

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»

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

Самара – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «СамГТУ») на кафедре «Электромеханика и автомобильное электрооборудование»

Научный руководитель: **Зубков Юрий Валентинович**, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «СамГТУ», г. Самара, профессор кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование»

Официальные оппоненты: **Ганджа Сергей Анатольевич**, доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» (ЮУрГУ (НИУ)), г. Челябинск, заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники»

**Вавилов Вячеслав Евгеньевич**, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» ("УГАТУ"), г. Уфа, заведующий кафедрой «Электромеханика»

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «**Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)**», ФГБОУ ВО «**МАИ (НИУ)**», г. Москва

Защита состоится 28 декабря 2021 г. в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.217.04 при ФГБОУ ВО «СамГТУ» по адресу: г. Самара, ул. ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус, ауд. № 200.

С авторефератом и диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «СамГТУ», а также на официальном сайте диссертационного совета по адресу <http://d21221704.samgtu.ru>.

Отзывы на автореферат просим высылать в двух экземплярах, заверенных печатью, по адресу: 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Самарский государственный технический университет, главный корпус, ученому секретарю диссертационного совета Д212.217.04; факс: (846) 278-44-00, e-mail: [a-ezhova@yandex.ru](mailto:a-ezhova@yandex.ru)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.217.04  
кандидат технических наук



Е.В. Стрижакова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В настоящее время расширяется применение мехатронных систем в мобильных автономных объектах (АО).

Современное транспортное средство (ТС): 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 АО или ТС является силовая установка. Чаще других в таких объектах в качестве основного источника энергии используются двигатели внутреннего сгорания или газотурбинные двигатели большой мощности. Современная специальная техника, в том числе боевая, оснащается все большим количеством различной электроники и силовых электроприводов, что ведет к росту установленной мощности энергоприемников. Однако, мощность генераторной установки ( $10 \div 15$  кВт) является весьма малой по сравнению с мощностью основного двигателя ( $600 \div 800$  кВт). Использовать основной двигатель только для энергопитания не всегда целесообразно с экономической и тактической точек зрения. Например, танковый двигатель имеет очень ограниченный моторесурс, большой расход топлива и при работе производит сильный демаскирующий эффект. Все эти факторы проявляют себя и в режиме стоянки, когда требуется питание электросистем (зарядки аккумуляторов, радио, системы управления огнем, кондиционирования и др.). Для решения этой проблемы в современных АО в последнее время используют вспомогательные силовые установки (ВСУ) относительно малой мощности. Назначение ВСУ – обеспечение АО электрической энергией для продолжительного выполнения своих функций без включения основного двигателя. Основной частью ВСУ ТС являются системы запуска двигателя и генерации электрической энергии.

Наличие двух отдельных электрических машин (ЭМ) не всегда оправдано и часто невыполнимо по условиям размещения. Противоречивые требования к таким системам долгое время не позволяли объединить две отдельных электрических машины в одном устройстве – стартер-генераторе (СТГ).

Решению данной проблемы способствовало создание высококоэрцитивных магнитов, с хорошими 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).

Использование в АО синхронной машины с постоянными магнитами (СМПМ) является перспективным решением, т.к. она имеет более

простую, технологичную и надежную конструкцию по сравнению с ЭМП других типов, хорошо приспособлена для работы во взрывоопасных и агрессивных средах, в условиях низких температуры и давления.

Другим трендом конструктивного исполнения СТГ АО является его интегрирование в силовую установку - интегрированный стартер-генератор (ИСГ), что существенно облегчает компоновку и экономит место в ограниченном околосредоточительном пространстве.

Основополагающими в области разработки, исследования и проектирования электромеханических систем на базе СМПП, 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, 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 СМПП, многие вопросы в области проектирования и математического моделирования остались нерешенными.

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.

