.13)$$

где  $n_r$  – частота вращения ротора,  $\text{мин}^{-1}$ .

Известно [102], что напряжение на выводах АБ при запуске ДВС зависит от разрядной силы тока и внутреннего сопротивления батареи. С ростом степени разряженности АБ, понижением емкости, температуры внутреннее сопротивление и падение напряжения в АБ увеличиваются. Поэтому в стартерном режиме работы ИСГ напряжение аккумуляторной батареи  $U_б^*$ , а, следовательно, ЭДС  $E_я^*$ , ток инвертора  $I^*$  и частота вращения ротора ИСГ  $n_r^*$  будут уменьшаться:

$$n_r^* = \frac{E_я^*}{E_я} n_r = \frac{U_б^* - \Delta U_{\text{тр}} - R_\Sigma I^*}{U_б - \Delta U_{\text{тр}} - R_\Sigma I} n_r \quad (5.14)$$

Электромагнитный момент ИСГ в стартерном режиме также будет уменьшаться. В этом случае:

$$P_2^* = \frac{M_2^* n_r^*}{M_2 n_r} \quad (5.15)$$

По выражениям (5.14), (5.15) можно пересчитать рабочие характеристики ИСГ в стартерном режиме при различных вольт-амперных характеристиках АБ.

### 5.2.3 Экспериментальное исследование стартерного режима работы

С целью проверки и подтверждения основных теоретических результатов и положений, полученных автором в предыдущих разделах диссертации, были произведены экспериментальные исследования работы ИСГ в стартерном режиме (режим прокрутки дизельного двигателя) [32].

Структурная схема экспериментальной установки для измерения тока инвертора показана на рисунке 5.20. Электрическая схема для измерения тока инвертора приведена на рисунке 5.21 и содержит: измерительный шунт Ш (75ШСМ300А); специализированный операционный усилитель ОУ (LT1990),

имеющий фиксированный коэффициент усиления  $K=10$ ; аналого-цифровой преобразователь USB АЦП (Е-154), преобразующий аналоговый сигнал в цифровой и передающий его по USB шине в компьютер. Специально созданное программное обеспечение позволяет осуществлять обработку данных на компьютере и записывать их в АЦП по команде пользователя, показывать записанную форму тока на экране дисплея, сохранять данные для дальнейшей обработки, распечатывать обработанные файлы на принтере.

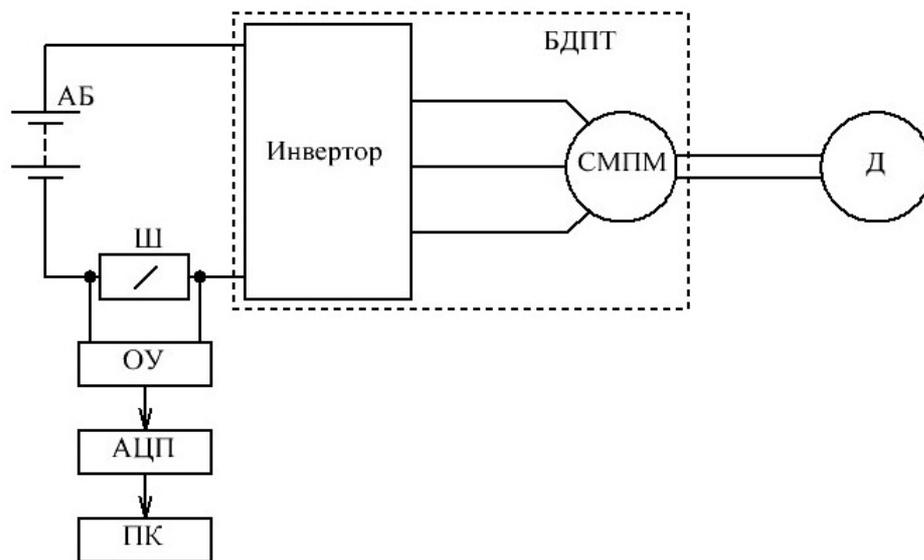


Рисунок 5.20 - Структурная схема экспериментальной установки исследования работы ИСГ в стартерном режиме:

АБ – 2 аккумуляторные батареи типа 12СТС-85С1, соединенные параллельно; Ш – измерительный шунт, 75ШСМ300А; ОУ – операционный усилитель, LT1990; АЦП – аналого-цифровой преобразователь, Е-154; ПК – персональный компьютер, ноутбук ЕНОВО; Д – дизель, типа ТМЗ-450Д.

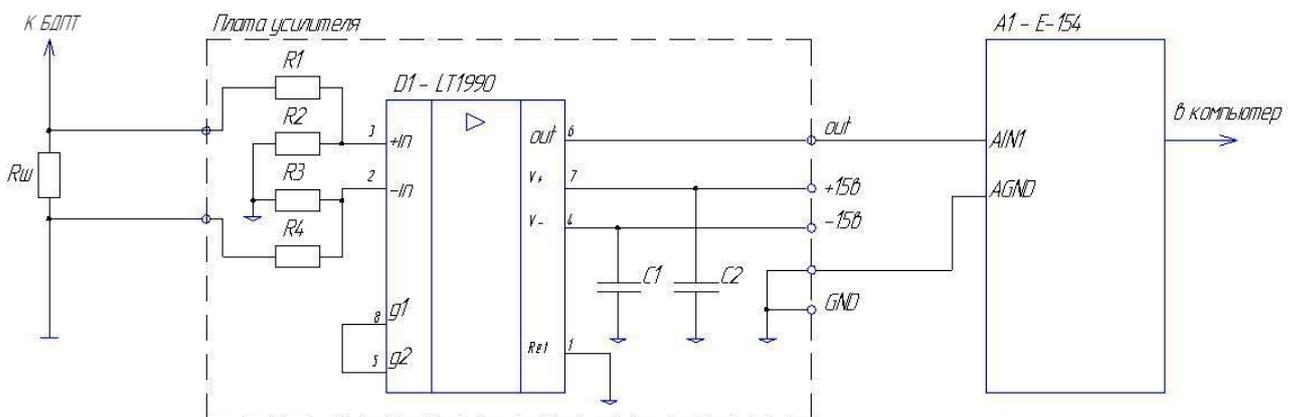


Рисунок 5.21 - Электрическая схема измерения тока инвертора в стартерном режиме работы ИСГ

Стенд экспериментальной установки для исследования фазного тока и тока инвертора показан на рисунке 5.22. В процессе эксперимента регистрировались ток, протекающий через инвертор (рисунок 5.23) и фазный ток ИСГ (рисунок 5.24).

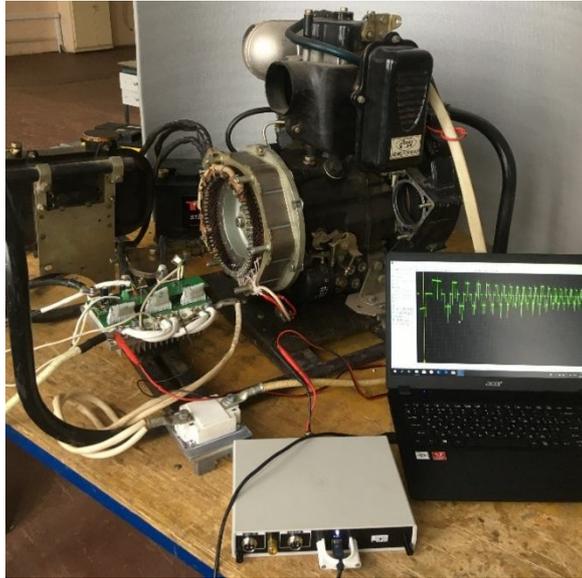


Рисунок 5.22 - Стенд экспериментальной установки исследования работы ИСГ в стартерном режиме

