

На правах рукописи



Жарков Максим Андреевич

**АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В СТАРТЕР-
ГЕНЕРАТОРНОЙ СИСТЕМЕ НА ОСНОВЕ ТРЕХКАСКАДНОГО
СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Новосибирск – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном
учреждении высшего образования
«Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Харитонов Сергей Александрович**,
доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой Электроники и электротехники.

Официальные оппоненты: **Гарганеев Александр Георгиевич**,
доктор технических наук, профессор, Федеральное
государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Национальный
исследовательский Томский политехнический
университет», Отделение электроэнергетики и
электротехники, профессор.

Румянцев Михаил Юрьевич,
кандидат технических наук, старший научный
сотрудник, Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение высшего
образования "Национальный исследовательский
университет "МЭИ", кафедра Электротехнических
комплексов автономных объектов и электрического
транспорта, заведующий кафедрой.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный технический
университет гражданской авиации», г. Москва.

Защита диссертации состоится «22» декабря 2021 года в 10 часов на
заседании диссертационного совета Д212.173.04 при Федеральном
государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования
«Новосибирский государственный технический университет» по адресу 630073,
г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20, I корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского
государственного технического университета и на сайте организации www.nstu.ru

Автореферат разослан «__» ноября 2021 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,
канд. техн. наук, доцент



Максим Александрович Дыбко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современные тенденции в отраслях, связанных с автономными, подвижными объектами, такими как авиастроение, направлены на увеличение доли электрификации или на полную замену всех агрегатов в пользу электрических. В то же время повышаются требования к энергоэффективности и массогабаритным показателям узлов и агрегатов, все эти требования приводят к необходимости поиска новых решений при проектировании и создании авиационных систем и агрегатов. Эти требования могут быть учтены за счет многоцелевого использования оборудования, а также с помощью новых систем, сочетающих в себе ряд функций. В частности, концепция «полностью электрического самолета» (ПЭС) подразумевает использование на борту только электричества и полный отказ от гидравлических и пневматических систем, а также многофункциональное использование авиационных систем. ПЭС подразумевает единую централизованную систему электроснабжения, которая будет способна обеспечить все энергетические потребности ЛА.

Степень разработанности темы. Интерес к увеличению электрификации летательных аппаратов появился еще в первой половине XX века, но широкое распространение среди ученых и разработчиков авиационных систем получило после 80-х годов прошлого столетия. Среди них Helsley S.W., Bird D.K., Cronin M. J., Wood N.E., Parker R.E., Voight A.A. и др. Несколько позже вопросом реализации этой концепции занимались Советские и Российские ученые: Савенко В.А., Воронович С.А., Голота С.А., Халютин С.П. (ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского), Лёвин А.В., Алексеев И.В. (АКБ «Якорь»), Сучков В.Н. (НИИАО), Кондаков Л.Н., Жуков Ю.Н., Качалов Б.А., Кушнерёв В.В. (МАЗ «Дзержинец»), Довгалёнок В.М., Куприянов А.Д. (АО «Аэроэлектромаш»), Бут Д.А., Ковалёв Л.К. Ковалёв К.Л. (МАИ), Харитонов С.А. (НГТУ), Гарганеев А.Г. (ТУСУР, ТПУ), Гуревич О.С. (ЦИАМ), Кувшинов В.М. (ЦАГИ) и др.

Наравне с увеличением уровня электрификации остро стоит задача повышения энергоэффективности существующего электрооборудования самолетов. Одним из критериев эффективности использования бортового оборудования ЛА является реализация многоцелевого использования бортовых узлов и агрегатов, а также кроссплатформенная интеграция всевозможных авиационных систем, таких как гидравлическая, топливная, система кондиционирования, система электроснабжения, вспомогательная силовая установка (ВСУ), маршевый двигатель и другие. В рамках этого критерия представляется целесообразным интегрировать стартер и генератор вспомогательной силовой установки в одном агрегате.

Цель диссертационной работы – анализ способов создания электромагнитного момента трехкаскадного синхронного генератора при нулевой

скорости вращения вала и разработка алгоритмов управления стартер-генераторной системой.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**.

1. Проанализировать пусковые устройства и сформулировать требования к электростартерному устройству.
2. Разработать математическую модель объекта исследования.
3. Проанализировать методы создания электромагнитного момента в трехкаскадном синхронном генераторе в условиях запуска.
4. Провести аналитическое исследование системы запуска на основе полупроводникового преобразователя частоты (ПЧ) и трехкаскадного синхронного генератора.
5. Разработать математическую модель цифрового блока регулирования напряжения системы генерирования на основе трехкаскадного синхронного генератора.
6. Провести экспериментальные исследования, подтверждающие и верифицирующие теоретические исследования.

Методы исследования. Основные результаты научного исследования получены за счет применения методов математического моделирования с использованием аналитических выражений. Анализ электромагнитных процессов в трехкаскадном синхронном генераторе выполнен на основе метода перехода во вращающуюся систему координат с помощью уравнений Парка-Горева. Исследование статических режимов работы полупроводникового преобразователя при работе на синхронную машину проводился с помощью метода спектрального моделирования. Исследования динамических процессов в системе синхронный генератор – полупроводниковый преобразователь, проводятся с помощью аналитических и графоаналитических методов решения дифференциальных уравнений, а также при помощи имитационного моделирования в пакете прикладных программ, таких как PowerSIM и MATLAB Simulink.

Научная новизна исследования состоит в следующем:

1. Предложена математическая модель системы запуска газотурбинных двигателей (ГТД) на основе трехкаскадного синхронного генератора.
2. Разработан и реализован способ синхронизации системы управления с полем ротора трехкаскадного синхронного генератора.
3. Разработаны рекомендации по оптимальному изменению угла управления током полупроводникового преобразователя в режиме реактивного пуска трехкаскадного синхронного генератора (ТСГ).

Положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритм управления системой запуска газотурбинного двигателя ВСУ летательного аппарата, с учетом особенностей работы трехкаскадного синхронного генератора.
2. Способ регулирования электромагнитного момента ТСГ с помощью управления угла между обобщенным вектором тока инвертора напряжения и противо-ЭДС генератора.
3. Результат анализа электромагнитных процессов в трехкаскадном синхронном генераторе при изменении скорости вращения вала от нулевых до номинальных значений.
4. Математическая модель стартер-генераторной системы на основе ТСГ и преобразователя напряжения с цифровой системой управления.

Обоснованность и достоверность результатов научного исследования определяется корректной постановкой задач, адекватностью принятых допущений, применением широко известных методов и средств численного моделирования, а также согласованием основных теоретических выводов с экспериментально полученными данными, как при имитационном моделировании, так и при натуральных экспериментах.

Практическая ценность и реализация результатов. Основные результаты диссертационного исследования были применены при выполнении научно-технических и опытно-конструкторских работ, выполняемых совместно с такими предприятиями как, Холдинг «Технодинамика» г. Москва, АО «Аэроэлектромаш» г. Москва, АО «Сарапульский электрогенераторный завод» г. Сарапул, ПАО «Авиационная корпорация «Рубин» г. Балашиха.

1. Разработана и предложена структура стартер-генераторного устройства для летательного аппарата, обеспечивающая электростартерный запуск вспомогательной силовой установки.
2. Разработаны алгоритмы управления системой запуска на основе трехкаскадного синхронного генератора.
3. Предложен и проверен способ бездатчиковой синхронизации системы управления ПЧ-ТСГ в двигательном режиме.
4. Определены параметры, влияющие на формирование электромагнитного момента ТСГ при нулевой скорости вращения вала.
5. Разработаны цифровые системы управления на основе микропроцессора для управления полупроводниковыми преобразователями стартерного и генераторного режима.
6. Предложены рекомендации для проектирования повышающего преобразователя, необходимого для автономной работы системы запуска.

Соответствие научной специальности. Основные положения диссертационной работы соответствуют области исследования, относящейся к специальности 05.09.03 - Электротехнические комплексы и системы, а именно первому и третьему пункту, приведенным в паспорте специальности.