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

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

**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 СМПП 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, массо-габаритными 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:**

1. Разработаны элементы инженерной методики проектирования ИСГ на базе СМПМ. 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 и 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 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.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных научно-технических конференциях: «Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии», Тольятти, 2009; «Современные автомобильные материалы и технологии» САМИТ, Курск, 2009; «Инновации в сфере производства, разработки и диагностики электрического и электронного оборудования автомобилей», Москва, 2015; Электротехнические

комплексы и системы, Новосибирск, 2016; «Ашировские чтения», Самара, 2020; «Электротехнические комплексы и системы», Уфа, 2020 г.

### **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.** Лично автором разработаны элементы методики проектирования ИСГ, методика компьютерного моделирования, получены 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.

**Структура и объем работы.** 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.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность, 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 стартер-генераторных устройств (СГУ) в РФ и за рубежом в таких областях, как автомобильная промышленность, авиация, боевая гусеничная и колесная техника. Показано, что использование двух отдельных ЭМ для запуска двигателя и генерации электрической энергии для собственных нужд АО не рационально. Для сокращения массы и габаритов ЭМП две указанные выше функции следует реализовать в одной ЭМ, причем эта машина интегрируется в ВСУ. Такая интеграция позволяет исключить

промежуточные звенья в виде ременных и цепных передач, что повышает эксплуатационные показатели стартер-генератора.

Приведена классификация ЭМ стартер-генераторных устройств ТС и подвижных АО, рассмотрены достоинства и недостатки различных типов ЭМП при их использовании в качестве ИСГ, определен наиболее предпочтительный вариант – СМПМ.

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 режимах 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 ЭМ 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 требование 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.

Для синхронного генератора значение предельной электрической мощности в данном случае равно:

$$P_{\text{э пред}} = 264\lambda_{\Gamma} \left( \frac{v_{\text{д}}^3}{n^2} \right) \frac{1}{1 + \sin \varphi} \left( \frac{B_{\text{М0}} H_{\text{м.к.з}}}{\sigma_0} \right) p k_r, \quad (1)$$

где  $\lambda_{\Gamma} = l/D$  – отношение длины активной части машины к диаметру якоря;  $v_{\text{д}}$  – допустимая окружная скорость ротора;  $n$  – частота вращения ротора;  $B_{\text{М0}}$  – индукция в нейтральном сечении магнита в режиме холостого хода (х.х.);  $H_{\text{м.к.з}}$  ( $H_{\text{МК}}$ ) – напряженность поля в магните при установившемся коротком замыкании (к.з.);  $p$  – число пар полюсов;  $\sigma_0$  – коэффициент рассеяния магнитного потока в режиме х.х.;  $\cos \varphi$  – коэффициент мощности нагрузки;  $k_r = 4V_{\text{М}}/\pi D^2 l$  – коэффициент заполнения магнитом объема индуктора;  $V_{\text{М}}$  – объем магнита.



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

$$V_M = \frac{P_{\text{пред}} \sigma_0 n^2 (1 + \sin \varphi)}{264 \lambda_{\Gamma} v_d^3 B_{M0} H_{MK} p \pi D^2 l} \quad (2)$$

Проведённый анализ современных материалов ПМ и конструктивного исполнения перспективных СМПМ показал, что наиболее целесообразным является применение высококоэрцитивных ПМ (NdFeB, SmCo) в виде сегментов, закрепленных на призматическом магнитопроводе ротора, где магниты удерживаются на поверхности индуктора бандажом из немагнитного материала.

На основании анализа типов и схем подключения якорных обмоток ИСГ к полупроводниковому преобразователю рекомендовано использование разомкнутых обмоток с реверсивным питанием, как обладающих 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 и определение расчетной мощности и основных размеров ИСГ, проектирование обмотки якоря, учет реакции якоря, расчет активных и индуктивных параметров. Эти задачи решались, в том числе, посредством численного моделирования магнитного поля в режимах работы ИСГ генератором и стартером.