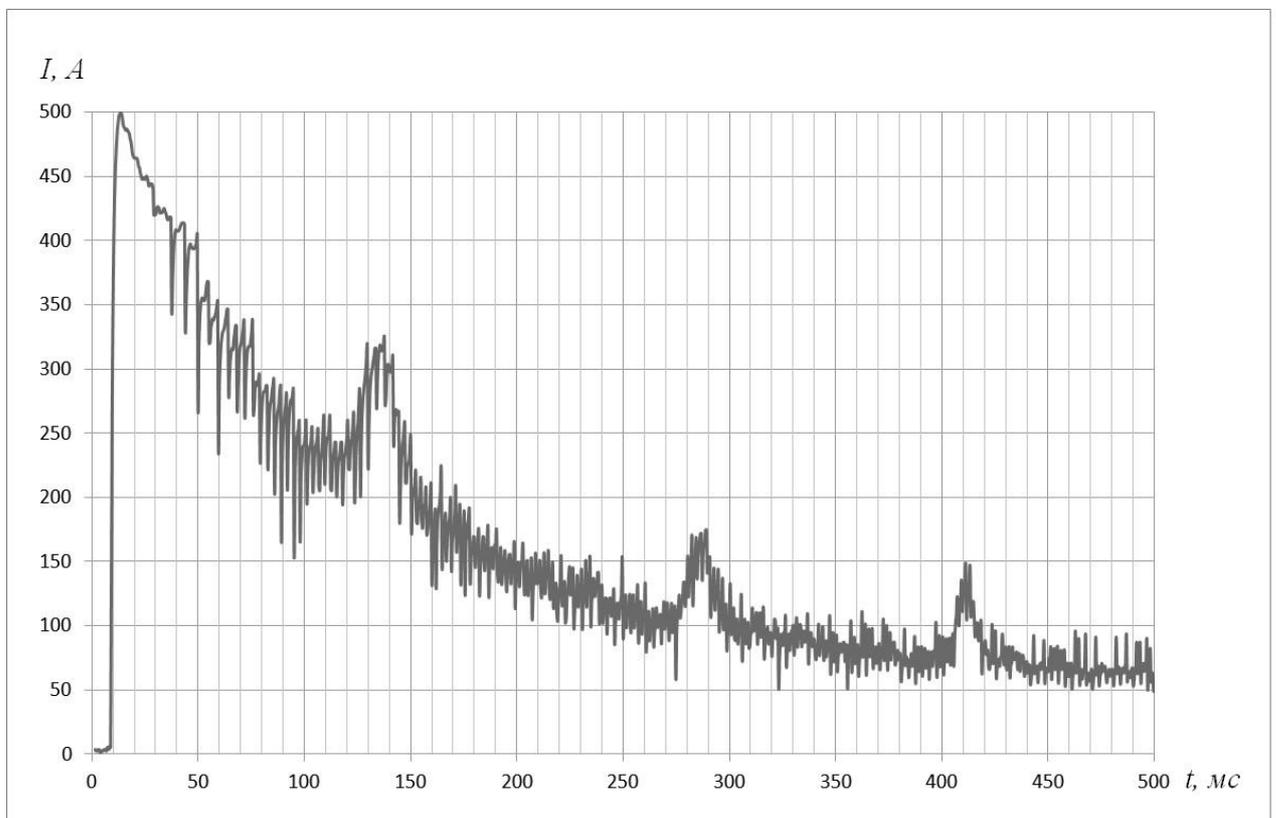


Рисунок 5.23 - Ток инвертора при запуске ДВС (эксперимент)

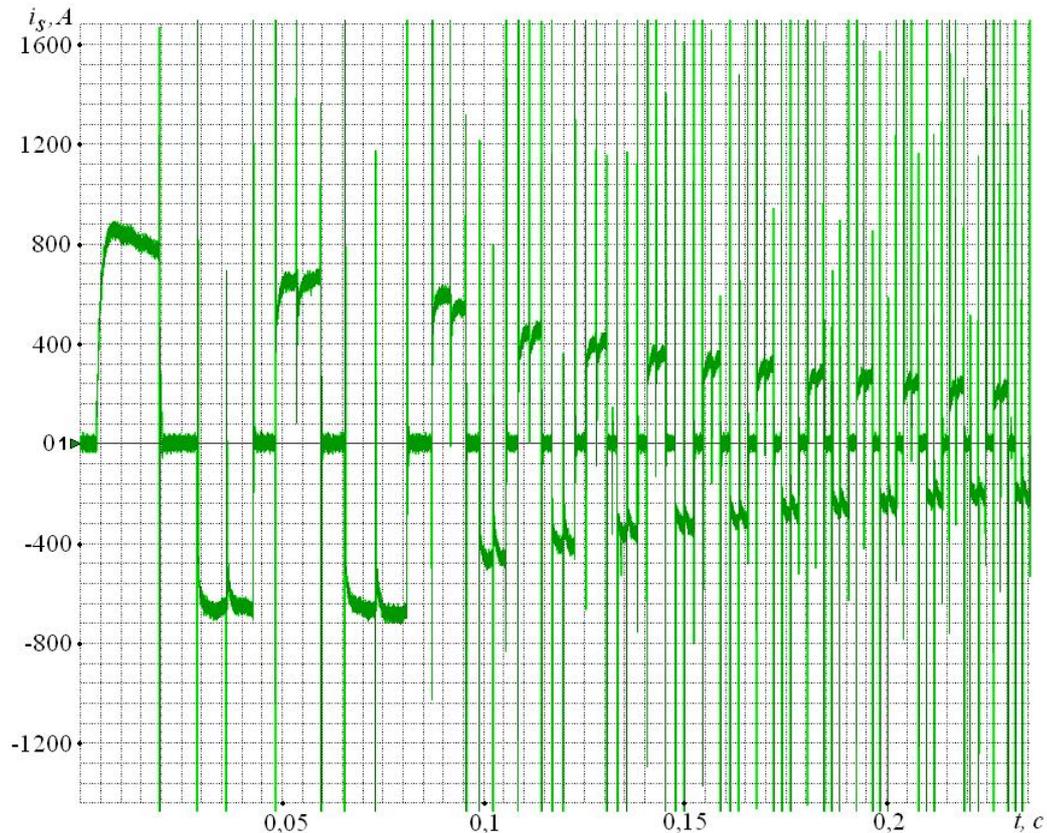


Рисунок 5.24. Ток в фазе ИСГ при запуске ДВС (эксперимент)

Анализ теоретических и опытных характеристик стартерного режима показал расхождение 3,8% по величине тока и времени запуска ДВС, что подтверждает адекватность разработанных моделей.

### 5.3 Сравнительный анализ основных показателей разработанного ИСГ и серийно-выпускаемых аналогов

Для сравнения основных показателей разработанного ИСГ и серийно-выпускаемых аналогов - генераторов и стартеров, предназначенных для применения на передвижных ТС и стационарных агрегатах для запуска ДВС и электроснабжения, выбраны следующие электромеханические преобразователи:

- генератор Г-290В/3701;
  - стартер AZE2632 (11.131.119),
- внешний вид, которых показан на рисунках 5.25, 5.26.



Рисунок 5.25 - Генератор Г-290В/3701



Рисунок 5.26 - Стартер AZE2632 (11.131.119)

Основные технические данные выпускаемых промышленностью аналогов и разработанного научной группой кафедры «ЭМАЭ» СамГТУ интегрированного стартер-генератора приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 - Технические характеристики ИСГ и аналогов

Наименование	Обозначение, ед. изм.	Опытный образец	Аналог
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
Генераторный режим		<b>ИСГ</b>	<b>Г290В.3701</b>
Наружный диаметр статора	$D_a$ , мм	290	190
Число фаз	$m$	3	3
Номинальная мощность	$P_{н}$ , кВт	9	4,2
Номинальный ток	$I_{н}$ , А	320	150
Номинальное выпрямленное, стабилизированное напряжение	$U_{вых.н}$ , В	27,5	28
Пределы изменения выпрямленного, стабилизированного напряжения	$U_{вых.д}$ , В	26,5÷28,5	27÷28,5
КПД, не менее	$\eta$ , %	75	60
Масса	$m$ , кг	20	22
Габаритные размеры	мм	300x300x60	379x214x214
Удельный показатель $K_{м\ ген} = m/P_{н}$	кг/кВт	2,22	5,24
Режим работы	-	длительный	



1	2	3	4
Стартерный режим		<b>ИСГ</b>	<b>Стартер AZE2632</b>
Номинальная мощность	$P_n, \text{кВт}$	3	2,5
Номинальное напряжение	$U_n, \text{В}$	24	24
Масса	$m, \text{кг}$	20	6,2
Пусковой момент	$M, \text{Н}\cdot\text{м}$	50	40
Частота вращения при пуске	$n, \text{мин}^{-1}$	250	1500
Емкости аккумуляторных батарей, не менее	$C, \text{А}\cdot\text{ч}$	170	132
Режим работы	-	кратковременный	

На рисунках 5.27 - 5.29 показаны номограммы массы разработанного ИСГ и серийно-выпускаемых генератора и стартера, КПД генераторного режима и пускового момента стартерного режима работы.

