

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента кандидата технических наук, старшего научного  
сотрудника Румянцева Михаила Юрьевича  
на диссертационную работу  
Жаркова Максима Андреевича  
«Анализ электромагнитных процессов в стартер-генераторной системе на  
основе трехкаскадного синхронного генератора»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы».

### **Актуальность работы**

Развитие авиации сопровождается непрерывным ростом энерговооружённости и совершенствованием систем энергоснабжения (СЭС) летательных аппаратов (ЛА). Трёхкаскадные синхронные генераторы (ТСГ) в сочетании с интегральным приводом постоянных оборотов, вот уже не один десяток лет составляют основу авиационных СЭС переменного тока стабильной частоты. Процесс повышения уровня электрификации бортового оборудования ЛА не может не сказаться как на структуре СЭС, так и на применении в их составе ТСГ. В частности, для реализации перспективных концепций «самолета с полностью электрифицированным оборудованием» и «полностью электрического самолета», одной из перспективных СЭС признаётся система переменного тока переменной частоты с непосредственным приводом генератора от основной или вспомогательной силовой установки. Электромеханическими преобразователями для такой системы могут быть магнитоэлектрические генераторы (МЭГ), вентильно-индукторные генераторы (ВИГ) и ТСГ. Требование электрического запуска силовой установки предполагает работу генератора в стартёрном (двигательном) режиме, при этом МЭГ и ВИГ будут работать как вентильные двигатели, особенности рабочих процессов в которых достаточно хорошо изучены и описаны в технической литературе, чего нельзя сказать о работе в стартёрном режиме ТСГ. В этой связи диссертационная работа Жаркова Максима Андреевича является актуальной.

### **Структура и содержание работы**

Диссертационная работа изложена на 202 страницах, включает 156 рисунков, 18 таблиц, список литературы из 101 наименования и двух приложений. Работа состоит из введения, пяти глав и заключения.

Во **введении** описана актуальность темы диссертации, сформулированы её цель и задачи, приведены сведения о публикациях по теме работы, об апробации результатов и личном вкладе автора в работу.

В **первой главе** приведена классификация систем запуска авиационных газотурбинных двигателей и требования к механическим характеристикам стартёров. Рассмотрены варианты электрических стартёров для силовых установок ЛА и сделан предварительный вывод о возможности применения в этом качестве ТСГ. Конкретизирован объект исследования, - трёхкаскадный синхронный генератор ГТ120НЖЧ12КВ в составе вспомогательной силовой установки ВГТД ТА18-200МС. Приведены математические модели и результаты расчётов на их основе характеристик каждого каскада этого генератора.

**Вторая глава** посвящена анализу способов создания пускового момента и работы ТСГ в стартёрном режиме. Рассмотрены режимы асинхронного и реактивного пуска системы при отсутствии возбуждения основного генератора ТСГ. Приведены аналитические выражения, математические модели и результаты расчётов характеристик ТСГ в двигательном режиме работы.

В **третьей главе** рассмотрена структура электронного преобразователя для запуска ТСГ, приведены результаты анализа и разработки замкнутой системы управления инвертором. Разработана математическая модель системы «инвертор напряжения – ТСГ в двигательном режиме» и рассмотрены режимы работы трёхфазного электронного преобразователя, работающего на активно-индуктивную нагрузку с противо-ЭДС, соответствующую различным частотам вращения ТСГ.

В **четвёртой главе** представлены результаты разработки блока регулирования для формирования заданного качества выходного напряжения ТСГ при его работе в генераторном режиме. Рассмотрены переходные процессы в системе генерирования при сбросе/набросе нагрузки. Дано описание спроектированного макетного образца блока регулирования с

микропроцессорным управлением, приведены результаты его испытаний на нагрузку, имитирующую обмотку возбуждения возбуждателя ТСГ.

**Пятая**, самая обширная глава диссертации, посвящена экспериментальным исследованиям системы запуска. В главе приведены результаты экспериментальных исследований DC/DC преобразователя, преобразующего напряжение аккумуляторной батареи 27 В в двухполярное повышенное напряжение постоянного тока, необходимое для питания инвертора. Особое внимание уделено исследованием систем стартового запуска ТСГ на основе разработанных макетных образцов электронных преобразователей и реальных генераторов двух типов – ГТ40ПЧ8Б и ГТ120НЖЧ12КВ. Приведены данные экспериментальных исследований запуска ТСГ на холостом ходу, под нагрузкой на стендах и в составе ВСУ, с датчиком положения ротора и без него, при различных способах формирования пускового момента.

**Степень обоснованности научных положений и выводов, сформулированных в диссертации.**

Из материалов самой диссертации и из материалов опубликованных по её теме работ следует, что Жарков М.А. применял для своих исследований достоверные и корректные методы исследований, как аналитические, так и цифровые с использованием современных пакетов прикладных программ. Адекватность созданных математических моделей, задачам, поставленным в работе, подтверждалась результатами расчётов по известным аналитическим методикам, отражающим физические процессы в рассматриваемых автором системах. При этом все положения и выводы были проверены автором экспериментально.

### **Достоверность полученных результатов исследований**

Достоверность полученных результатов диссертации подтверждается корректностью принимаемых допущений и ограничений при разработке математических моделей электрических машин, инверторов, преобразова-

телей постоянного напряжения и систем управления, а также алгоритмов и способов запуска ТСГ; применением современных методов исследования, в том числе, методов имитационного компьютерного моделирования, совпадением результатов расчётов по аналитическим методикам с результатами моделирования и результатами экспериментальных исследований.