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:

$$\frac{B_{\delta}}{A} = \frac{0,9 \alpha_1 \kappa_{ad} \kappa \kappa_0 e_{\delta}}{2 \sigma \alpha_p} \frac{b_M}{h_M} \frac{B_{M0}}{H_{\text{м.к.3}}}, \quad (3)$$

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

$E_0$ ;  $\alpha_1$  – коэффициент, равный отношению падения магнитного напряжения в магнитопроводе к МДС реакции якоря по продольной оси  $F_{ad}$ .

Из последнего выражения видно, что уменьшение отношения  $\frac{B_{M0}}{H_{\text{м.к.3}}}$

(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.

По результатам моделирования магнитного поля ИСГ получены картины магнитных полей: при х.х., продольной реакции якоря, поперечной реакции якоря (рисунок 1); распределения радиальной составляющей магнитной индукции поля: х.х. на середине воздушного зазора, продольной реакции якоря в воздушном зазоре и поперечной реакции якоря в воздушном зазоре (рисунок 2).

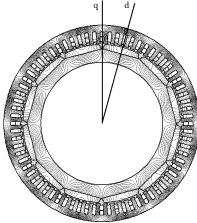


Рисунок 1 – Картина магнитного поля поперечной реакции якоря

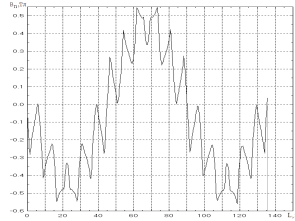


Рисунок 2 – Распределение радиальной составляющей магнитной индукции поля поперечной реакции якоря в воздушном зазоре

По результатам расчета полей возбуждения и реакции якоря были определены индуктивности реакции якоря по продольной  $L_{ad}$  и поперечной  $L_{aq}$  осям, взаимная индуктивность между индуктором и обмоткой якоря  $M_{af}$  для последующего использования при имитационном моделировании.

Определение электромагнитного момента ИСГ в стартерном режиме осуществлялось в программе ELCUT посредством вращения ротора в подпрограмме Labor Mover. Вид полученной зависимости момента от угла поворота ротора (рисунок 3) отвечает аналитическому выражению

$M_{\max} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \pm \frac{\pi}{6}\right) \leq M \leq M_{\max}$  и подтверждает адекватность модели стартерного режима ИСГ.

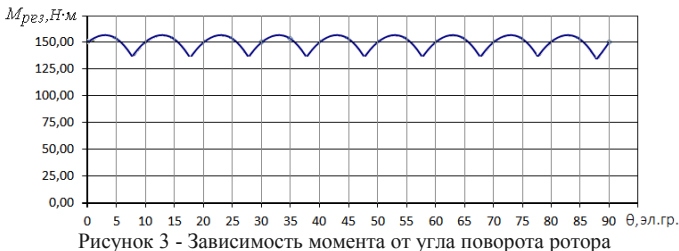


Рисунок 3 - Зависимость момента от угла поворота ротора

Проведена оптимизация параметров ИСГ методом упорядоченного перебора (сетчатый метод). В качестве главного критерия оптимизации выбран максимальный электромагнитный момент  $M_{\max}$  при работе ИСГ в режиме пуска ДВС. Математическая формулировка задачи оптимизации выглядит следующим образом:

$$M_{\max} = f(h_m, \delta, t_{p, \text{паза}}, t_{p, \text{ярма}}) = \max, \text{ при } p = \text{const}. \quad (4)$$

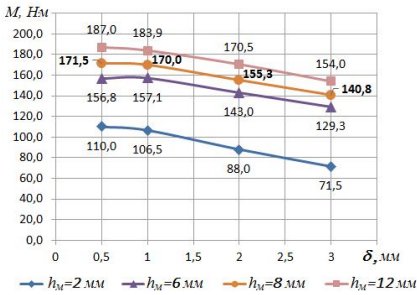


Рисунок 4 – Зависимость  $M = f(h_m, \delta)$ , при  $t_{\text{ярма}} = 12 \text{ мм}$ ,  $t_{\text{паза}} = 1,8 \text{ мм}$ ,  $p = 6$