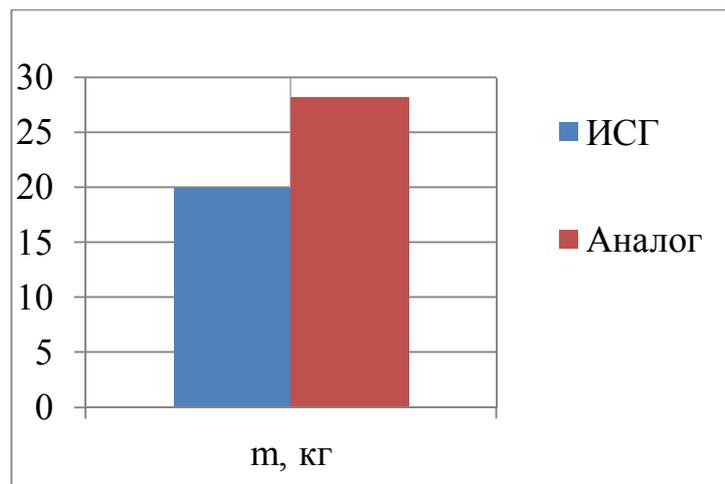


Рисунок 5.27 – Масса ИСГ и аналога

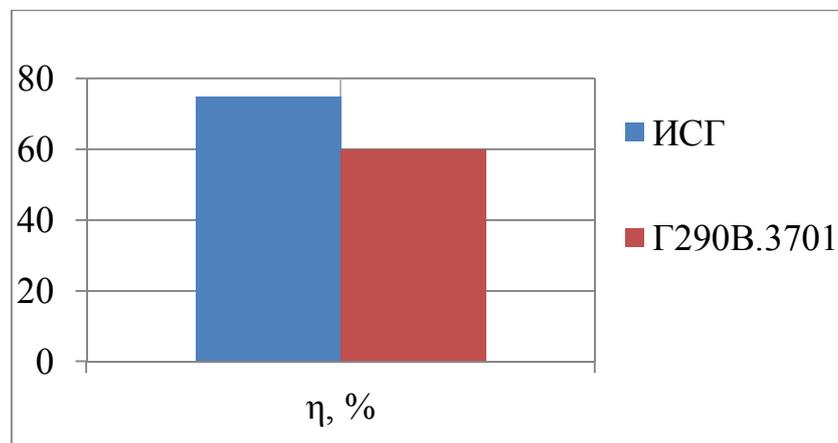


Рисунок 5.28 – КПД ИСГ и аналога (режим генератора)

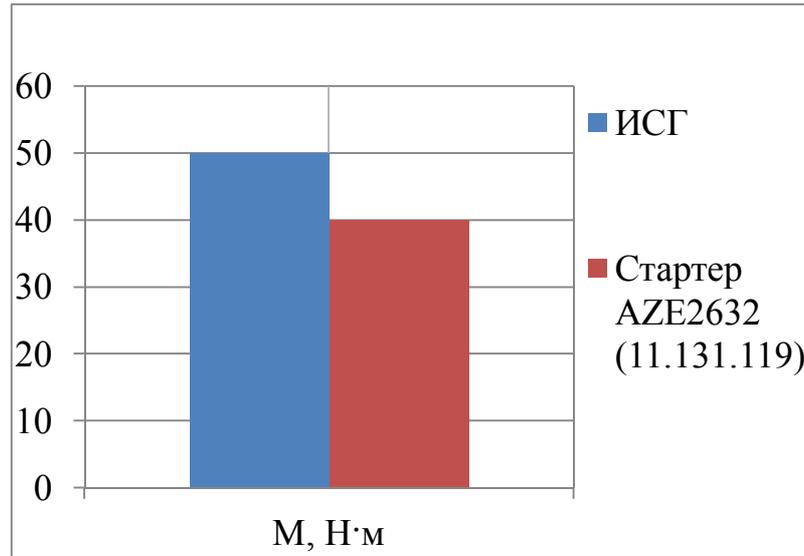


Рисунок 5.29 – Пусковой момент ИСГ и аналога (режим стартера)

Анализ представленных данных показал, что за счет предложенных в работе инновационных решений: использования одного ЭМП для генерации и запуска ДВС вместо двух отдельных, его интеграции в конструкцию силового привода, оптимизации параметров удалось уменьшить массу электромеханического преобразователя на 29%, повысить КПД на 25%, увеличить пусковой момент в 1,25 раза.

### Выводы по 5 разделу

1. На основе теоретических положений, изложенных в данной работе, был спроектирован и изготовлен опытный образец ИСГ с системой управления. Разработаны схемы практической реализации систем управления ИСГ в генераторном и стартерном режимах работы.

2. Результаты испытаний стартер-генератора в генераторном режиме подтвердили основные выводы и рекомендации, предложенные автором. Опытные внешние характеристики имеют расхождение с расчетными не более 5%.

3. Получены соотношения для определения эксплуатационных характеристик ИСГ в стартерном режиме работы. Показана их зависимость от степени разряда

АБ. Предложены формулы пересчета рабочих характеристик ИСГ при различных вольт-амперных характеристиках АБ.

4. Проведено экспериментальное исследование работы ИСГ в стартерном режиме (режим прокрутки дизельного двигателя). Полученные из опыта осциллограммы процесса пуска хорошо согласуются с результатами имитационного моделирования и численными расчетами при решении полевой задачи.

5. Разработанный автором ИСГ отличается увеличенным на 25% КПД в режиме генерации по сравнению с аналогом (Г-290В/3701), сниженной за счет интеграции в силовую установку и оптимизации на 29% массой, повышенным пусковым моментом и более высоким быстродействием в генераторном и стартерном режимах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена задача улучшения энергетических, эксплуатационных и массогабаритных показателей СГУ подвижных АО на базе синхронной машины с магнитоэлектрическим возбуждением.

В работе получены следующие научные и практические результаты:

1. Показано, что интеграция СГ в силовую установку позволяет снизить на (5...10) % ее массу и габариты, повысить КПД и за счет этого уменьшить до 20% расход топлива и вредные выбросы в атмосферу.

2. Проведен анализ конструкций магнитных систем и материалов ПМ для ИСГ. Доказано, что наиболее рациональным является использование индуктора с поверхностным расположением ПМ из РЗМ магнитов на основе сплавов NdFeB и SmCo. Для оценки эффективности индукторов ИСГ предложен энергетический критерий, связывающий наиболее существенные конструктивно-технические и эксплуатационные показатели.

3. Разработаны элементы методики проектирования, позволяющие обоснованно выбирать электромагнитные нагрузки и определять основные размеры ИСГ с магнитоэлектрическим возбуждением.

4. Проведено исследование магнитного поля ИСГ в генераторном и стартерном режимах работы с помощью конечно-элементного программного комплекса «ELCUT», в результате которого определены индуктивные параметры для их последующего использования в задачах имитационного моделирования. Установлено, что в стартерном режиме распределение магнитной индукции в зазоре имеет трапецеидальный характер.

5. Разработан и реализован алгоритм параметрической оптимизации ИСГ численными методами на основе полевой модели ИСГ в стартерном режиме работы.

6. Разработана математическая модель, устанавливающая связь между параметрами ИСГ и величинами тока и момента, описывающая электромеханическое преобразование энергии в стартерном режиме работы.

Модель позволяет осуществлять исследование работы ИСГ в режиме пуска ДВС: оценивать величины пусковых токов, протекающих по фазам инвертора и обмоткам статора, пускового момента, изучать динамику работы системы ИСГ – ДВС.

7. Разработана модель эквивалентного БДПТ, замещающая с целью сокращения времени расчета реальный ИСГ при моделировании процесса запуска ДВС и используемая для определения параметров системы управления.

8. Анализ результатов имитационного моделирования генераторного режима работы ИСГ в разомкнутой и замкнутой системах стабилизации напряжения показал хорошее совпадение с результатом эксперимента (расхождение 4,2%). Имитационное моделирование работы ИСГ в генераторном режиме со стабилизацией выходного напряжения позволило определить значения основных параметров выходного фильтра регулятора напряжения (индуктивности и емкости) для обеспечения режима непрерывного тока.

9. На основании теоретических положений и практических рекомендаций, предложенных в диссертации, разработан опытный образец интегрированного в силовую установку стартер-генератора с магнитоэлектрическим возбуждением, отличающийся на 29% меньшей по сравнению с аналогами массой, повышенными на 25% КПД в генераторном режиме и пусковым моментом при работе стартером, высоким быстродействием в динамических режимах работы.