### **Научная новизна исследования**

1. Разработана оригинальная математическая модель трёхкаскадного генератора с электронным преобразователем и системой управления, адекватно описывающая электромагнитные процессы в ТСГ в двигательном режиме работы.
2. Выполнен анализ и рассмотрены способы осуществления асинхронного и реактивного пуска синхронной электрической машины для осуществления стартёрного запуска ВСУ с помощью ТСГ.
3. Определены законы управления инвертором, позволяющие осуществить работу ТСГ в стартёрном режиме с наибольшей энергетической эффективностью.

### **Практическая значимость работы**

1. На основе полученных моделей и аналитических выражений разработаны схемотехнические решения полупроводниковых преобразователей и алгоритмы управления ими, позволяющие создавать системы запуска ВСУ с помощью ТСГ.
2. Разработаны рекомендации по формированию тока инвертора в режиме реактивного пуска трехкаскадного синхронного генератора.
3. Разработаны методики определения параметров и энергетических характеристик ТСГ при его работе в двигательном режиме.
4. Разработаны программы и методики, проведены экспериментальные исследования реальных ТСГ со спроектированными и изготовленными макетными образцами электронных преобразователей, результаты которых

могут быть использованы для разработки систем управления ТСГ в режиме стартёр-генератора для существующих и перспективных СЭС ЛА.

### **Апробация результатов работы**

Основные результаты работы опубликованы в 32-х печатных работах, в том числе, в журналах из перечня ВАК, а также в изданиях, входящих в системы цитирования «Scopus» и «Web of Science», обсуждались и докладывались на ряде всероссийских и международных конференций.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. При анализе момента сопротивления, создаваемого газотурбинным двигателем, автор справедливо отмечает, что этот момент носит вентиляторный характер (рис. 2, 3, формула 6), т.е. возрастает пропорционально квадрату частоты вращения вала. Однако при анализе режимов асинхронного (рис. 30, 33) и реактивного (рис. 49) пусков ТСГ момент сопротивления либо остаётся постоянным, либо уменьшается с ростом частоты вращения. Постоянный момент сопротивления фигурирует и на расчётной (рис. 28) и на структурной (рис. 56) схемах запуска.
2. Анализ способов создания пускового момента в системах с ТСГ (глава 2) выполнен автором при условии отсутствия тока возбуждения возбудителя, тогда как экспериментальные исследования стартёрного режима работы ТСГ (глава 5) выполнялись при наличии этого тока.
3. В главе 2 сказано (стр. 69) о необходимости регулирования угла управления инвертором  $\psi$ , для достижения оптимальных показателей запуска. Однако нигде не сказано о критериях оптимальности и не приводятся зависимости оптимального угла от параметров работы системы.
4. В выводах по главе 3 (стр. 95) сказано: «Получены аналитические выражения...позволяющие определить энергетические параметры системы...», однако сами эти выражения не приводятся.
5. Вывод о необходимости регулирования тока возбуждения на этапе

запуска ТСГ с целью обеспечения наилучших энергетических показателей системы - очевиден, важны закономерности такого регулирования, а они не приведены.

#### *Замечания оформительского характера*

6. На страницах 84 и 86 даются ссылки на неизвестные формулы 78, 80 и 83.
7. На рисунке 67 изображена не структурная, а функциональная схема.
8. Рисунки 105 и 106 – неинформативны, а на рис. 124 и 126 нет описания некоторых кривых, что затрудняет восприятие материала.
9. Рисунки 90 и 91 не соответствуют режиму работы преобразователя с выходным напряжением 420 В, т.к. практически совпадают с рис. 95 и 96, иллюстрирующими работу при напряжении 270 В.
10. В тексте работы при описании содержания рисунков и таблиц практически во всей работе не соблюдаются падежи русского языка, - вместо предложного («на рисунке», «в таблице») используется именительный падеж.

#### **Заключение**

Диссертационная работа Жаркова Максима Андреевича «Анализ электромагнитных процессов в стартер-генераторной системе на основе трехкаскадного синхронного генератора» представляет собой завершённую научную квалификационную работу, выполненную автором на высоком профессиональном уровне. Им решена научная задача, значимая для реализации перспективных концепций «самолета с полностью электрифицированным оборудованием» и «полностью электрического самолета», представлены новые методики и модели, разработаны схмотехнические и алгоритмические решения, выполнены значимые экспериментальные исследования. Полученные автором результаты являются актуальными, новыми, обоснованными и достоверными.

Автореферат изложен чётким техническим языком и соответствует по

содержанию тексту диссертации.

Диссертационная работа полностью отвечает требованиям пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г. в редакции от 11.09.2021 г.) и соответствует паспорту специальности 05.09.03 в области исследований по пунктам 1 «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем» и 3 «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления», а её автор, Жарков Максим Андреевич, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы».

#### ОФИЦИАЛЬНЫЙ ОППОНЕНТ

к.т.н., с.н.с., заведующий кафедрой электротехнических комплексов автономных объектов и электрического транспорта  
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

Румянцев М.Ю.

Адрес: 111250, Россия, г. Москва, вн.тер. г. муниципальный округ Лефортово,  
ул. Красноказарменная, д.14, стр. 1  
Тел.: +7 (495) 362-77-73  
E-mail: RumyantsevMY@mpei.ru

11 03 12 21

я по

Н.Г. Сави

Подпись официального оппонента Румянцева Михаила Юрьевича удостоверяю

Отзыв получен 06.12.2021 г.  
М.А. / Дубю М.А.

С отзывом ознакомлен  
06.12.2021 г.  
/ Марков М.А. /