Апробация результатов диссертации. В полном объеме исследование докладывалось и обсуждалось на заседании кафедры «Электроники и Электротехники» ФГБОУ ВО «НГТУ». Основные результаты исследования и его отдельные положения докладывались, обсуждались и получили одобрение на следующих семинарах и заседаниях: 13-20-я Международная конференция молодых специалистов по микро/нано технологиям и электронным приборам «EDM», 2012-2019 гг.; 16я Международная научно-техническая конференция «Электроприводы переменного тока», г. Екатеринбург, 2015 г.; Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского, г. Москва 2016 г.; Всероссийская научно-техническая конференция «Электропитание», г. Новосибирск, 2018 г.; Международная конференция по электротехническим комплексам и системам (ICOECS), г. Уфа, 2019 г.; Международная научно-техническая конференция "Электротехнические комплексы и системы - UralCon», г. Челябинск, 2020 г.; 17-18я Международная Уральская конференция «Электроприводы переменного тока - ACED», г. Екатеринбург, 2018, 2021 гг.

Публикации по теме диссертации. По теме диссертационного исследования опубликовано 32 печатные работы, в том числе 5 работ опубликовано в журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 15 публикаций входящих в международную систему цитирования «Scopus» и/или «Web of Science», 3 патента на изобретение РФ.

Личный вклад автора. Результаты научных исследований, представленные в диссертационной работе, выполнены при непосредственном участии автора или под его руководством, которое заключалось в постановке задач, обосновании и выборе методов решения, а также в анализе полученных результатов. Экспериментальные результаты лично получены автором диссертации, а также являются авторскими разработками методик испытаний, постановка задач для испытаний, анализ и интерпретация достигнутых результатов.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений, списка литературы, который включает в себя 101 наименование, и двух приложений. Работа изложена на 202 страницах, включая 156 рисунков и 18 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, приведены сведения об апробации и публикациях, личном вкладе автора в работу, а также представлена структура работы.

Первая глава посвящена анализу существующих пусковых устройств авиационных двигателей и формулировке требований для их разработки. Также рассмотрены современные системы электроснабжения на основе ТСГ, и создана имитационная модель трехкаскадного синхронного генератора.

Для функционирования ГТД, необходимо, до момента подачи топлива в камеру сгорания, сформировать определенные условия для работы двигателя, а именно, необходимое давление и расход воздуха. Для создания этих условий, требуется раскрутить ротор авиационного двигателя с помощью внешнего источника механической энергии, в качестве которого и предполагается использовать генератор в электростартерном режиме.

Принимая во внимание режимы запуска ГТД, составлены требования к стартерному устройству.

1) Раскрутка вала газотурбинного двигателя до частоты вращения, необходимой и достаточной для надежного выхода турбины на режим малого газа, с интенсивностью, обеспечивающей заданное время выхода на этот режим.

2) Необходимость создания момента на валу, достаточного для преодоления статического и динамического моментов сопротивления.

3) Эффективное потребление электрической энергии, данное требование обуславливается ограниченной мощностью источника электрической энергии, в качестве которых для пусковых устройств могут выступать бортовые или аэродромные энергоустановки, аккумуляторные батареи.

Вышеперечисленным требованиям, удовлетворяет электростартерное устройство на основе трехкаскадного синхронного генератора, который в настоящее время, является одним из самых распространенных авиационных генераторов. Данные генераторы имеют высокий уровень надежности благодаря тому, что энергия для питания обмотки возбуждения передается бесконтактно от статора на ротор. Еще одно преимущество данного типа генераторов, это возможность регулирования напряжения с помощью встроенной системы возбуждения. Система возбуждения представляет собой два дополнительных каскада электрических машин, расположенных на общем валу, одна из них — это обращенная синхронная машина с блоком вращающихся диодов, а другая это синхронная машина (возбудитель) с возбуждением от постоянных магнитов (подвозбудитель).

Вторая глава посвящена анализу двигательных режимов работы трёхкаскадного синхронного генератора с демпферной обмоткой, при помощи формирования асинхронного момента и при формировании реактивной составляющей электромагнитного момента. Получено выражение для момента трехкаскадного синхронного генератора, зависящее от параметров, регулируемых инвертором напряжения и полупроводниковым преобразователем возбудителя.

Возможность использования основной электрической машины в качестве стартера, т.е. в двигательном режиме, вытекает из условия обратимости электрических машин. Реализовать данный режим позволяет наличие в полюсных наконечниках системы возбуждения основной электрической машины демпфирующих стержней, которые образуют на роторе короткозамкнутую клетку. Если обеспечить питание якорной обмотки основной электрической машины трехфазной системой токов, не подавая питание на обмотку возбуждения, то взаимодействие токов, индуцируемых в короткозамкнутых стержнях демпферной обмотки, с магнитным полем якорной обмотки создаст асинхронный электромагнитный момент.

Второй вариант решения проблемы отсутствия электромагнитного возбуждения у ТСГ при нулевой скорости — это регулирование угла нагрузки синхронной машины, для создания реактивного момента. В общем случае электромагнитный момент будет формироваться согласно (1):

$$M_{эм} = \frac{p \cdot m \cdot E \cdot U}{\omega \cdot X_d} \cdot \sin(\theta) + \frac{p \cdot m \cdot U^2}{2\omega} \left(\frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_q} \right) \sin(2\theta). \quad (1)$$

Из этого выражения видно, что момент синхронного двигателя содержит две составляющие. Первая обусловлена взаимодействием вращающегося магнитного поля статора с полем возбуждения ротора, а вторая представляет собой реактивный момент, обусловленный явнополюсным исполнением ротора.

Выражение (1) содержит напряжение и ЭДС машины, с точки зрения управления моментом синхронной машины с помощью инвертора напряжения, справедливо записать это выражение относительно амплитуды и фазы тока статора ТСГ. Исходя из условий максимального момента угловой характеристики явнополюсного генератора, максимальный момент в двигательном режиме будет находиться в диапазоне изменения угла нагрузки – θ , от -90 до -45 градусов. В соответствии с этим условием, построим векторную диаграмму синхронной машины (Рисунок 1).

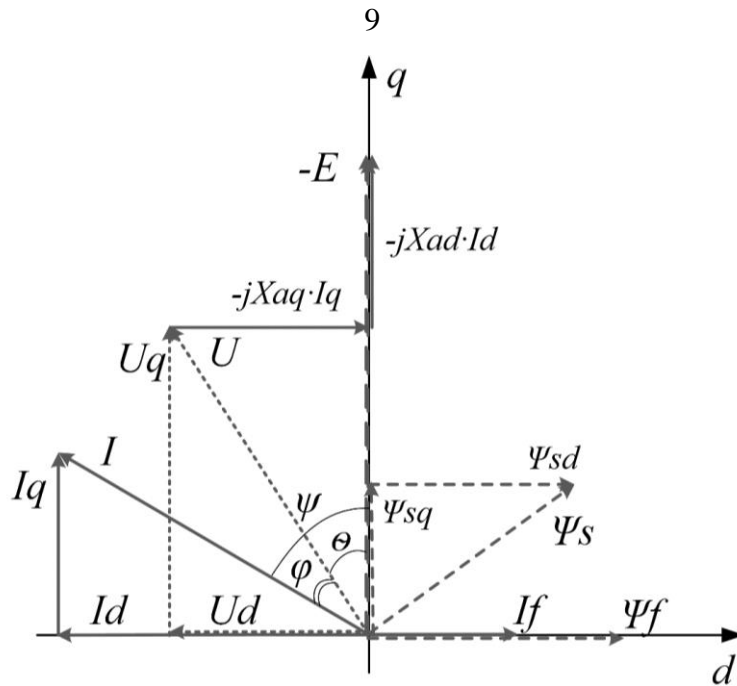


Рисунок 1 – Векторная диаграмма напряжений и токов явнополюсной синхронной машины

Исходя из векторной диаграммы синхронной машины (Рисунок 1), выражение для электромагнитного момента двигателя, используемого в качестве электростартерного устройства, выглядит следующим образом:

$$M_{эм}(I, \psi) = \frac{p \cdot m}{\omega \cdot \eta} \left[I \cdot E \cdot \cos \psi + I^2 \cdot \sin(2\psi) \frac{(x_q - x_d)}{2} \right]. \quad (2)$$

По полученному выражению видно, что синхронная составляющая момента зависит от амплитуды и фазы тока статора, а также от ЭДС синхронной машины. В результате проведенных преобразований, выражение (2) примет следующий вид:

$$M_{эм}(I, \psi) = \frac{p \cdot m}{\eta} \left[I_{cm} \cdot M_{fd} \cdot I_f \cos \psi + I_{cm}^2 \cdot \sin(2\psi) \frac{(L_q - L_d)}{2} \right]. \quad (3)$$

Таким образом получено выражение для момента трехкаскадного синхронного генератора, зависящее от параметров, регулируемых инвертором напряжения – амплитуда и фаза тока относительно ЭДС машины, а также ток возбуждения основного генератора, который регулируется с помощью внешнего блока регулирования, защит и управления (БРЗУ). При синхронизации системы управления с вектором ЭДС машины, удобно регулировать угол ψ с помощью регулирования составляющих токов статора во вращающейся системе координат.