Исследование зависимости  $M_{\max}$  проводилось при варьировании параметров ротора (высота магнита  $h_m$ ) и статора (толщина ярма  $t_{\text{ярма}}$ , величина раскрытия паза  $t_{\text{паза}}$ , величина рабочего зазора  $\delta$  (рисунок 4)). Анализ результатов решения оптимизационной задачи позволил определить размеры индуктора, зубцово-пазовой зоны статора, величину зазора, обеспечивающих максимальное значение пускового момента ИСГ при запуске ДВС.

**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.

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

$$\begin{cases} u_d = \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega_{\text{эл}} \Psi_q + R \cdot i_d, \\ u_q = \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega_{\text{эл}} \Psi_d + R \cdot i_q, \\ \Psi_d = L_d i_d + \Psi_0, \\ \Psi_q = L_q i_q; \Psi_0 = w \cdot \Phi_0 = \text{const}; \omega_{\text{эл}} = p \cdot \omega_r, \\ M_{\text{эм}} = \frac{3}{2} p (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d). \end{cases} \quad (5)$$

где  $i_d, i_q, u_d, u_q$  – проекции тока и напряжения статора на оси d и q соответственно;  $L_d, L_q$  – индуктивности синхронной машины по продольной и поперечной осям;  $R$  – активное сопротивление фазы статора;  $\omega_{\text{эл}}$  – электрическая угловая скорость ротора;  $\omega_r = \omega_{\text{эл}}/p$  – угловая частота вращения ротора;  $\Psi_d, \Psi_q$  – потокосцепления по осям d и q;  $\Psi_0$  – потокосцепление постоянных магнитов с обмоткой статора;  $M_{\text{эм}}$  – электромагнитный момент.

На рисунке 5 приведены характеристики х.х. по результатам моделирования в Matlab Simulink и аналитического расчета.

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

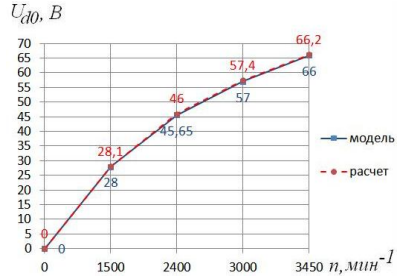


Рисунок 5 – Характеристика х.х.

Наряду с установившимися моделировались и переходные режимы ИСГ при работе генератором. Получены кривые напряжения и тока на выходе ИСГ при внезапном набросе нагрузки из режима, близкого к х.х. ( $I_H \approx 0,5A$ ), в режим, близкий к к.з. ( $I_H \approx 140A$ ), показанные на рисунке 6.

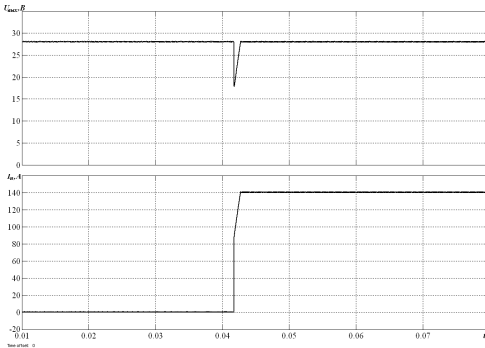


Рисунок 6 - Оциллограммы напряжения и тока при внезапном набросе нагрузки

Анализ показал, что при внезапном набросе нагрузки наблюдается кратковременный провал выходного напряжения, величина которого составляет 35%, а длительность не превышает 2 мс. На реальном ИСГ указанный провал напряжения снижается до допустимого для бортовой сети уровня.

В стартерном режиме исследовался пуск ДВС в схеме без ограничения по току статора и с ограничением.

Электромагнитные процессы ИСГ в фазных координатах описываются следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} u_A = R_s i_A + L_s \frac{di_A}{dt} + e_A, \\ u_B = R_s i_B + L_s \frac{di_B}{dt} + e_B, \\ u_C = R_s i_C + L_s \frac{di_C}{dt} + e_C. \end{cases} \quad (6)$$

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.