10. Сравнительный анализ результатов численного моделирования и натуральных экспериментов показал хорошее их совпадение. Расхождение не превышает 5% по величине напряжения в генераторном и 3,8% по моменту и току в стартерном режимах работы ИСГ.

Новизна технических решений, реализованных автором в диссертационном исследовании, защищена патентами РФ на изобретения.

Дальнейшее направление развития данной темы видится в углубленном исследовании теплового состояния ИСГ в статических и динамических режимах посредством решения связанной электромагнитной и тепловой задачи с помощью метода конечных элементов.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Абабкова А.А. Способы повышения эффективности использования энергии в транспортных средствах / Вестник КГУ, 2016. № 3 Серия «технические науки», выпуск 11 с.59-62.
2. Адволоткин Н.П., Овчинников И.Е. Вентильные электродвигатели с постоянными магнитами. (Электромеханическая часть). Вып. 1(11), 1986. – 84с.
3. Акимов С.В., Чижков Ю.П. Электрооборудование автомобилей. Учебник для ВУЗов. – М.: ООО «Книжное издательство «За рулем», 2007. – 336 с.
4. Алимбеков М.Н., Иванников Ю.Н., Кауров С.Ю. Исследование на модели электропусковой системы автомобиля на базе интегрированного стартер-генератора // Материалы 54-й международной научной студенческой конференции МНСК-2016: Электротехнические комплексы и системы, Новосибирск, апрель 2016. -С.9
5. Анисимов В.М. Электромеханические стартер-генераторные системы автомобильных транспортных средств: Дисс. докт. техн. наук: Самара, 2004 – 367с.
6. Анисимов В.М., Высоцкий В.Е., Верещагин В.Е., Тулупов П.В. Вентильные двигатели-генераторы постоянного тока для силовых установок гибридных автомобилей // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: Вестник Уральского гос.техн. ун-та – УПИ. - Екатеринбург: УГТУ – УПИ, 2003, с.262-266.
7. Аракелян А.К., Афанасьев А.А. Вентильные электрические машины в системах регулируемых электроприводов: Учебное пособие для вузов: В 2 т. Т.1. М.: Высш. шк., 2006. – 596 с.
8. Аракелян А.К., Афанасьев А.А., Чиликин М.Г. Вентильный электропривод с синхронным двигателем и зависимым инвертором. Под ред. д.т.н. М.Г. Чиликина. –М.: Энергия, 1977. – 224с.
9. Балагуров В.А. Новые магнитные материалы и разработка магнитоэлектрических машин//Тр. МЭИ. Применение постоянных магнитов в электромеханических системах. 1982. – вып. 562. – с. 6-13.
10. Балагуров В.А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока: Учеб. пособие для студентов вузов. – М.: Высш. школа, 1982. – 272 с, ил.
11. Балагуров В.А. Предельная мощность синхронных генераторов с постоянными магнитами/ В.А. Балагуров // Электротехника. 1983. – №5. – С. 22-24.

12. Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф., Ларионов А.Н. Электрические машины с постоянными магнитами М.-Л. Издательство "Энергия", 1964, – 480 с.
13. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – 13-е изд., исправленное. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 544 с.
14. Бунаков И. Ю. Совмещенные системы стартер-генераторов (обзор) The combined starter-generator systems (review) // МОЛОДЕЖЬ И НАУКА. Изд.: Уральский государственный аграрный университет, № 2, Екатеринбург, 2013. – С. 5
15. Буренков К. Э. Интегрированный стартер-генератор – основа перспективных конструкций автомобиля / К. Э. Буренков, Ю. А. Купеев, А. Н. Агафонов // Автотракторное электрооборудование. 2001. № 3–4. С. 23.
16. Бут, Д.А. Бесконтактные электрические машины/ Д.А. Бут. М.: Высшая школа, 1985. – 255с.
17. Вентильные реактивные электродвигатели / генераторы (Switched Reluctance Motors / Generators) // Каскод-Электро: инновационно-техническая фирма. – URL: [http://www.kaskod.ru/produkt/motorsrm/srm\\_article01/](http://www.kaskod.ru/produkt/motorsrm/srm_article01/) (дата обращения: 5.10.2020). – Текст: электронный.
18. Власов А.И. Магнитоэлектрический стартер-генератор в системе электроснабжения самолетов нового поколения : диссертация ... кандидата технических наук : 05.09.01 - Чебоксары, 2010. - 263 с. : ил.
19. Воронин С.Г., Согрин А.И., Шабуров П.О., Шумаков Б.Д. Стартер-генератор для дизельной силовой установки // Электротехника, 2013, №9 – С.25-29.
20. Вспомогательный генератор: для чего второе сердце танку? [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://istiglal.com/2016/08/29/Вспомогательный генератор: для чего второе сердце танку?](https://istiglal.com/2016/08/29/Вспомогательный_генератор:_для_чего_второе_сердце_танку?) (дата обращения: 4.09.2019). – Текст: электронный.
21. Высоцкий В.Е., Зубков Ю.В., Тулупов П.В. Математическое моделирование и оптимальное проектирование вентильных электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 2007. –340 с.
22. Герман-Галкин С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК Изд: Корона-Век, 2014. – 368с.
23. Грузков С.А. Электрооборудование летательных аппаратов: учебник для вузов: в 2 т. / Под ред. С.А. Грузкова. – Москва: Изд-во МЭИ, 2005-2008.
24. Двадненко В.Я. Система управления конверсионного гибридного автомобиля / Автомобильный транспорт, вып. 38, 2016 с.149-153.
25. Дентон Т. Автомобильная электроника; пер. с англ. – М.: НТ Пресс, 2008. – 576 с.

26. Дизели ТМЗ-450Д / Руководство по эксплуатации – Режим доступа: [http://storage7.fermer.ru/2009/06/28591/rukovodstvo\\_po\\_ekspluatacii\\_tmz-450d\\_i10.pdf](http://storage7.fermer.ru/2009/06/28591/rukovodstvo_po_ekspluatacii_tmz-450d_i10.pdf), свободный.
27. Дизель-генераторные установки производства АО «АК «ТУЛАМАШЗАВОД». – Режим доступа: <http://engine.aviaport.ru/issues/103/pics/pg16.pdf>, свободный
28. Дизельные двигатели. Малогабаритный универсальный дизель. Технические характеристики. – URL: <https://web.archive.org/web/20180310201727/http://www.oootdm.ru/catalog/17/> (дата обращения: 1.10.2019). – Текст: электронный.
29. Долбилин Е.В., Марков В.В., Нгуен Куанг Тхиеу, Овсянников Е.М., Урдин Д.А. Математическое моделирование системы ДВС – вентильный стартер – генератор // Материалы Международной научно-технической конференции Ассоциации автомобильных инженеров (ААИ) "АВТОМОБИЛЕ- И ТРАКТОРОСТРОЕНИЕ В РОССИИ: ПРИОРИТЕТЫ РАЗВИТИЯ И ПОДГОТОВКА КАДРОВ", посвященной 145-летию МГТУ "МАМИ". Книга 3 (Секция 3 «Электроника, электромеханические преобразователи и системы управления»), Москва, МГТУ «МАМИ», 2010 г., С.24-33.
30. ELCUT: Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 5.10. Руководство пользователя. – ООО «Тор» Санкт-Петербург, 2012. – 356с.
31. Забоин В. Н., д.т.н., профессор, Суханов В.В., к.т.н., доцент, Гурлов И.В., Пармас А-Я. Ю.. Санкт-Петербургский государственный политехнический университет (СПбГПУ), кафедра Электрические машины, Петербургский государственный университет путей сообщения (ПГУПС), кафедра Электрические Машины Расчет магнитного поля вентильного двигателя с магнитоэлектрическим возбуждением [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://elcut.ru/publications/sukhanov2.pdf>, свободный.
32. Зубков Ю.В., Кауров С.Ю., Верещагин В.Е. Исследование работы интегрированного стартер-генератора при запуске двигателя внутреннего сгорания / печ. Вестник СамГТУ. №3(67), 2020, Технические науки. С. 125-138.
33. Зубков Ю.В., Кауров С.Ю. Оптимизация размеров активной зоны интегрированного стартер-генератора автономных энергетических объектов / Труды Международной научно-практической конференции «Ашировские чтения» 2020 г., с.399-401.
34. Иванов - Смоленский А.В. Электрические машины. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.