На основании известной зависимости тока возбуждения от скорости и выражения (3), можно получить график изменения максимально возможного электромагнитного момента исследуемого генератора – Рисунок 2. Также при построении графика были приняты во внимание следующие условия ограничений: ток статора ограничен максимально допустимым значением,

соответствующему длительному режиму работы, напряжение питания инвертора ограничено выпрямленной трехфазной сетью переменного тока бортовой сети летательного аппарата. На Рисунке 3 представлена зависимость максимального электромагнитного момента от угла управления и скорости вращения вала.

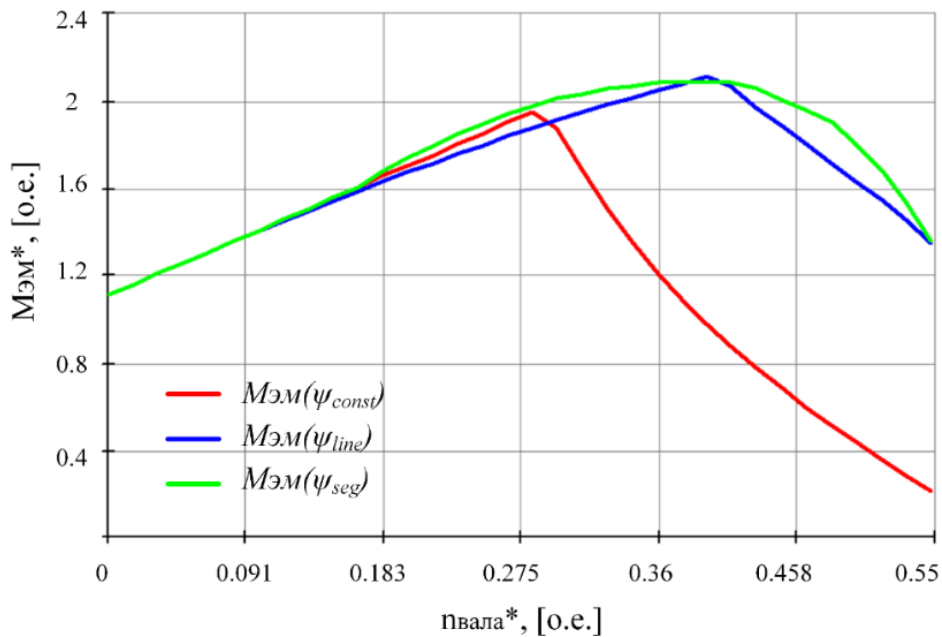


Рисунок 2 – Зависимость максимального электромагнитного момента от скорости вращения вала

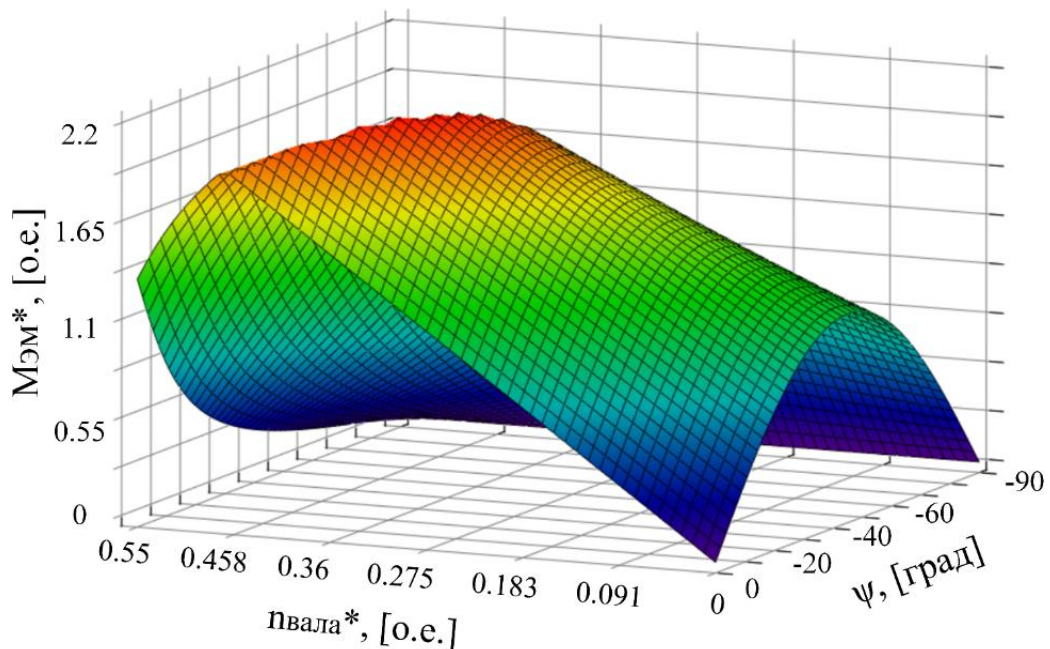


Рисунок 3 – Зависимость максимального электромагнитного момента от угла управления и скорости вращения вала

Представленная на Рисунке 2, зависимость электромагнитного момента, при постоянном угле – ψ_{const} , показывает резкое уменьшение момента после точки перегиба, обусловленной достижением максимального коэффициента модуляции

инвертора. По мере увеличения скорости вращения вала, постоянно присутствующая реактивная составляющая в токе статора, перестает быть основной составляющей момента, так как синхронная составляющая имеет квадратичную зависимость, в соответствии с выражением (3). При линейном изменении угла ψ_{line} , на протяжении всего этапа разгона ТСГ, момент остается больше максимального момента нагрузки на всем этапе запуска. Принимая в качестве критерия оптимального управления максимальный электромагнитный момент ТСГ, можно выделить зоны оптимального угла ψ_{seg} .

Моделирование проводилось в программном пакете PSIM, реализованная модель была максимально приближена к реальному устройству, в том числе была создана модель электромеханической части трехкаскадного генератора. Реализация момента сопротивления на валу была выполнена с помощью блока моментной нагрузки, входным параметром которого была функция зависимости момента от угловой частоты вращения вала.

Также была реализована цифровая система управления на основе DLL-блока, с помощью которого реализуется имитация выполнения алгоритмов, написанных на языке программирования С, реализующих функцию изменения угла управления ψ , для создания реактивной составляющей момента ТСГ.

Фазный ток статора ТСГ представлен на Рисунке 4, первая осциллограмма тока соответствует углу ψ изменяющемуся по линейному закону управления, пропорциональному скорости вращения вала, вторая осциллограмма – соответствует асинхронно-частотному способу запуска.

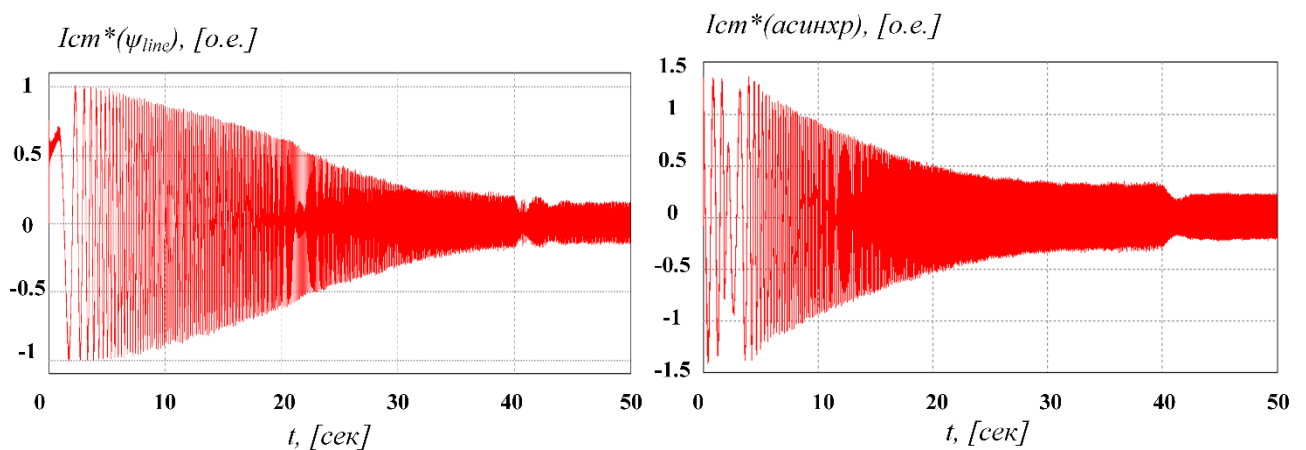


Рисунок 4 – Ток фазы А статора основного каскада ТСГ

Осциллограммы электромагнитного момента и скорости вращения вала представлены на Рисунке 5 и Рисунке 6, соответственно. Как видно из осциллограмм, система обрабатывает заданный темп разгона и момент сопротивления на валу, не зависимо от условий возбуждения. Однако, асинхронно-частотный способ характерен трехкратными колебаниями

электромагнитного момента, а также колебаниями скорости ротора на начальном этапе разгона.

