

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента доктора технических наук  
Ганджи Сергея Анатольевича  
на диссертационную работу Каурова Сергея Юрьевича  
**«Интегрированный стартер-генератор автономных объектов на базе синхронной машины с постоянными магнитами»,**  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.09.01. – Электромеханика и электрические аппараты

Диссертационное исследование Каурова С.Ю. направлено на улучшение энергетических, эксплуатационных и массогабаритных показателей стартер-генераторной установки на базе синхронной машины с магнитоэлектрическим возбуждением для подвижных автономных объектов.

### **Актуальность темы**

Одним из направлений развития транспортных средств, автономных подвижных объектов при постоянном росте числа силовых электроприводов и электронных средств управления на борту является улучшение удельных энергетических и массогабаритных показателей электромеханических преобразователей, входящих в их силовую установку. Из-за ограниченного доступного пространства для размещения последних неуклонно сокращается их удельная масса и растет мощность, что предполагает повышенные электромагнитные нагрузки и более совершенные системы охлаждения. Одним из наиболее очевидных путей решения этих проблем является применение стартер-генераторов, в которых две отдельные электрические машины совмещены в одном устройстве. Однако долгое время из-за противоречивых требований к системам генерирования и электрического пуска такое совмещение было проблематичным. Появление высококоэрцитивных магнитов, с хорошими энергетическими характеристиками, новых силовых полупроводниковых управляемых элементов, развитие регулируемого вентильного электропривода, дало возможность не только соединить функции стартера и генератора в одном электромеханическом преобразователе (ЭМП), но и интегрировать его в силовой привод.

Такое совмещение и интеграция с двигателем внутреннего сгорания ставит ряд вопросов к переходу из стартерного режима к генераторному, влиянию привода на стартер-генератор и обратному воздействию электрической машины на силовой привод. Эти особенности недостаточно освещены в научной литературе. Отсутствуют простые, и в то же время точные модели, позволяющие анализировать установившиеся и переходные режимы работы таких ЭМП, недостаточно развиты методики расчета и оптимизационного проектирования. Решению этим актуальных проблем посвящена представленная научная работа.

Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, библиографического списка. Работа изложена на 167 страницах, из них 162 основного текста. Работа содержит 89 иллюстраций и 11 таблиц.

**В первом разделе** диссертации дается анализ конструкций и схемных решений стартер-генераторных устройств с позиций их применения в подвижных автономных объектах (АО), в том числе во вспомогательных силовых установках бронетанковой техники. Отмечено, что синхронная машина с магнитоэлектрическим возбуждением является одним из перспективных типов электромеханических преобразователей, подходящих для использования в качестве стартер-генератора. Дополнительно, вместе с совмещением функций стартера и генератора в одной электрической машине, автор предлагает интегрировать ее в силовую установку, что позволяет уменьшить массогабаритные показатели силовой установки в целом, снизить расход топлива и вредные выбросы в атмосферу. Проведен анализ научно-технической литературы в области теории и практики интегрированных стартер-генераторов (ИСГ).

**Во втором разделе** определены основные критерии качества ИСГ, проведен обзор современных магнитотвердых материалов и компоновки магнитных систем индукторов ИСГ, проанализированы варианты схем якорных обмоток и способы их подключения к полупроводниковому преобразователю.

Для количественной оценки свойств постоянных магнитов использован

универсальный критерий, учитывающий энергетические параметры, ресурс стабильности и стоимость материала постоянных магнитов. На основании применения этого критерия при анализе материалов постоянных магнитов для ИСГ установлено, что наиболее перспективными являются магниты на основе редкоземельных соединений NdFeB и SmCo, которые позволяют построить конструкцию индуктора из магнитов простой призматической формы, расположенных по внешнему периметру ротора.

Рекомендовано для диапазона мощностей ИСГ от единиц до нескольких десятков кВт использовать разомкнутые обмотки с реверсивным питанием, как обладающие лучшими энергетическими показателями и максимальным использованием обмоточного материала.

**В третьем разделе** разработаны элементы методики проектирования ИСГ, учитывающие особенности совмещенной интегрированной конструкции. Показано что редкоземельные магниты обеспечивают требуемую величину электромагнитного момента в стартерном режиме и жесткость внешних характеристик в генераторном.

Реализовано численное моделирование магнитного поля в генераторном и стартерном режимах работы при помощи конечно-элементного программного комплекса ELCUT. В результате решения ряда задач определены параметры ИСГ – индуктивности обмотки якоря и взаимные индуктивности между якорем и индуктором, которые далее были использованы при имитационном моделировании процессов пуска двигателей внутреннего сгорания и работы ИСГ в режиме генератора.