35. Ивоботенко Б.А., Ильинский Н.Ф., Копылов И.П. Планирование эксперимента в электромеханике/ Б.А. Ивоботенко, Н.Ф. Ильинский, И.П. Копылов. М.: Энергия, 1975. – 184с.
36. Ильинский Н.Ф. Основы электропривода: Учеб. Пособие для вузов. – 3-е изд., стереот. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 224 с.
37. Кауров С.Ю., Репин А.С. Применение высококоэрционных постоянных магнитов из редкоземельных материалов в стартер-генераторных установках и умеренных гибридах / Материалы Международной научно-технической конференции “Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии”, Тольятти, май 2009, Ч.1, с. 215-218.
38. Кауров С.Ю., Репин А.С. Гибридные двигатели как основное из направлений будущего автомобилестроения / Сборник статей I-ой международной научно-технической конференции (по заочной форме) «Современные автомобильные материалы и технологии» САМИТ – 2009, Курск, ноябрь 2009 г., с. 115-119.
39. Кенио Т., Нагамори С. Двигатели постоянного тока с постоянными магнитами: Пер. с англ. - М.: Энергоатомиздат, 1989. – 184 с.
40. Киселев А.В., Рапопорт О.Л., Цукублин А.Б., Ким Ю.В. Применение программного продукта ELCUT 5.1 для выбора рациональной геометрии синхронного магнитоэлектрического генератора / Известия высших учебных заведений. Электромеханика №3, 2012, с. 9-12
41. Ковчин С. А., Сабинин Ю. А. Теория электропривода: Учебник для вузов. - СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отд-ние, 2000. – 496 с.
42. Концепции развития «Siemens» URL: <https://new.siemens.com/ru/ru.html> (дата обращения: 2.04.2020). – Текст: электронный.
43. Копылов И. П. Электрические машины: учебник для бакалавров/ И.П. Копылов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2012. – 675с.
44. Красневский Л.Г., Поддубко С.Н., Николаев Ю.И. Перспективы применения гибридных силовых установок в военной автомобильной технике (по материалам зарубежной печати) // Актуальные вопросы машиноведения : сб. научн. тр. / ОИМ НАН Беларуси. Вып. 3. Минск, 2014. С.77-82.
45. Кузнецов В.А., Николаев В.В. Стратегия проектирования вентильно-индукторного стартер-генератора // Электротехника, 2005, №4 – С.46-50.
46. Ледовский А. Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами/ А.Н. Ледовский. М.: Энергоатомиздат, 1985. – 168с.
47. Лузин М.И. Магнитоэлектрический вентильный двигатель с улучшенными массогабаритными показателями и малым значением момента "залипания" ротора//Электричество. 2010. - №6. - с.45-48.

48. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника М.: Техносфера, 2005. – 632 с.
49. Мигаль В.Д., Двадненко В.Я. Выбор электродвигателей для электромобилей и гибридных автомобилей / Вестник ХНАДУ, вып. 75, 2016 с. 116-119.
50. Мигунов А.Л., Кауров С.Ю. Анализ и выбор перспективных постоянных магнитов для магнитных систем стартер-генераторных установок легковых автомобилей // Вестник транспорта Поволжья. – Самара, 2013., №1. – С. 30-33.
51. Мигунов А.Л., Кауров С.Ю. Исследование работы на модели интегрированного стартер-генератора в генераторном режиме // Известия МГТУ «МАМИ». Транспортные средства и энергетические установки. Научный рецензируемый журнал. – М., МГТУ «МАМИ», Москва № 2(24), том 1, 2015, С. 100-105.
52. Мигунов А.Л., Кауров С.Ю. Моделирование работы электропусковой системы автомобиля на базе интегрированного стартер-генератора // Вестник транспорта Поволжья. – Самара, 2013., №1. – С. 49-57.
53. Мигунов А.Л., Кауров С.Ю. Моделирование работы интегрированной стартер-генераторной установки в генераторном режиме со стабилизацией выходного напряжения // Вестник транспорта Поволжья. – Самара, 2013., №6. – С. 63-71.
54. Мигунов А.Л., Кауров С.Ю. Моделирование работы электропусковой системы автомобиля на базе интегрированного стартер-генератора при ограничении пускового тока // Вестник транспорта Поволжья 2014, Самара, № 3 (45). – с. 31-40.
55. Мигунов А.Л., Кауров С.Ю., Алимбеков М.Н. Исследование на модели электро-пусковой системы автомобиля на базе интегрированного стартер-генератора // Известия МГТУ «МАМИ» № 2(24), том 1, Москва, 2015. – С. 105-111.
56. Мигунов А.Л., Кауров С.Ю., Алимбеков М.Н. Математическая модель трехфазного, многополюсного бесконтактного двигателя постоянного тока / Вестник транспорта Поволжья, Самара № 3(57), 2016, с. 71-77.
57. Мигунов А.Л., Кауров С.Ю., Алимбеков М.Н. Эквивалентная модель трехфазного многополюсного бесконтактного двигателя постоянного тока в системах управления и регулирования // Вестник Самарского государственного университета путей сообщения, Самара № 2 (36), 2017. - с. 94-99.
58. Мигунов А.Л., Кауров С.Ю., Алимбеков М.Н. Эквивалентная модель вентильного электрического двигателя на основе трехфазной синхронной машины с постоянными магнитами для систем управления и регулирования // Изв. вузов. Электромеханика. 2017. Т. 60, № 5. С. 25-30.

59. Мигунов А.Л., Кауров С.Ю., Репин А.С. Моделирование работы системы пуска автомобиля с интегрированным стартер – генератором на базе бесконтактного двигателя постоянного тока // Труды всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: состояние, проблемы перспективы». – Оренбург, ИПК ГОУ ОГУ, 2010. – с.153-157.
60. Мигунов А.Л., Кауров С.Ю., Репин А.С. Моделирование работы системы пуска легкового автомобиля на базе интегрированного стартер-генератора // Материалы I-й международной научной - практической конференции «Современная наука: теория и практика».- Ставрополь, ГОУ ВПО Северо-Кавказский ГТУ, 2010. – с. 218-221.
61. Мигунов А.Л., Кауров С.Ю., Репин А.С. Исследование модели системы пуска легкового автомобиля на базе интегрированного стартер-генератора // Сборник материалов Всероссийской научно-технической интернет-конференции «Высокие технологии в машиностроении», Самара, ГОУ ВПО «СамГТУ», 2011. – С.1-6.
62. Мигунов А.Л., Кауров С.Ю., Сергеев В.А. Моделирование работы интегрированной стартер-генераторной установки в генераторном режиме// Вестник транспорта Поволжья. – Самара, 2013., №2. – С. 36-43.
63. Мигунов А.Л., Кауров С.Ю., Тулупов П.В. Имитационное моделирование мехатронных систем с бесконтактными двигателями постоянного тока // Известия высших учебных заведений. Электромеханика 2014, Самара, № 5. – с. 57-62.
64. Мигунов А.Л., Кауров С.Ю., Юдин В.А. Моделирование генераторного режима работы интегрированной стартер-генераторной установки // «Актуальные проблемы автотранспортного комплекса»: межвузовский сб. науч. статей. – Самара.: Самар. гос. техн. ун-т, 2014. – с. 116-125.
65. Мигунов А.Л., Кауров С.Ю., Юдин В.А. Моделирование стартерного режима работы электропитающей системы автомобиля на базе интегрированного стартер-генератора // «Актуальные проблемы автотранспортного комплекса»: межвузовский сб. науч. статей. – Самара.: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. – с. 130-141.
66. Мигунов А.Л., Кауров С.Ю., Юдин В.А. Стартер-генераторное устройство для легковых автомобилей // Актуальные проблемы автотранспортного комплекса: межвуз. сб.науч.статей (с междунар.участием) – Самара: СамГТУ, 2012. – С.50-61.
67. Мигунов А.Л., Трошин В.В., Кауров С.Ю. Математическая модель вентильного электрического двигателя на основе трехфазной синхронной машины с постоянными магнитами// Изв. вузов. Электромеханика. 2016., № 6(548). С. 18-22.