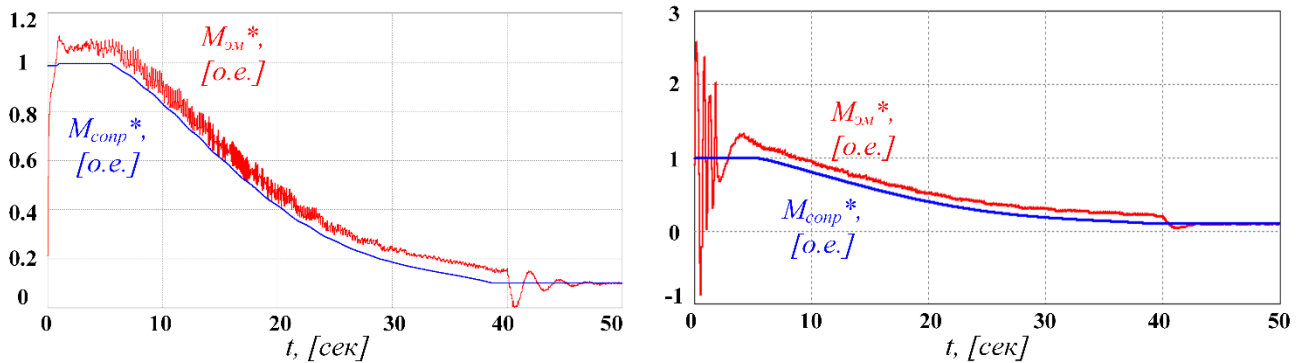


Рисунок 5 – Электромагнитный момент и момент сопротивления на валу

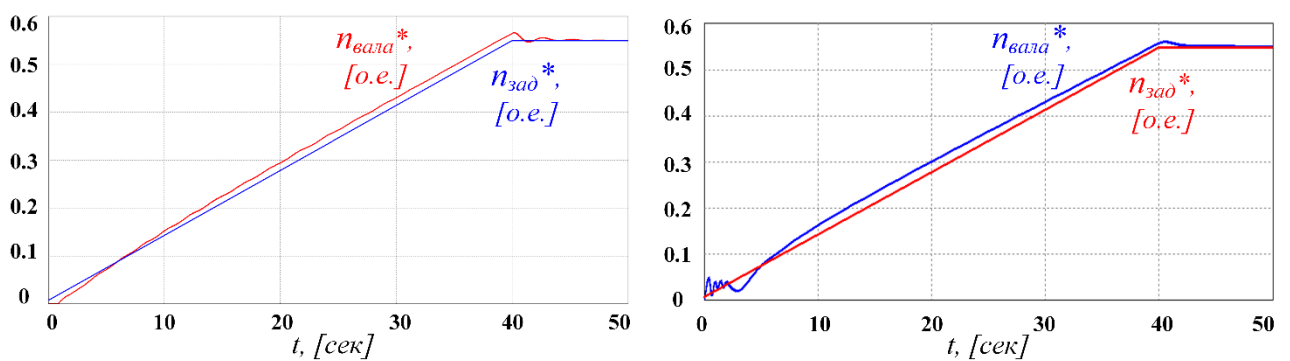


Рисунок 6 – Скорость вала ТСГ

Имитационное моделирование и аналитический расчет показывают, что разработанная электростартерная система обеспечивает необходимый пусковой момент и требуемый темп разгона авиационного газотурбинного двигателя. При этом ток обмотки статора основного каскада ТСГ не превышает максимально допустимый нагрузочный уровень, что положительно сказывается на ресурсе синхронной машины. Анализируя полученные результаты моделирования, можно сделать вывод, что предпочтительней с точки зрения энергоэффективности и стабильности регулирования момента, является способ, основанный на формировании реактивной составляющей электромагнитного момента.

В третьей главе предложена и проанализирована структурная схема электростартерной системы на основе трехкаскадного синхронного генератора и преобразователя напряжения. Для инвертора напряжения разработана структура системы управления, а также синтезированы параметры регуляторов замкнутой системы подчиненного регулирования. Получены аналитические выражения в dq-координатах, позволяющие определить энергетические параметры системы инвертор напряжения – трехкаскадный синхронный генератор, в двигательном режиме. Разработана математическая модель преобразователя частоты, работающего на эквивалентную RL-нагрузку с противо-ЭДС в abc-координатах, с помощью метода переключающих функций. Получены основные энергетические

(РУ) между обобщенным вектором тока статора и противо-ЭДС, согласно выражениям, полученным во 2 Главе.

Рассмотрена система инвертор напряжения – трехкаскадный синхронный генератор, выражения для тока и напряжения инвертора напряжения, при работе на синхронный генератор, выглядят как (4):

$$\begin{aligned} i &= I_1 \sin \omega t + \sum_i I_i \sin(\omega_i t + \phi_i), \\ u_{ин} &= U_1 \sin(\omega t - \theta) + \sum_i U_i \sin(\omega_i t + \delta_i). \end{aligned} \quad (4)$$

где, U_1, U_i - амплитудное значение основной (с частотой ω) и i – гармоник, ω_i - частота i – гармоники.

Структурные схемы ТСГ и ИН для основной и i – гармоник приведены на Рисунке 9.

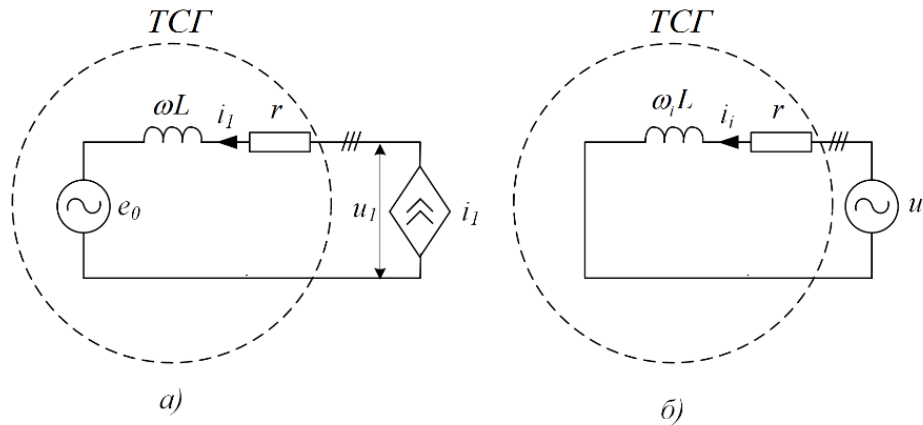


Рисунок 9 – Структурные схемы для основной (а) и i -ой гармоник (б)

Уравнения для напряжений двигательного режима ТСГ во вращающейся системе координат, при пренебрежении активными сопротивлениями имеют вид:

$$\begin{aligned} u_d &= i_d r L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \approx L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q, \\ u_q &= i_q r + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega L_d i_d + E_0 \approx L_q \frac{di_q}{dt} + \omega L_d i_d + E_0. \end{aligned} \quad (5)$$