Электромагнитный момент ИСГ:

$$M = \frac{P_{эм}}{\omega_r} = \frac{e_A i_A + e_B i_B + e_C i_C}{\omega_r}, \quad (7)$$

где  $P_{эм}$  – электромагнитная мощность.

Анализ кривой распределения магнитной индукции  $B_\delta$  в зазоре ИСГ в стартерном режиме показал, что она имеет трапецеидальный вид.

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.

Угловой период обмотки модели в  $p$  раз больше, чем угловой период реальной многополюсной обмотки. 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:

$$B_{\delta_q}(\theta_{эл}) = \frac{4B_m}{\alpha\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1)\alpha}{(2n-1)^2} \cdot \sin(2n-1) \left[ \theta_{эл} - (k-1) \frac{2\pi}{3} \right], \quad (8)$$

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;  $\theta_{эл}$  – электрический угол поворота ротора относительно статора;

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).

Выражения для фазных ЭДС вращения:

$$\begin{cases} e'_A(\theta_{эл}) = k_{01} w \cdot D \cdot l \cdot B_m \left[ \frac{4}{\alpha \cdot \pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1)\alpha}{(2n-1)^2} \cdot \sin(2n-1) \theta_{эл} \right] \omega_r \\ e'_B(\theta_{эл}) = k_{01} w \cdot D \cdot l \cdot B_m \left[ \frac{4}{\alpha \cdot \pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1)\alpha}{(2n-1)^2} \cdot \sin(2n-1) \left( \theta_{эл} - \frac{2\pi}{3} \right) \right] \omega_r, \quad (9) \\ e'_C(\theta_{эл}) = k_{01} w \cdot D \cdot l \cdot B_m \left[ \frac{4}{\alpha \cdot \pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1)\alpha}{(2n-1)^2} \cdot \sin(2n-1) \left( \theta_{эл} - \frac{4\pi}{3} \right) \right] \omega_r \end{cases}$$

где  $k_{01}$  – обмоточный коэффициент;  $\Psi_m = k_{01} w \cdot D \cdot l \cdot B_m$  – амплитуда потокосцепления постоянных магнитов с обмотками статора.

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:

$$\begin{cases} e_A = pe'_A(\theta_{эл}) \\ e_B = pe'_B(\theta_{эл}), \\ e_C = pe'_C(\theta_{эл}) \end{cases}, \quad (10)$$

Подставляя соотношения для фазных ЭДС в (7) получим выражение для мгновенного значения электромагнитного момента ИСГ:

$$\begin{aligned} M &= p \cdot \Psi_m \cdot f_A(\theta_{эл}) \cdot i_A + p \cdot \Psi_m \cdot f_B(\theta_{эл}) \cdot i_B + p \cdot \Psi_m \cdot f_C(\theta_{эл}) \cdot i_C = \\ &= M_A + M_B + M_C \end{aligned}, \quad (11)$$

где  $M_A$ ,  $M_B$ ,  $M_C$  – электромагнитные моменты, образуемые фазами А, В, С.

К полученным уравнениям следует добавить уравнение движения:

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = M - M_c, \quad (12)$$

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

Полученные соотношения описывают математическую модель ИСГ в стартерном режиме работы, позволяющую 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.

При эксплуатации ИСГ наиболее распространенным является прямое включение в режиме пуска ДВС. Прямой пуск ДВС неблагоприятен для источника питания – АБ. Предложенный автором регулируемый запуск устраняет недостатки прямого пуска и дополнительно обеспечивает выбор люфтов в редукторе коробки передач при небольшой начальной частоте вращения. В режиме регулируемого пуска ИСГ с системой управления образует одноконтурную систему автоматического регулирования, замкнутую по скорости.