**В четвертом 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 в схеме без ограничения по току статора и с ограничением. Автором получены соотношения, позволяющие рассчитывать параметры ИСГ и регулятора напряжения,

обеспечивающие работу в режиме непрерывного тока в замкнутой системе стабилизации выходного напряжения. Разработана математическая модель эквивалентного бесконтактного двигателя постоянного тока, замещающая ИСГ при расчете параметров системы регулирования частоты вращения и моделировании процесса запуска ДВС.

**Пятый раздел** посвящен экспериментальным исследованиям опытного образца интегрированного стартер-генератора в генераторном и стартерном режимах работы, а также сравнительному анализу технических параметров разработанного ИСГ и известных аналогов. Разработаны структурные, функциональные схемы для испытаний, на основе которых изготовлены испытательные стенды и проведено физическое моделирование установившихся и переходных режимов работы стартер-генератора. Сравниваются расчетные и опытные характеристики, сделан вывод об адекватности предложенных математических моделей. Дано сравнение энергетических и весовых показателей разработанного стартер-генератора с аналогами.

### **Научная новизна**

1. Автором разработаны математические модели генераторного и стартерного режимов работы, которые позволяют осуществлять исследование установившихся и переходных процессов в разомкнутой и замкнутой системах управления. Модели учитывают влияние параметров регулятора напряжения и системы управления на характеристики интегрированного стартер-генератора.

2. В работе разработана модель интегрированного стартер-генератора в режиме стартера, основанная на системе уравнений бесконтактного двигателя постоянного тока и обеспечивающая возможность уточненного определения параметров системы регулирования частоты вращения и момента при пуске ДВС.

3. В диссертации предложена методика решения задачи параметрической оптимизации интегрированного стартер-генератора посредством конечно-элементного моделирования, позволяющая определять

размеры зубцово-пазовой зоны, ярма статора, объем постоянных магнитов, величину немагнитного зазора.

4. Разработаны имитационные модели для исследования установившихся и переходных режимов работы интегрированного стартер-генератора.

### **Теоретическая и практическая значимость результатов работы**

Основной практической значимостью проведенных исследований является улучшение энергетических, массогабаритных показателей интегрированного стартер-генератора на базе синхронной машины с постоянными магнитами.

Разработанные и реализованные алгоритмы многоуровневой оптимизации параметров интегрированного стартер-генератора при определении оптимальных размеров магнитной системы и расчета параметров фильтра в системе стабилизации напряжения в режиме генерации могут быть использованы в теоретических исследованиях подобных устройств и установок.

Практическую ценность имеет предложенный автором и реализованный при физическом эксперименте регулируемый электрический запуск двигателя внутреннего сгорания, защищенный патентами РФ.

Прикладное значение и практическая ценность рассматриваемой работы подтверждены актами внедрения и использования результатов исследований, приведенными в Приложении к диссертации.

### **Рекомендации по использованию результатов работы**

Результаты диссертационного исследования следует рекомендовать для использования при разработке генерирующих и пусковых комплексов на основе синхронных машин с магнитоэлектрическим возбуждением на промышленных предприятиях, работающих в области специальной и военной техники.

### **Достоверность результатов работы**

Автор работы в своих исследованиях использовал общую теорию электрических машин, обоснованные допущения, применял апробированные методы анализа с использованием современных сертифицированных

программных продуктов. Все это позволяет доверять полученным выводам и рекомендациям. Полученные результаты не противоречат аналогичным выводам других авторов, представленным в научных публикациях.

### **Апробация диссертации и публикации автора**

Основные материалы работы и её результаты достаточно полно отражены в 27 публикациях автора, из которых 14 научных работ опубликовано в журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 1 научная работа в издании, индексируемом научометрической базой Scopus. Диссертация прошла апробацию на многих научно-технических конференциях различного статуса, на которых были представлены доклады автора. Результаты интеллектуальной деятельности защищены 2 патентами РФ на изобретения.

### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности**

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты» по пунктам 1 - «Анализ и исследование явлений, лежащих в основе функционирования электрических, электромеханических преобразователей энергии и электрических аппаратов» и 3 - «Разработка методов анализа и синтеза преобразователей электрической и механической энергии».

### **Автореферат**

Автореферат отражает основное содержание диссертации, позволяет провести анализ основных выводов и положений, выполнен в соответствии со всеми предъявляемыми к нему требованиями.