Ортогональные проекции тока инвертора напряжения, также можно представить в виде суммы составляющих от основных (i_{do} , i_{qo}) и высокочастотных (Δi_d , Δi_q) гармоник:

$$i_d = i_{do} + \Delta i_d, \quad i_q = i_{qo} + \Delta i_q. \quad (6)$$

где соотношения для составляющих тока определяются как:

$$i_{qo} \approx \frac{u_{d0}}{\omega L_q}, \quad i_{do} \approx \frac{E_0 - u_{q0}}{\omega L_d}. \quad (7)$$

$$\begin{aligned}\Delta i_d(\vartheta) &= \sum_{\substack{p=-\infty \\ p \neq 0}}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left[I_{ds\ pk} \sin(ap + 3k)\vartheta + I_{dc\ pk} \cos(ap + 3k)\vartheta \right], \\ \Delta i_q(\vartheta) &= \sum_{\substack{p=-\infty \\ p \neq 0}}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left[I_{qs\ pk} \sin(ap + 3k)\vartheta + I_{qc\ pk} \cos(ap + 3k)\vartheta \right].\end{aligned}\quad (8)$$

где синусные и косинусные составляющие гармоник определяются как:

$$I_{ds\ pk} = \frac{1}{[(ap + 3k)^2 - 1] \cdot \omega L_d} \cdot \left[U_{qs\ pk} - U_{dc\ pk} (ap + 3k) \right], \quad (9)$$

$$I_{dc\ pk} = \frac{1}{[(ap + 3k)^2 - 1] \cdot \omega L_d} \cdot \left[U_{qc\ pk} - U_{ds\ pk} (ap + 3k) \right].$$

$$I_{qs\ pk} = \frac{-1}{[(ap + 3k)^2 - 1] \cdot \omega L_q} \cdot \left[U_{ds\ pk} + U_{qc\ pk} (ap + 3k) \right], \quad (10)$$

$$I_{qc\ pk} = \frac{-1}{[(ap + 3k)^2 - 1] \cdot \omega L_q} \cdot \left[U_{dc\ pk} + U_{qs\ pk} (ap + 3k) \right].$$

Полученные соотношения позволяют определить энергетические параметры системы инвертор напряжения – трехкаскадный синхронный генератор, в двигательном режиме.

Рассмотрена спектральная модель системы, основанная на методе переключающих функций. Метод базируется на использовании функций, описывающих текущее состояние силового ключа. Для исследуемой системы рассмотрим работу трехфазного двухуровневого инвертора напряжения подключенного к эквивалентной, симметричной RL-нагрузке с противо-ЭДС (Рисунок 10).

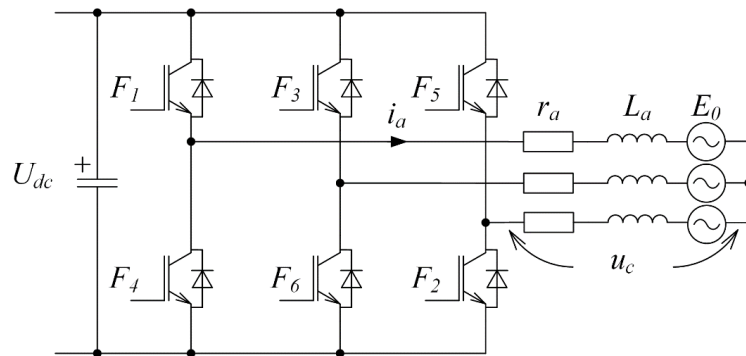


Рисунок 10 – Схема замещения системы запуска

Выходное фазное напряжение инвертора для фаз a, b, c соответственно:

$$u_{abc}(n, \theta) = (\varphi_{abc} - \varphi_0) - E_{abc}(n, \theta). \quad (11)$$

где $\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c, \varphi_0$ – потенциалы фаз и нулевой точки нагрузки. Противо-ЭДС трехкаскадного синхронного генератора – $E_{a,b,c}(n, \theta)$ представлена как функция, зависящая от угла нагрузки – θ и скорости вращения вала в соответствии с характеристикой холостого хода ТСГ.

Выходной ток преобразователя можно представить в виде ряда Фурье:

$$\begin{aligned} i_a(\omega t) &= \sum_{k=1}^{\infty} \left(a_{U_a(k)} \cdot \frac{\cos(k \cdot \omega t - \varphi_{(n)})}{Z_{(n)}} + b_{U_a(k)} \cdot \frac{\sin(k \cdot \omega t - \varphi_{(n)})}{Z_{(n)}} \right), \\ i_b(\omega t) &= \sum_{k=1}^{\infty} \left(a_{U_b(k)} \cdot \frac{\cos(k \cdot \omega t - \varphi_{(n)})}{Z_{(n)}} + b_{U_b(k)} \cdot \frac{\sin(k \cdot \omega t - \varphi_{(n)})}{Z_{(n)}} \right), \\ i_c(\omega t) &= \sum_{k=1}^{\infty} \left(a_{U_c(k)} \cdot \frac{\cos(k \cdot \omega t - \varphi_{(n)})}{Z_{(n)}} + b_{U_c(k)} \cdot \frac{\sin(k \cdot \omega t - \varphi_{(n)})}{Z_{(n)}} \right), \end{aligned} \quad (12)$$

Зависимость действующего значения выходного тока преобразователя от скорости вращения вала представлена на Рисунке 11.

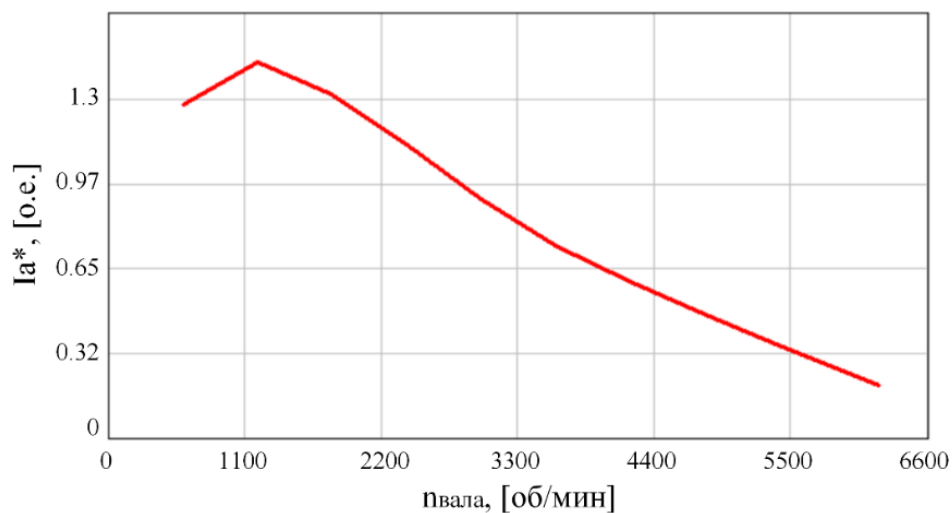


Рисунок 11 – Зависимость выходного тока инвертора от скорости вращения вала

В четвертой главе представлены результаты, полученные при анализе постоянной времени для трехкаскадного синхронного генератора, которые дают возможность оценить переходной процесс при мгновенном изменении тока нагрузки системы электроснабжения. На основе полученных соотношений для передаточных функций ТСГ, была выбрана и синтезирована цифровая система управления для блока стабилизации напряжения синхронного генератора. Было проведено имитационное моделирование системы генерирования, которое подтвердило правильность и адекватность синтезированной системы для систем, удовлетворяющих ГОСТ - 54073-2017.

На основе ранее полученных математических моделей составных частей трехкаскадного синхронного генератора, была создана модель системы генерирования с полупроводниковым преобразователем для стабилизации

напряжения. Система управления полупроводниковым преобразователем построена в соответствии с синтезированными регуляторами.

В соответствии с проведенными исследованиями по системе генерирования на основе ТСГ, был спроектирован и изготовлен микропроцессорный блок регулирования, защиты и управления. На Рисунке 12 представлено изображение 3D-модели спроектированного блока регулирования и фото изготовленного макетного образца.