При синтезе регуляторов в системе управления приходится упрощать математическое описание ИСГ, заменяя его эквивалентным БДПТ. Как следствие, возникла необходимость уточнения состава и обоснованного выбора параметров схемы замещения эквивалентного ДПТ для обеспечения адекватного моделирования процесса запуска ДВС.

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:

$$U_{AB} = U_d = 2R_s i + 2L_s \frac{di}{dt} + e_{AB} = R_a i + L_a \frac{di}{dt} + \kappa_E \omega_r, \quad (13)$$

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;  $\kappa_E=\kappa_M=2p\Psi_m$  – постоянные ЭДС и момента соответственно.

Для остальных межкоммутационных интервалов, составляющих 60 эл. градусов по углу поворота, соотношения (13), записанные для других комбинаций фаз аналогичны.

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

$$\begin{cases} U_d = L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + \kappa_E \omega_r, \\ J \frac{d\omega_r}{dt} = M - M_n, \\ M = \kappa_M i; e_a = e_{AB} = \kappa_E \omega_r. \end{cases} \quad (14)$$

Полученная система уравнений позволяет осуществлять моделирование ИСГ в режиме пуска ДВС, в результате которого получены осциллограммы переходных процессов в замкнутой системе регулирования. Их анализ показал достаточную величину пускового момента для проворота вала ДВС. Частота вращения ИСГ в режиме пуска достигает значения  $\omega=14,3$  рад/с ( $n \approx 150$  мин<sup>-1</sup>) за 3,5с от момента начала пуска, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к электропусковым системам ТС, но величина пускового тока превышает 1000А, что негативно сказывается на бортовых потребителях и АБ.

Поэтому был проведен расчет пуска в замкнутой системе регулирования скорости с ограничением пускового тока. Анализ осциллограмм процесса пуска (рисунок 7) показал, что время достижения заданной частоты  $\omega=20$  рад/с ( $n \approx 200$  мин<sup>-1</sup>) при ограничении пускового тока больше чем без ограничения и составляет 5,2с, что в целом удовлетворяет требованиям, предъявляемым к времени запуска ДВС.

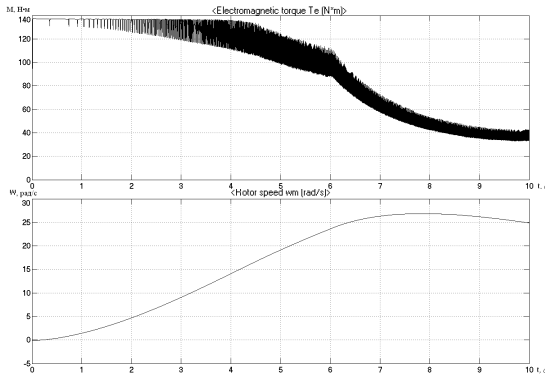


Рисунок 7 - Момент и частота вращения ИСГ в системе с ограничением пускового тока

При этом значение пускового тока, протекающего через инвертор и фазы обмотки статора ИСГ не превышает допустимого значения  $I_{доп} = 1000$  А.

**Пятый раздел** посвящен практической реализации действующего образца ИСГ (рисунок 8) с системой управления и экспериментальной верификации теоретических положений и выводов диссертационной работы. Проведены экспериментальные исследования электромагнитных и электромеханических установившихся и переходных режимов работы ИСГ на стендах, дана оценка адекватности разработанных математических моделей.

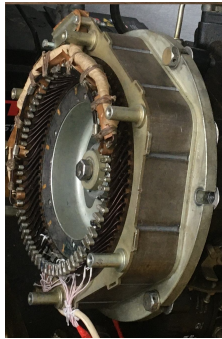


Рисунок 8 – Опытный образец ИСГ

На рисунке 9 показаны внешние опытные и расчетные характеристики генератора, сравнение которых показало достаточно хорошее совпадение (расхождение не более 5%).