### **Вопросы и замечания по работе**

1. Основой проектирования электрической машины является номинальный режим, который определяет основные размеры и геометрию поперечного сечения. При проектировании интегрированного стартер-генератора имеется два номинальных режима: один для двигательного режима стартера, другой для генераторного режима. Из представленной методики проектирования непонятно какой режим работы электрической машины

является определяющим для расчета геометрии и обмоточных данных: режим стартера или режим генератора. Это важно, так как один режим будет номинальным, а другой избыточным.

2. При проектировании стартер-генератора достаточно часто возникает ситуация несоответствия напряжений стартерного режима и генераторного режима. Стартерный режим осуществляется, как правило от АКБ и рассчитан на низкое напряжение 12-48 В, а генераторный режим рассчитан на напряжение бортовой сети и может составлять сотни вольт. Какие технические решения можно предложить для проектирования якорной обмотки в этой ситуации?

3. В диссертации сделан качественный анализ различных магнитных систем и для базового варианта выбрана магнитная система с радиальным расположением магнитов. Известно, что радиальная магнитная система практически не использует внутренний объем индуктора. Кроме этого радиально расположенные магниты подвержены размагничивающему действию реакции якоря при больших стартерных токах. В этой ситуации преимущество имеет магнитная система с тангенциальными расположениями магнитами, которая использует внутренний объем лучше и не подвержена размагничивающему действию реакции якоря. Проводился ли количественный анализ преимуществ двух магнитных систем?

4. В разделах 2.3.1-2.3.4 при выборе конструкции магнитной системы для удержания магнитов в собранном состоянии применяют немагнитный полый цилиндр, выполненный из высокопрочной стали. Сталь является проводящим материалом, в котором могут наводиться вихревые токи от зубцовых пульсаций магнитного потока. Учитывались ли эти потери при расчете КПД генераторного режима?

5. В разделе 3.3 оптимизация параметров ИСГ проводилась по критерию максимума электромагнитного момента. Этот критерий является целесообразным для стартерного режима. Для генераторного режима основным показателем качества является максимум электромагнитной мощности в

заданных габаритах, в которую входит частота вращения. По какому критерию следует определять геометрию машины при проектировании стартер-генератора?

6. Геометрическая модель стартер-генератора при расчете магнитного поля методом конечных элементов выбрана двумерной. Оправдана ли плоская постановка полевой задачи для стартер-генератора, который, как правило, имеет большой диаметр и малую осевую длину. Каким образом было учтено лобовое рассеяние и связанная с ним индуктивность?

7. Каким образом осуществляется стабилизация выходного напряжения в генераторном режиме? В каком диапазоне входного напряжения импульсный регулятор напряжения (ИРН) обеспечивает требуемую погрешность стабилизированного напряжения?

8. Следует поддержать концепцию автора по интеграции электрической машины в торец ДВС, но при этом необходимо учесть, что тепловые потери ДВС будут переходить в объем стартер-генератора, что повлияет на выбор электромагнитных нагрузок и общее тепловое состояние. Как этот фактор следует учитывать при проектировании? Тепловые расчеты генераторного режима не моделировались и в диссертации не приведены, что следует признать недостатком представленных исследований.

9. В рукописи диссертации и автореферате присутствует много сокращений и аббревиатур. Это осложняет восприятие сложного технического материала. Использование этих сокращений в тексте следовало бы ограничить.

Указанные замечания несколько снижают качество представленных исследований, но не меняют общего положительного мнения о данной работе. Особенно следует отметить качественный подход к цифровому моделированию стационарных и переходных режимов сложной и многофункциональной технической системы.

### **Заключение по диссертации**

Диссертационная работа на тему «Интегрированный стартер-генератор автономных объектов на базе синхронной машины с постоянными магнитами»

является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена научная задача по улучшению энергетических, эксплуатационных и массогабаритных показателей стартер-генераторной установки подвижных автономных объектов на базе синхронной машины с магнитоэлектрическим возбуждением.

Работа отвечает требованиям п.9 «Положения о порядке присуждения степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а Кауров Сергей Юрьевич заслуживает присвоения ученой степени **кандидата технических наук** по специальности 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты».

Официальный оппонент

Доктор технических наук (05.09.01 - Электромеханика и электрические аппараты), доцент, заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»

30.11.2021 г.

Ганджа Сергей Анатольевич

Служебный адрес: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ауд. 267,

кафедра «Теоретические основы электротехники»,

Телефон: +7 9120810902, +

Факс: +7(351) 267-99-00

E-mail: gandja\_sa@mail.ru,

ВЕРНО  
Начальник службы  
делопроизводства  
Н.Б. Циулама

Я, Ганджа Сергей Анатольевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.