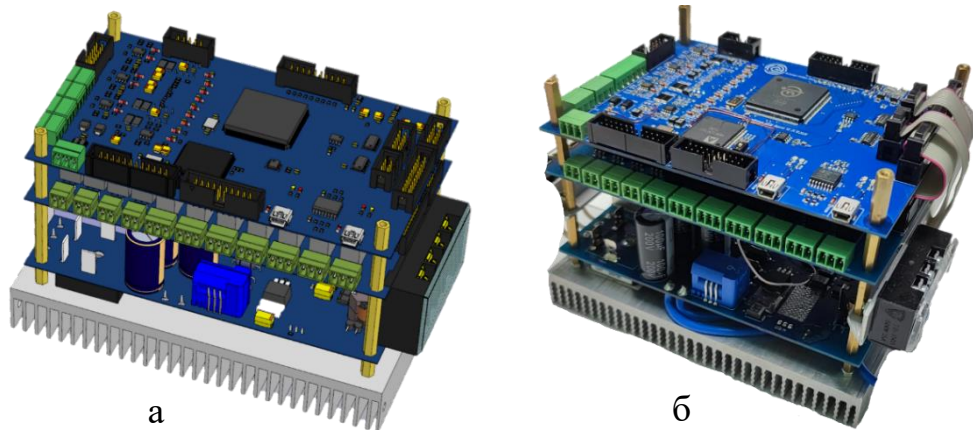


Рисунок 12 – 3-D модель спроектированного блока регулирования (а), макетный образец блока регулирования (б)

В пятой главе представлены результаты физических экспериментов. По результатам теоретических исследований, были спроектированы и изготовлены макетные образцы полупроводниковых преобразователей, а также методики их испытаний. Проведен ряд натурных экспериментов, подтверждающих возможность реализации электростартерной системы на основе трёхкаскадного синхронного генератора. Экспериментальные исследования проводились в разные этапы совместно со следующими предприятиями: АО «Технодинамика», АО «Аэрэлектромаш», ОАО «НПП «Аэросила». На Рисунке 13 представлены рабочие характеристики запуска газотурбинного двигателя ВСУ.

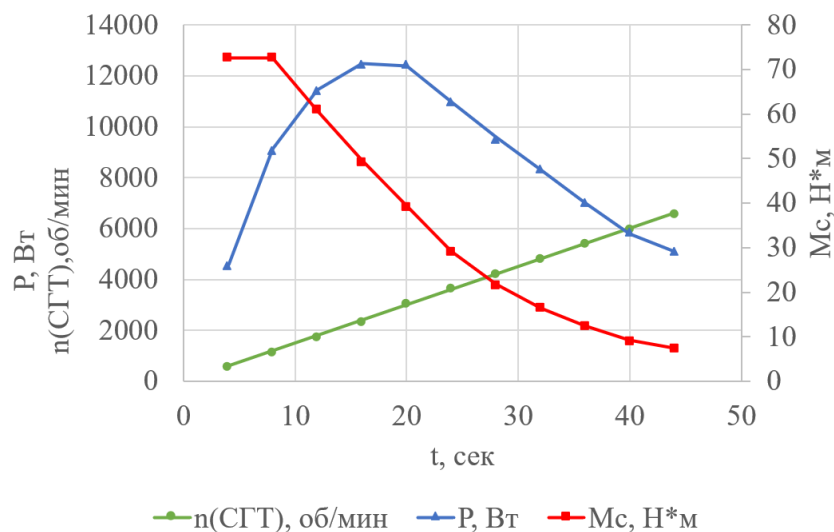


Рисунок 13 – Рабочие характеристики стартер-генераторной системы

Первым этапом испытаний было определение возможности запуска стартер-генератора ГТ120НЖЧ12КВ без датчика положения ротора, с помощью макета преобразователя системы запуска в режиме частотного пуска с последующим переходом в режим управляемой раскрутки с обратной связью по скорости вращения и стабилизацией токов фаз. Испытательный стенд (Рисунок 14) состоит из трехкаскадного синхронного генератора - ГТ120НЖЧ12КВ с жидкостным охлаждением, подключенного к маслосистеме, и макета инвертора напряжения с микропроцессорной системой управления.



Рисунок 14 – Общий вид испытательного стенда

Запуск генератора производился на холостом ходу, с этапом первоначального асинхронно-частотного пуска с дальнейшей синхронизацией с помощью напряжений подвозбудителя. Результаты измерений приведены в Таблице 1. На осциллограммах представлены ток фазы А обмотки якоря основного генератора $I_{СТГ}$ (3 канал, фиолетовый цвет) и фазное напряжение подвозбудителя $U_{ПДВ}$ (4 канал, зеленый цвет) (Рисунок 15).

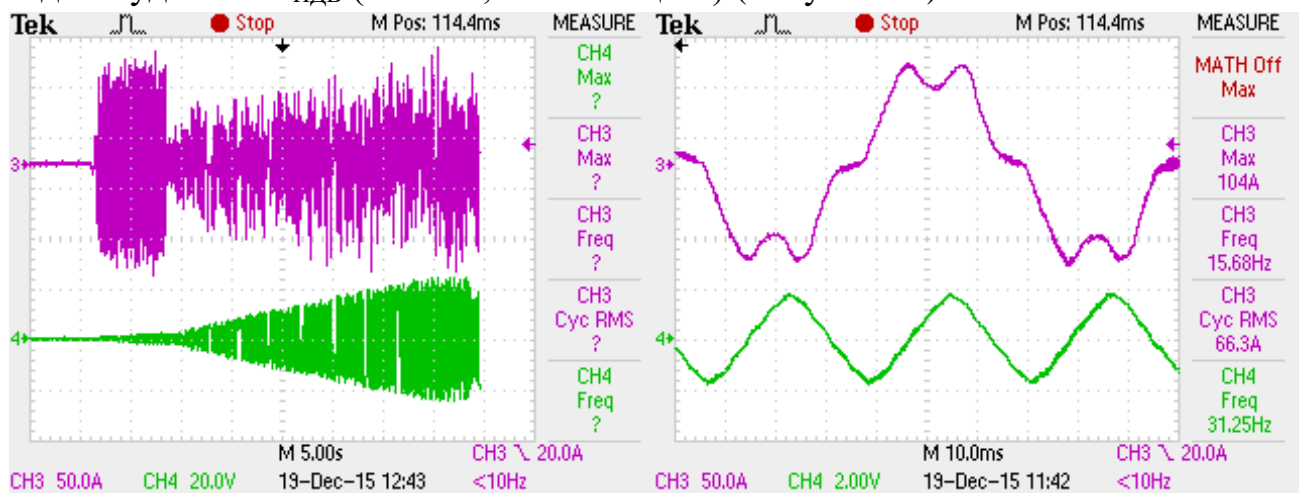


Рисунок 15 – Осциллограммы процесса работы системы запуска

Таблица 1 – Результаты измерений работы макета системы запуска

Режим запуска	t	$U_{ИПЗ}$,	$I_{ИПЗ}$	$I_{СТГ}$ (amp)	$I_{СТГ}$ (rms)	$U_{ПДВ}$ (amp)	$f_{СТГ}$
	сек.	В	А	А	А	В	Гц
Частотный	6,89	223,5	3,5	104	66	2	15,7
Синхронный	15	224,4	8	70	28	12,4	107
Синхронный	33	228	20	116	56	24,8	217

Следующим этапом испытаний было определение возможности запуска ВГТД ТА18-200МС от стартер-генератора ГТ120НЖЧ12КВ без индукционного датчика положения ротора с помощью макетного образца преобразователя системы запуска в режиме частотного пуска с последующим переходом в режим управляемой раскрутки с обратной связью по скорости вращения. Испытания проводились на предприятии ОАО «НПП «Аэросила» при участии представителей АО «Аэроэлектромаш». Структурная блок схема испытательного стенда представлена на Рисунке 16.