68. Мигунов А. Л., Тулупов П. В., Кауров С. Ю. Постоянные магниты для мехатронных систем на базе вентильной электромашины // Автомобильная промышленность. – М.: Издательство "Инновационное машиностроение" – 2015. – № 12. – С. 12-14.
69. Моделирование процесса пуска двигателя внутреннего сгорания электрическим стартером / Клиначев Н.В., Воронин С.Г., Согрин А.И. [и др.]. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2015 – Т. 15, № 2 – С. 49–56.
70. Нгуен Куанг Тхиеу, Клюкин П.Н. Современные автомобильные стартер-генераторы и системы управления ими / Издательство "Инновационное машиностроение"(Москва) ГРУЗОВИК № 9, 2011, С. 7-12.
71. Ник Гиббс. Плагин-гибриды будут преобладать среди автомобилей с электрофицированным приводом в Европе / Ник Гиббс // Automotive News Europe // 2015 – № 6 (95). – С. 20–21.
72. Николаев В.В. Стартер-генератор автономных объектов на основе вентильно-индукторной машины : диссертация ... кандидата технических наук : 05.09.01. - Москва, 2005. - 142 с. : ил.
73. Николаев В.В., Рыбников В.А. Разработка интегрированного стартер-генератора на основе вентильно-индукторной машины // Электричество, 2005, №5 – С.32-38.
74. Овсянников Е.М., Клюкин П.Н. Стартер - генераторные устройства для двигателей внутреннего сгорания автомобилей // Материалы Международной научно-технической конференции Ассоциации автомобильных инженеров (ААИ) "АВТОМОБИЛЕ- И ТРАКТОРОСТРОЕНИЕ В РОССИИ: ПРИОРИТЕТЫ РАЗВИТИЯ И ПОДГОТОВКА КАДРОВ", посвященной 145-летию МГТУ "МАМИ". Книга 3 (Секция 3 «Электроника, электромеханические преобразователи и системы управления»), Москва, МГТУ «МАМИ», 2010 г., С.135-138.
75. Овчинников И. Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность) / И. Е. Овчинников: Курс лекций. – СПб.: КОРОНА-Век, 2007. – 336 с. : ил.
76. Осин И.Л., Шакарян Ю.Г. Электрические машины: Синхронные машины: учеб. пособие для вузов по спец. «Электромеханика» / Под ред. И.П. Копылова. – М.: Высшая школа, 1990. – 304 с.
77. Патент на изобретение № 2657702 Российская Федерация. Гибридное транспортное средство с асинхронным двигателем / Г.И. Однокопылов, Ю.Н. Дементьев, И.А. Розаев, Е.П. Сенькив; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет". Оpubл. 14.06.2018, Бюл. № 17.

78. Патент на изобретение № 2650889 Российская Федерация. Стартер-генератор / С.Ю. Кауров, А.Л. Мигунов, М.Н. Алимбеков, В.А. Юдин; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Самарский государственный технический университет". Опубл. 18.04.2018, Бюл. № 11.
79. Патент на изобретение № 2543076 Российская Федерация. Стартер-генератор автомобиля / С.Ю. Кауров, А.Л. Мигунов, В.А. Юдин; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Самарский государственный технический университет". Опубл. 27.02.2015, Бюл. № 6.
80. Патент на изобретение № 2453034 Российская Федерация. Устройство управления асинхронным стартер-генератором / С.Ю. Кауров, Л.Я. Макаровский, А.Л. Мигунов, А.С. Репин, С.В. Умывалкин; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Самарский государственный технический университет". Опубл. 10.06.2012, Бюл. № 16.
81. Перспективы применения гибридных силовых установок на грузовых автомобилях / Черняков А.А., Матвеев В.А., Новичков А.В. // Всероссийская (национальная) научно-практическая конференция, посвященная 90-летию со дня рождения профессора Г.Б. Гальдина Том. II "Роль вузовской науки в решении проблем АПК" Пенза, 2018/ С. 97-98.
82. Перспективы развития автомобилей с гибридной силовой установкой / Сидоров М.В., Зар Ни Лин, Чижевский К.В., Семенов М.А., Сидоров В.Н. // Международный журнал перспективных исследований, Т.10, №1, 2020, С.67-80.
83. Поликер Б.Е., Михальский Л.Л., Марков В.А., Васильев В.К., Буханец Д.И. Дизельные двигатели для агрегатов и электростанций/ Москва: Легион-Автодата, 2006 – с.328.
84. Постоянные магниты: Справочник/Альтман А. Б., Герберг А. Н., Гладышев П. А. и др; Под ред. Ю. М. Пятина. — 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1980. — 488 с, ил.
85. Реднов Ф.А., Пахомин С.А., Алиев А.Я. Стартер – генераторное устройство для автомобилей семейства ВАЗ // Известия ВУЗов. Сев. Кав. регион. Электромеханика. – 2004 –№1. – С.68-69.
86. Решетников А.Н., Харитонов С.А. Управление синхронной электрической машиной с возбуждением от постоянных магнитов в стартер-генераторной установке / Научный вестник НГТУ том 55, № 2, 2014, с. 52–59.
87. Рихтер Р. Электрические машины. Т.1– Л.М.:ОНТИ СССР, 1935. –597с.

88. Стартер-генераторная система для вспомогательной силовой установки / Левин А.В., Халютин С.П., Давидов А.О., Жмуров Б.В., Харитонов С.А., Жарков М.А. [и др.]// Научный Вестник МГТУ ГА Том 20, № 05, 2017 с.50-66.
89. Севернс Р., Блум Г. Импульсные преобразователи постоянного напряжения для систем вторичного электропитания. Перевод с английского – М.: Энергоатомиздат, 1988. -294.
90. Создание параметрической модели для расчета электрических машин, с использованием объектов программного обеспечения Elcut Д.Ю. Бондарь , 2019 – с.84 Режим доступа: <https://elcut.ru/publications/bondar1.pdf>, свободный.
91. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для студ. высш. учеб. заведений. – М.:Издательский центр «Академия», 2006. – 272 с.
92. Сугробов А.М. Проектирование электрических машин автономных объектов: учебное пособие для вузов / А.М. Сугробов, А.М. Русаков. — М.: Издательский дом МЭИ, 2012. — 304 с.: ил.
93. Теория, конструкция и расчет автотракторного электрооборудования: Учеб. для машиностроит. техникумов по спец. "Электрооборудование автомобилей и тракторов". Под общ. ред. М. Н. Фесенко. - 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 381с. : ил.
94. Традиционные и гибридные приводы. Под редакцией Конрада Райфа. Перевод с нем. ЧМП РИА «GMM-пресс».- М.: ООО «Издательство «За рулем»»,2014. – 224с.
95. Фираго Б.И., Павлячик Л.Б. Регулируемые электроприводы переменного тока Минск: Техноперспектива, 2006. – 363 с.
96. Ханахмедова С.А. Исследование электромеханического переходного процесса стартер - генератора / С. А. Ханахмедова // Известия вузов. Электромеханика. – 2016 – № 4 (546). – С. 21-26.
97. Ханахмедова С.А. Стартер-генератор на борту подвижных установок. /ЕЛЕКТРОТЕХНІКА Електротехніка та електроенергетика. 2012. № 2 с 34-37ISSN 1607–6761.
98. Шевченко А.Ф., Медведко А.С., Бухгольц А.С. и др. Стартер-генераторное устройство для легковых автомобилей класса ВАЗ-2110./ — Электротехника. 2003., №9. – С. 15-19.
99. Электрические генераторы с постоянными магнитами / В. А. Балагуров, Ф. Ф. Галтеев. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 279с.
100. Электрический привод: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Г. Б. Онищенко. – Москва: Издательский центр «Академия», 2006. – 288с.