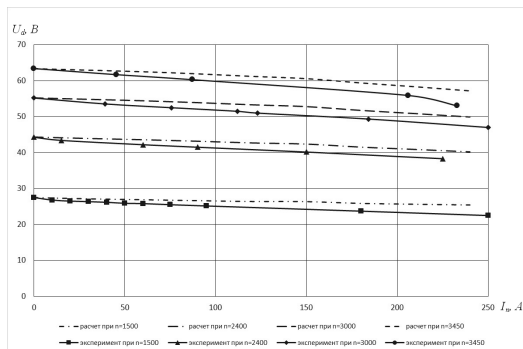


Рисунок 9 – Опытные и расчетные внешние характеристики генератора

На рисунках 10 и 11 приведены осциллограммы переходных процессов при набросе нагрузки в режиме генератора и пуске ДВС в режиме стартера соответственно.



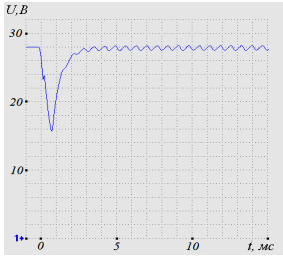


Рисунок 10 – Наброс нагрузки на генератор со стабилизацией напряжения при  $n=2400 \text{ мин}^{-1}$

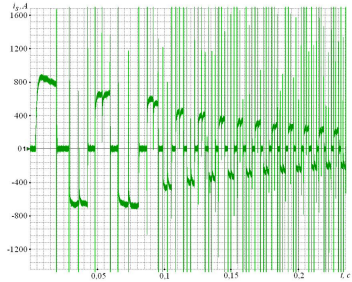


Рисунок 11 – Ток в фазе ИСГ эксперимент

Проведено сравнение основных показателей разработанного ИСГ и серийно-выпускаемых аналогов – генераторов и стартеров, предназначенных для использования на стационарных агрегатах и передвижных ТС. В качестве аналогов для сравнения выбраны следующие ЭМП: генератор Г-290В/3701; стартер AZE2632 (11.131.119). Анализ 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 ЭМП на 29%, повысить КПД в режиме генерации на 25% по сравнению с аналогом (Г-290В/3701), увеличить пусковой момент в 1,25 раза.

### 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 СТГ 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.

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.

### ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

#### **В научных изданиях, индексируемых в Scopus/Web of Science:**

1. Evaluation of thermal condition of permanent-magnet starter-generator in continuous operation mode / Y. Zubkov, V. Vereshagin, **S. Kaurov** // 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), 2020, Ufa, October 27-30, 2020.

#### **В периодических изданиях, рекомендованных ВАК:**

2. 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(37). – С. 30-33.

3. Мигунов А.Л., **Кауров С.Ю.** Моделирование работы электропусковой системы автомобиля на базе интегрированного стартер-генератора // Вестник транспорта Поволжья. – Самара, 2013., №1(37). – С. 49-57.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. 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.

9. Мигунов А.Л., **Кауров С.Ю.**, Алимбеков М.Н. Исследование на модели электро-пусковой системы автомобиля на базе интегрированного стартер-генератора // Известия МГТУ «МАМИ». Транспортные средства и энергетические установки. Научный рецензируемый журнал. – М., МГТУ «МАМИ», Москва № 2(24), том 1, 2015. – С. 105-111.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. 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.

15. Зубков Ю.В., **Кауров С.Ю.**, Верещагин В.Е. Исследование работы интегрированного стартер-генератора при запуске двигателя внутреннего сгорания // Вестник СамГТУ. Серия Технические науки. – Самара.: Самар. гос. техн. ун-т, №3(67), 2020. - С. 125-138.

#### **Патенты:**

16. 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". Оpubл. 27.02.2015, Бюл. № 6.

17. 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". Оpubл. 18.04.2018, Бюл. № 11.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета Д 212.217.04  
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»  
(протокол № 7 от 26.10.2021 г.)

Заказ № \_\_\_\_\_. Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»  
Отдел типографии и оперативной полиграфии  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.