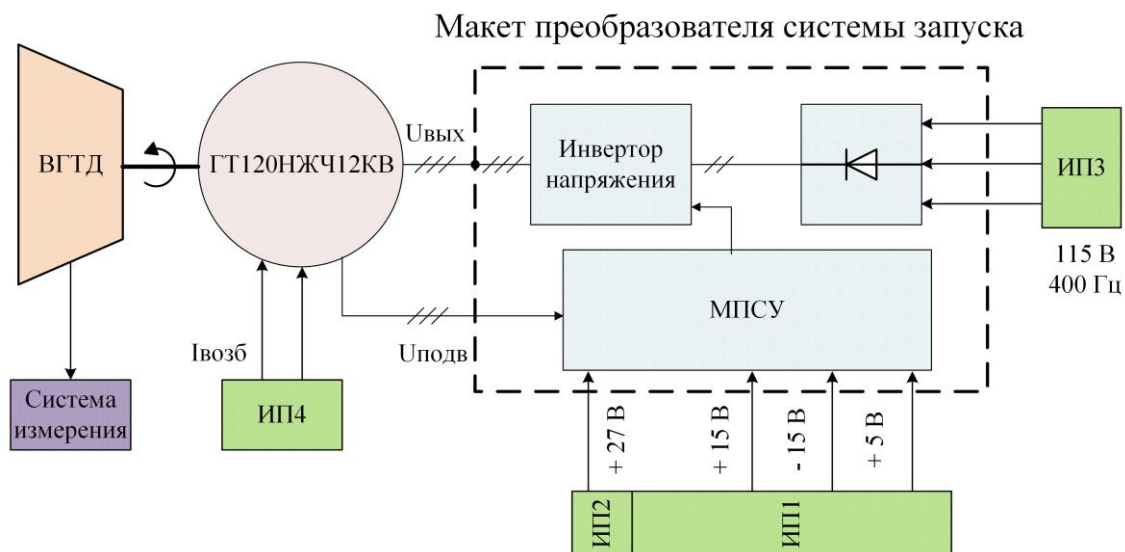


Рисунок 16 – Схема испытательного стенда макета преобразователя с генератором в составе ВГТД

Программа испытаний содержала два основных этапа это – горячий запуск и холодная прокрутка. Запуск ВГТД в режиме горячего запуска, отличается тем, что включается топливная система, она подает топливо в камеру сгорания, происходит его воспламенение, и прокрутка вала двигателя продолжается до скорости необходимой для уверенного вывода авиадвигателя в режим холостого хода, что для данной системы составляет 55% от номинальной скорости. Результаты работы системы отображены на Рисунке 17.

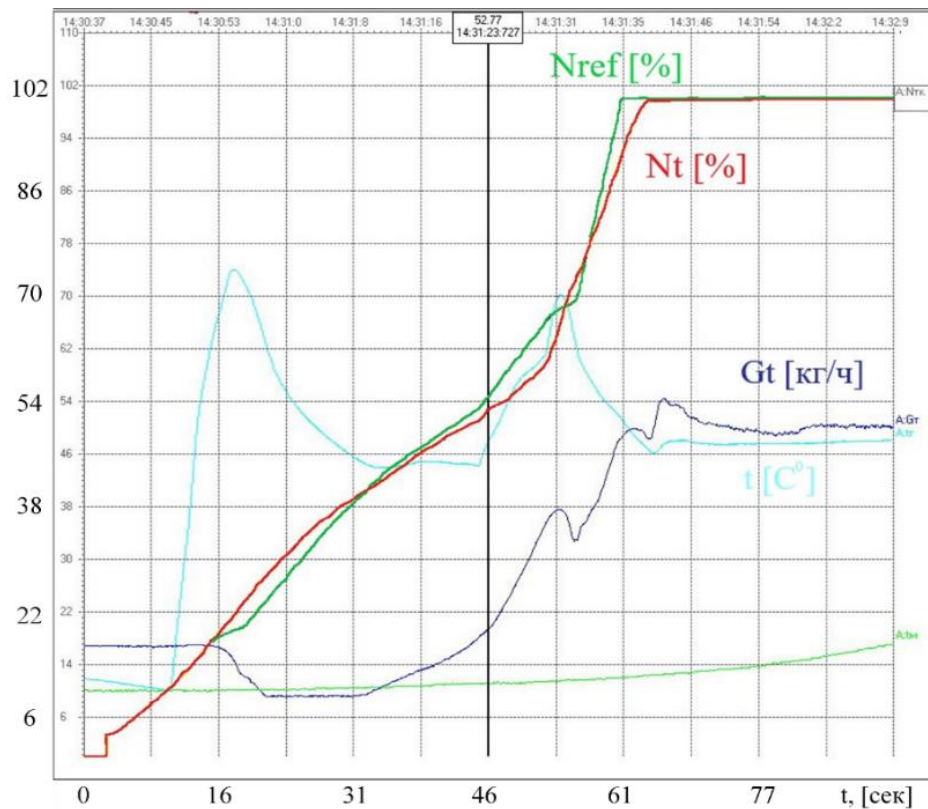


Рисунок 17 – Осциллограммы работы ВГТД при горячем запуске

где, N_{ref} [%] – уставка по скорости для ВГТД, N_t [%] – текущая скорость вала ВГТД, G_t [кг/ч] – расход топлива ВГТД, t [C°] – температура в камере сгорания ВГТД.

Проверка способа запуска с использованием реактивной составляющей момента были проведены на модифицированном генераторе, с интегрированным датчиком положения ротора. Целью испытаний является проверка реализации моментной характеристики необходимой для запуска ВГТД, представленной на Рисунке 13, испытания проводились путем проверки статических точек из нагрузочной характеристики.

Момент на валу стартер-генератора измерялся с помощью балансирной машины. Вал стартер-генератора жестко связывался с валом балансирной машины через переходной валик, обеспечивая механическую связь. Для регулирования величины момента сопротивления на валу стартер-генератора, изменялась величина тока возбуждения балансирной машины. Сопротивление нагрузки балансирной машины во время испытаний не регулировалось. Частота вращения стартер-генератора измерялась с помощью тахометра, установленного на балансирной машине.

По результатам физических экспериментов, был проведен анализ полученных выражений для электромагнитного момента с учетом реальной характеристики изменения нагрузки.

Таблица 2 содержит результаты сравнения полученных данных, из которых можно сделать вывод что, относительная погрешность – δ , на начальном этапе находится в диапазоне от 1,75 до 2,8 процентов, однако при снижении значений момента, погрешность увеличивается до 9,33 процентов.

Таблица 2 – Сравнение аналитических и экспериментальных результатов

$n_{\text{вала}}$	об/мин	1000	1800	3000	4200	5400	6600
$M_{\text{эм}}(\text{эксперимент})$	H^*M	53	73	40.3	21.1	12.8	7.4
$M_{\text{эм}}(\text{расчет})$	H^*M	54.48	75	41.01	21.69	13.58	8.1
δ	%	2.78	2.74	1.75	2.80	6.10	9.33

Результаты сравнения полученного электромагнитного момента и расчетного момента, представлены на Рисунке 18, также рисунок содержит, заданный по техническому заданию, момент сопротивления, и скорость ротора изменяющиеся относительно времени.

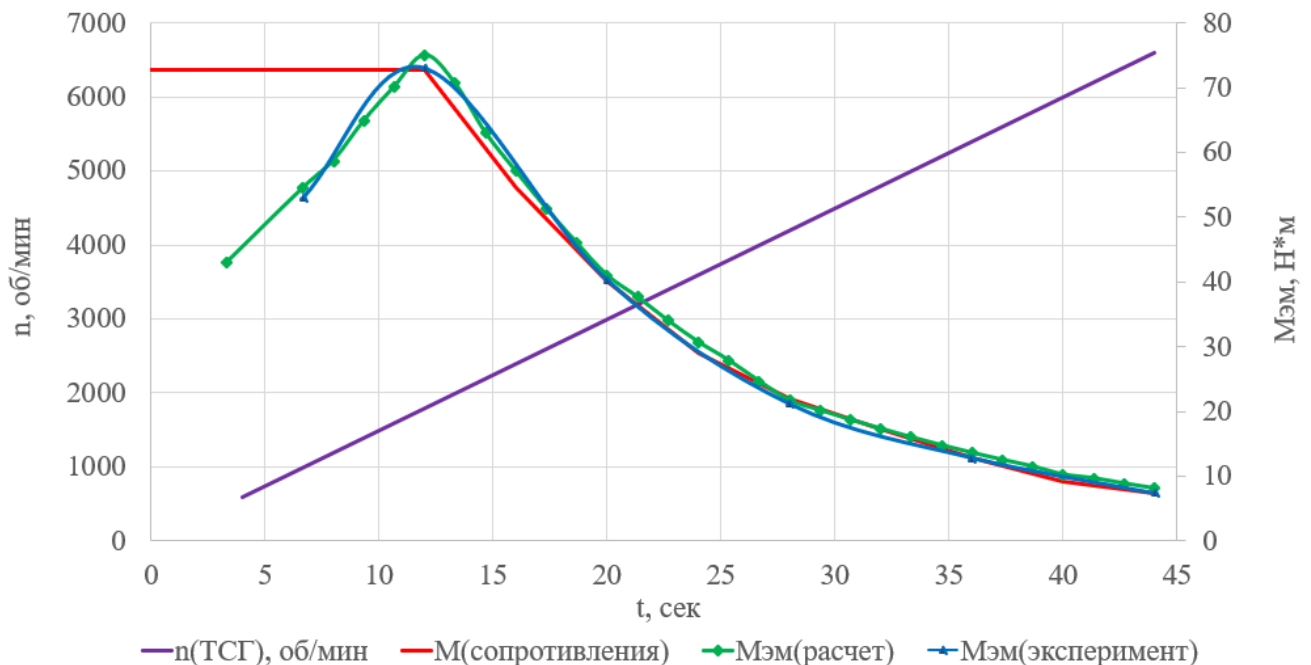


Рисунок 18 – Сравнение расчетного и экспериментального момента ТСГ

В заключении приводятся основные выводы и результаты по диссертационной работе. **В приложении А** представлены справка и акты о внедрении результатов диссертационной работы в учебном процессе НГТУ (г. Новосибирск) и при проведении НИОКР в АО «Аэроэлектромаш» (г. Москва) и АО «СЭГЗ» (г. Сарапул). **В приложении Б** представлены патенты на изобретения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В процессе выполнения диссертационного исследования была решена научно-техническая задача по исследованию и разработке стартер-генераторной