101. Электромеханические системы: учебн. пособие для вузов /Б.Р. Липай, А.Н. Соломин, П.А. Тыричев; под редакцией С.И. Маслова. М.: Издательский дом МЭИ, 2008 — 351 с.
102. Ютт В.Е. Электрооборудование автомобилей: Учеб. для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 440 с.: ил.
103. Acarnley P. P. and Watson J. F., "Review of Position-Sensorless Operation of Brushless Permanent-Magnet Machines", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 53, no. 2, pp. 352–362, Apr. 2006.
104. Basiswissen Hybridantriebe und alternative Kraftstoffe Editors: Konrad Reif (Hrsg.) Publisher Springer Vieweg Copyright Holder Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2018, V- 86, ISBN 978-3-658-18092-8.
105. Chengyuan He, Thomas Wu, Analysis and Design of Surface Permanent Magnet Synchronous Motor and Generator / CES TRANSACTIONS ON ELECTRICAL MACHINES AND SYSTEMS, vol. 3, no. 1 March 2019, pp. 94-100.
106. Florin Nicolae Jurca, Radu Petru Hangiu, Claudia Marciș Design and performance analysis of an Integrated Starter-Alternator for Hybrid Electric Vehicles Advanced Engineering Forum, 2013-06-27, 2013, vols. 8-9, pp 453-460 ISSN: 2234-991X.
107. Franco Leonardi, Michael Degner, Integrated Starte Generator Based HEVs: A Comparison Between Low and High Voltage Systems //IEEE international Electric Machines and Drives Conference 2001, P.622-629.
108. Hanselman, Duane C. Brushless permanent magnet motor design / Duane Hanselman. – 2nd ed, Magna Physics Publishing, 2006 -392p. cm.
109. Hemchand Immaneni Mathematical Modelling And Position Control Of Brushless Dc(Bldc) Motor/ International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA) vol. 3, Issue 3, May-Jun 2013, pp.1050-1057 ISSN: 2248-9622.
110. Hendershot I.R., Miller T.J.E. Design of Brushless permanent magnet motors. – Magna Physics Publishing and Clarendon Press. Oxford. 1994.
111. Ioan-Adrian Viorel, Loránd Szabó, Lars Löwenstein, Cristian Șteț «Integrated starter-generators for automotive applications»/ACTA Electrotehnica, volume 45, number 3, 2004 P.255-260.
112. Ion Boldea, Electric Generators and Motors: an overview/CES TRANSACTIONS ON ELECTRICAL MACHINES AND SYSTEMS, vol. 1, no. 1, March 2017, pp.3-14.
113. Khadeev, R. (2017) The Original Connection of Synchronous Motor. Engineering, 9, 680-682. doi:10.4236/eng.2017.97041.
114. Khadeev, R. (2017) Synchronous Motor for the Vehicle. Engineering, 9, 251-253. doi:10.4236/eng.2017.93012.
115. Kuypers, M., “Application of 48 Volt for Mild Hybrid Vehicles and High-Power Loads,” SAE Technical Paper 2014-01-1790, 2014, doi:10.4271/2014-01-1790.

116. Lee, S., Cherry, J., Safoutin, M., Neam, A. et al., "Modeling and Controls Development of 48V Mild Hybrid Electric Vehicles," SAE Technical Paper 2018-01-0413, 2018, P.1-15, doi:10.4271/2018-01-0413.
117. Management System. – URL: <http://www.zeva.com.au> (дата обращения: 10.10.2019). – Текст: электронный.
118. Po-Wei Huang, Mi-Ching Tsai, and Chinweze U. Ubadigha, Investigation of High Power Density Permanent Magnet Integrated Starter/Generator Based on Dual Air-Gap Design / 2017 IEEE Int. Conf. of Elec. Mach., pp. 609-614.
119. Rassem R. Henry, Bruno Lequesne, Shaotang Chen, Jeffrey J. Ronning, Yanhong Xue, Belt-Driven Starter-Generator for Future 42-Volt System //SAE World Congress, March 5-8, 2001.
120. Torres M. and Lopes L., "Virtual Synchronous Generator: A Control Strategy to Improve Dynamic Frequency Control in Autonomous Power Systems," Energy and Power Engineering, vol. 5 no. 2A, 2013, pp. 32-38. doi: 10.4236/epe.2013.52A005.
121. Zhang G. H., Ma C. Q., Sun H. Y., Zhang L. F., Liu L., and Wang K., Optimization Design of Interior PM Starter-Generator/ 2017 IEEE Int. Conf. of Elec. Mach. and Systems, pp. 609-614.
122. Zhenyang Zhang, Huijuan Liu, Tengfei Song, Qian Zhang, Wenluan Hu, and Wei Liu, Performance Evaluation of a 60kW IPM Motor for Medium commercial EV Traction Application/CES TRANSACTIONS ON ELECTRICAL MACHINES AND SYSTEMS, vol. 3, no. 2, June 2019, pp. 195-203.
123. Zhuoran Zhang, Jian Huang, Yunyi Jiang Weiwei Geng and Yanwu Xu, Overview and Analysis of PM Starter/Generator for Aircraft Electrical Power Systems/CES TRANSACTIONS ON ELECTRICAL MACHINES AND SYSTEMS, vol. 1, no. 2, June 2017, pp.117-131.
124. Zhuoran Zhang, Ye Liu, Jincal Li, A HESM-based Variable Frequency AC Starter-Generator System for Aircraft Applications/IEEE Transactions on Energy Conversion, August 2018, PP(99):1-1
125. Zubkov Yuri, Vereshagin Vladislav; Kaurov Sergey. Evaluation of thermal condition of permanent-magnet starter-generator in continuous operation mode / 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), DOI: 10.1109/ICOECS50468.2020.9278435, 978-1-7281-9115-7 ©2020 IEEE (Scopus).



**СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ**

АБ – аккумуляторная батарея

АО – автономный объект

АСУД – автоматическая система управления дизельным двигателем

АЦП – аналого-цифровой преобразователь

БДПТ – бесконтактный двигатель постоянного тока

ВДПМ – вентильный двигатель с постоянными магнитами

ВМГ – вентильный магнитоэлектрический генератор

ВМПТПМ – вентильная машина постоянного тока с постоянными магнитами

ВМПТЭМ – вентильная машина постоянного тока с электромагнитным возбуждением

ВСУ – вспомогательная силовая установка

ДВС – двигатель внутреннего сгорания

ДГУ – дизель-генераторная установка

ДПР – датчик положения ротора

ДПТ – двигатель постоянного тока

ДТ – датчик тока

ИРН – импульсный регулятор напряжения

ИСГ – интегрированный стартер-генератор

КМПТ – коллекторная машина постоянного тока

КПД – коэффициент полезного действия

МДС – магнитодвижущая сила

МК – микроконтроллер

МС – магнитная система

ПК – персональный компьютер

ПМ – постоянные магниты

РЗМ – редкоземельные материалы

СГПМ – синхронный генератор с постоянными магнитами

СГУ – стартер-генераторное устройство

СДПМ – синхронный двигатель с постоянными магнитами

СМПМ – синхронная машина с постоянными магнитами

ТС – транспортное средство

ШИМ – широтно-импульсная модуляция

ЭДС – электродвижущая сила

ЭМ – электрическая машина

## ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А



Акт использования результатов диссертационной работы  
Каурова Сергея Юрьевича на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Результаты исследований интегрированного стартер-генератора (ИСГ) с магнитоэлектрическим возбуждением применены при создании генерирующего комплекса электроагрегата мощностью 5 кВт в части использования:

- инженерной методики проектирования, выбора электромагнитных нагрузок, определения основных размеров ИСГ с магнитоэлектрическим возбуждением;
- исследования магнитного поля ИСГ в генераторном, стартерном режимах и выбора на основе алгоритма многоуровневой оптимизации близких к оптимальным значений зазора, размеров зубцово-пазовой зоны, ярма статора и постоянных магнитов;
- анализа работы ИСГ в режиме запуска ДВС с оценкой пускового тока, момента и получения данных о динамических характеристиках системы ИСГ-ДВС;

Директор ООО «Нотор»



Игнатов С.Я.



МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
 федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
 высшего образования  
 «Самарский государственный технический университет»  
 (ФГБОУ ВО «СамГТУ»)

УТВЕРЖДАЮ  
 Проректор по учебной работе СамГТУ  
 д.п.н., профессор  
 О.В. Юсупова  
 «    »    20    г.

АКТ

Использования результатов диссертационной работы С.Ю. Каурова «Интегрированный стартер-генератор автономных энергетических объектов на базе синхронной машины с постоянными магнитами» в учебном процессе.

Мы, нижеподписавшиеся, декан электротехнического факультета А.С. Ведерников, заведующий кафедрой «Электромеханика и автомобильное электрооборудование» Ю.А. Макаричев, составили настоящий акт о том, что методики проектирования, компьютерного моделирования, математические модели и методы расчёта параметров схемы управления интегрированного стартер-генератора с магнитоэлектрическим возбуждением, используются в учебном процессе СамГТУ при подготовке бакалавров направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» профилей «Электромеханика», «Электрооборудование автомобилей и тракторов» и магистров направления 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» «Современные технологии в электромеханике и автоматизированном электроприводе».