системы на основе трехкаскадного синхронного генератора. В качестве основных результатов диссертационной работы, можно выделить следующие пункты:

1. Предложена математическая модель трехкаскадного синхронного генератора, на основе которой разработаны модели системы генерирования и системы запуска с цифровой системой управления. Для обоих вариантов синтезированы системы подчиненного регулирования.
2. Проведен анализ электромагнитных процессов ТСГ при формировании реактивной составляющей электромагнитного момента. Получено выражение для момента трехкаскадного синхронного генератора, зависящее от параметров, регулируемых инвертором напряжения и полупроводниковым преобразователем возбудителя. Определена функция изменения угла управления тока инвертора, позволяющая получить необходимый момент на валу трехкаскадного синхронного генератора при минимальном значении тока статора.
3. На основе полученных выражений для момента, разработаны алгоритмы управления полупроводниковым преобразователем.
4. Получена система аналитических выражений, позволяющих определить энергетические параметры полупроводникового преобразователя при работе на трехкаскадный синхронный генератор в двигательном режиме.
5. Разработана методика расчета общей постоянной времени трехкаскадного синхронного генератора, и спроектирован на основе этих результатов, система управления цифрового блока для регулирования выходного напряжения в режиме генерирования.
6. Разработан и изготовлен экспериментальный образец преобразователя частоты и проведены физические эксперименты, подтверждающие работоспособность предложенных алгоритмов управления ТСГ в двигательном режиме. Показано, что ошибка в теоретическом расчете электромагнитного момента на начальном этапе запуска не превышает 3%.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных

ВАК:

1. Левин А.В., Халютин С.П., Давидов А.О., Жмуров Б.В., Харитонов С.А., Жарков М.А., Харитонов А.С. / Стартер-генераторная система для вспомогательной силовой установки // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2017. - №5. – С. 55-66.
2. Жарков М.А., Сидоров В.Е., Преображенский Е.Б., Балагуров М.В., Дубкова Р.Ю., Харитонов С.А./ Непосредственный преобразователь частоты для стартер-генераторной системы маршевого двигателя // Доклады АН ВШ РФ. – 2018. – № 3 (40). – С. 7–25.

3. Жарков М.А., Сапсалева А.В., Харитонов С.А., Зиновьев Г.С., Жуловян В.В./Анализ использования демпферной обмотки для создания пускового момента трехкаскадного синхронного генератора // Доклады АН ВШ РФ. – 2018. – № 4 (41). – С. 64-76.
4. Жарков М.А./ Анализ формирования электромагнитного момента трехкаскадного синхронного генератора для реализации электростартерного устройства// Электропитание. - 2021. - № 2. – С. 19–26.
5. Жарков М.А., Сараханова Р.Ю., Сальвассер А.А., Хорошев М.А./ Динамические процессы системы генерирования на основе трехкаскадного синхронного генератора и цифрового блока регулирования напряжения// Электропитание. - 2021. - № 3.

Патенты на изобретения РФ:

6. Патент №2680287 С1 Российская Федерация, МПК F02С 7/00. Способ запуска газотурбинного двигателя: № 2018100313: заявл. 09.01.2018: опубл. 19.02.2019/ А.В. Сапсалева, М.А. Жарков, С.А. Харитонов, П.А. Бачурин; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «НГТУ».
7. Патент №2717477 С1 Российская Федерация, МПК F02N 11/14, H02P 1/50, F02С 7/00. Способ запуска газотурбинного двигателя: № 2019124156: заявл. 25.07.2019: опубл. 23.03.2020 / А.В. Сапсалева, М.А. Жарков, А.С. Харитонов [и др.]; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «НГТУ».
8. Патент №2713390 С1 Российская Федерация, МПК H02J 7/34. Адаптивная стартер-генераторная система для летательных аппаратов : № 2019115319 : заявл. 20.05.2019 : опубл. 05.02.2020 / Р.Ю. Дубкова, С.А. Харитонов, М.А. Жарков, Д.В. Коробков; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «НГТУ».

Основные публикации в изданиях, входящих в базу данных Scopus и/или Web of Science:

9. Zharkov M.A., Kharitonov S.A., Simin V.S.: Electric Starter Mode of Synchronous Generator with Permanent Magnets//14 International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM 2013). – Novosibirsk: IEEEE, 2013. - P. 392-394.
10. Zharkov M.A., Kharitonov S.A., Simin V.S.: Electric starter mode three-stage synchronous generator with damping cage//15 International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM 2014). – Novosibirsk: IEEEE, 2014. - P. 444-446.
11. M.A. Zharkov, S.A. Kharitonov, V.S. Simin, D.V. Korobkov, A.G. Volkov, I.O. Bessonov/ Mathematical model of the starter system based on a three-stage synchronous generator with damping cage/ // 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2015), Altai. – Novosibirsk: NSTU, 2015.- P. 422-426.
12. Zharkov M.A., Bachurin P.A., Kharitonov S.A., Kupriyanov A.D., Sapsalev A.V., Sarakhanova R.Yu. /Experiment results of the laboratory tests of electrical starting system powered by an AC source// 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2016), Altai, Erlagol, 30 June – 4 July 2016. – Novosibirsk: NSTU, 2016.- P. 448-451.

13. Zharkov M.A., Bachurin P.A., Kharitonov S.A., Korobkov D.V., Sarakhanova R.Yu., Simin V.S. /Experiment results of laboratory tests of electrical starting system powered by a DC source//17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2016), Altai, Erlagol, 30 June – 4 July 2016. – Novosibirsk: NSTU, 2016.- P. 623-627.
14. M.A. Zharkov, S.A. Kharitonov, A.V. Sapsalev, A.S. Kharitonov/ Starting Mode of Three-Stage Brushless Generator Operation//2018 17th International Ural Conference on AC Electric Drives (ACED), Ekaterinburg, Russia, 26-30 March 2018. - IEEE, 2018. – P. 1-4.
15. M.A. Zharkov, V.E. Sidorov/ Electric Starter System for Launching a Gas Turbine Aircraft Engine//20th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2019), Altai. – IEEE, 2019. – P. 700-704.
16. M. A. Zharkov, R. Y. Dubkova, V. E. Sidorov and S. A. Kharitonov, "Starter-Generator System for Gas Turbine Engine Based on AC-AC Converter," 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), Ufa, Russia, 2019, pp. 1-6.
17. M. A. Zharkov, S. A. Kharitonov, V. E. Sidorov and R. Y. Dubkova, "The Analysis of the Reactive Launch of Three-stage Synchronous Generator for Aviation Starter-Generator Device," 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), Ufa, Russia, 2019, pp. 1-5.
18. L.G. Zotov, V.P. Razinkin, M.A. Zharkov, V.V. Atuchin, "Flying apparatus DC–DC starter-generator converter based on switching capacitor structures". Electrical Engineering. 2019
19. M. A. Zharkov and R. Y. Sarakhanova, "Analysis of Current State of the Starting Device for Aircraft Gas Turbine Engines," 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Chelyabinsk, Russia, 2020, pp. 383-388
20. M. A. Zharkov, R. Y. Sarakhanova and D. A. Kurochkin, "Experimental Results of Starting a Three-Stage Synchronous Generator Using a Reactive Torque," 2021 XVIII International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED), 2021, pp. 1-4.

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Тел. 8(383) 346-08-57

Формат 60x84 1/16. Объем 1,5 п.л. Тираж 100 экз.

Заказ № 366. Подписано в печать 18.10.2021 г.