Декан ЭТФ, к.т.н., доцент

А.С. Ведерников

Зав.кафедрой «ЭМАЭ», д.т.н., профессор

Ю.А. Макаричев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) **RU** (11) **2 543 076** (13) **C2**

(51) МПК  
F02M 11/04 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2013129596/07, 27.06.2013  
 (24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
27.06.2013  
 Приоритет(ы):  
 (22) Дата подачи заявки: 27.06.2013  
 (43) Дата публикации заявки: 10.01.2015 Бюл. № 1  
 (45) Опубликовано: 27.02.2015 Бюл. № 6  
 (56) Список документов, цитированных в отчете о  
поиске: RU2265133 C1, 27.11.2005. SU 1792498  
A3, 30.01.1993. RU 2104612 C1, 10.02.1998 .  
GB2443032 A, 23.04.2008 . US6992403 B1,  
31.01.2006 . US2012247270 A1, 04.10.2012  
 Адрес для переписки:  
443100, г.Самара, ул. Молодогвардейская, 244,  
Главный корпус ФГБОУ ВПО СамГТУ,  
патентный отдел

(72) Автор(ы):  
Кауров Сергей Юрьевич (RU),  
Мигунов Александр Леонидович (RU),  
Юдин Владимир Александрович (RU)  
 (73) Патентообладатель(и):  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования "Самарский  
государственный технический университет"  
(RU)

RU 2 543 076 C 2

(54) СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОР АВТОМОБИЛЯ

(57) Реферат:  
Изобретение относится к области электротехники и может быть использовано в автономных объектах, в частности автомобилях для генерирования электрической энергии и запуска двигателей внутреннего сгорания.  
Техническим результатом является повышение ресурса безотказной работы при одновременном снижении энергопотребления стартер-генератора. Согласно изобретению стартер-генератор снабжен датчиком угловой скорости вращения, устройством сравнения, измерителем угловой скорости вращения ротора, пропорционально-интегральным регулятором угловой скорости, вход которого соединен с выходом устройства сравнения, на входы которого подаются сигналы с датчика угловой скорости вращения и с

измерителя угловой скорости вращения ротора, а выход пропорционально-интегрального регулятора угловой скорости соединен с аналоговым входом управляющего контроллера, а выходы управляющего контроллера соединены с входами ключевых транзисторов трехфазного мостового инвертора, на выходе стартер-генератора введен стабилизатор напряжения, выход которого подключен к аккумуляторной батарее и нагрузке, причем пропорционально-интегральный регулятор угловой скорости настраивают на компенсацию эквивалентной механической постоянной времени стартер-генератора при работе в стартерном режиме. 4 ил.

RU 2 543 076 C 2

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** (11) **2 650 889**<sup>(13)</sup> **C2**

(51) МПК  
H02P 9/02 (2006.01)  
F02N 11/08 (2006.01)  
F02N 11/14 (2006.01)  
B60K 6/20 (2007.10)  
B60L 11/08 (2006.01)  
B60L 11/12 (2006.01)  
B60L 15/20 (2006.01)  
B60W 10/08 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

H02P 9/02 (2006.01); F02N 11/08 (2006.01); F02N 11/14 (2006.01); B60K 6/20 (2006.01); B60L 11/08 (2006.01); B60L 11/12 (2006.01); B60L 15/20 (2006.01); B60W 10/08 (2006.01)

(21)(22) Заявка: 2016122341, 06.06.2016

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
06.06.2016

Дата регистрации:  
18.04.2018

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 06.06.2016

(43) Дата публикации заявки: 07.12.2017 Бюл. № 34

(45) Опубликовано: 18.04.2018 Бюл. № 11

Адрес для переписки:

443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244,  
Главный корпус ГОУ ВО СамГТУ, патентный  
отдел

(72) Автор(ы):

Кауров Сергей Юрьевич (RU),  
Мигунов Александр Леонидович (RU),  
Алимбеков Марат Наильевич (RU),  
Юдин Владимир Александрович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования "Самарский государственный  
технический университет" (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: RU 2543076 C2, 27.02.2015. RU  
2510796 C1, 10.04.2014. RU 2265133 C1,  
27.11.2005. GB 2520378 A, 20.05.2015. DE  
10103538 B4, 22.11.2007. JPH 10509017 A,  
02.09.1998. US 2009174188 A1, 09.07.2009. WO  
9702428 A1, 23.01.1997.

(54) СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОР

(57) Реферат:

Изобретение относится к области электротехники и может быть использовано в автономных объектах, в частности автомобилях для генерирования электрической энергии и запуска двигателей внутреннего сгорания. Техническим результатом является повышение надежности, ресурса безотказной работы стартер-генератора без увеличения размеров и веса инвертора в стартерном режиме работы устройства. Стартер-генератор снабжен датчиком

тока, содержащим шунт во входной цепи инвертора и усилитель сигнала шунта, выход которого соединен с входом узла токоограничения, выход которого соединен с входом второго устройства сравнения, другой вход которого соединен с выходом пропорционально-интегрального регулятора угловой скорости, а выход второго устройства сравнения соединен с аналоговым входом управляющего контроллера. 4 ил.

RU 2 650 889 C 2

RU 2 650 889 C 2

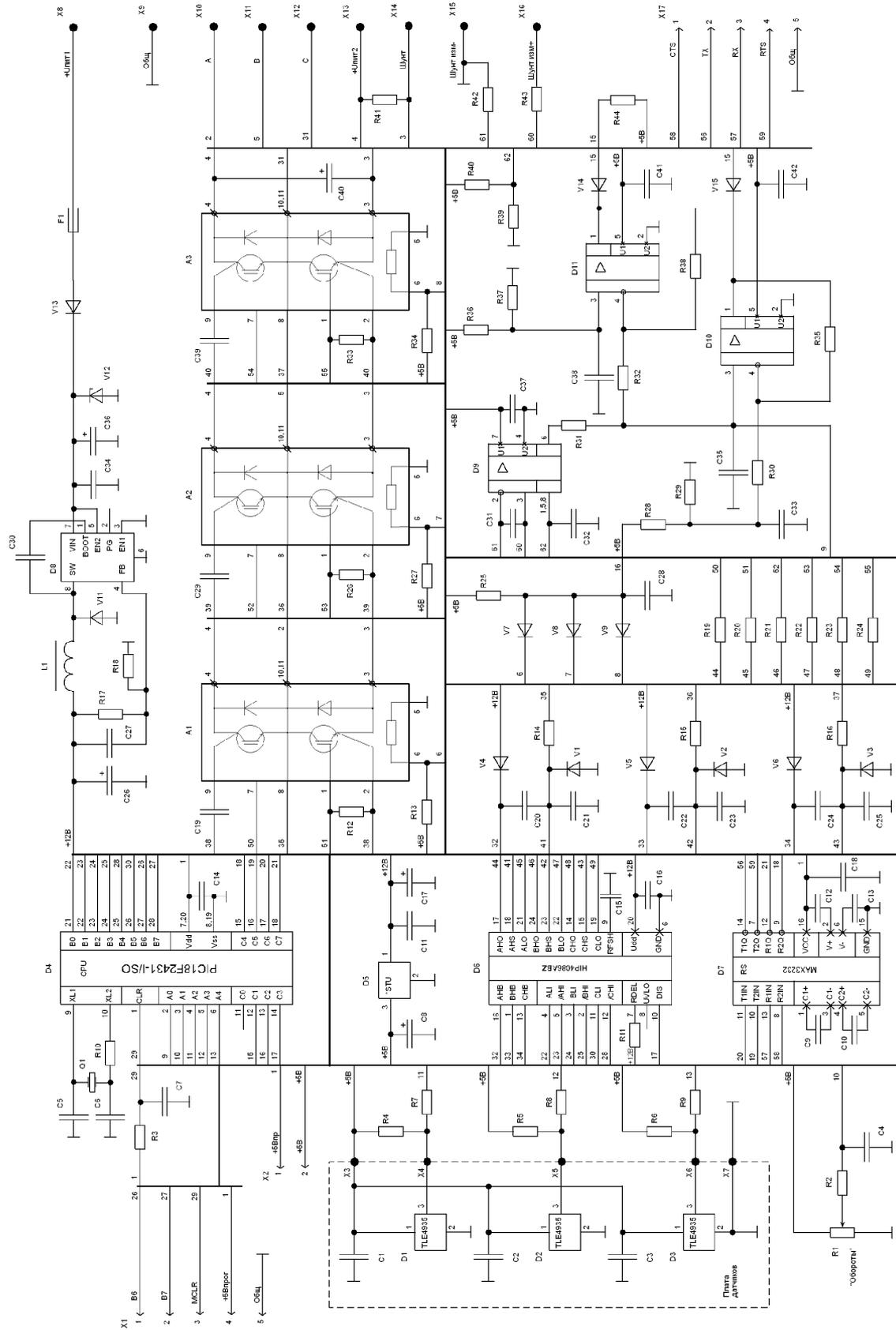


Рисунок П.1 - Принципиальная электрическая схема системы управления ИГТ в стартерном режиме