

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

*На правах рукописи*



ПАУКОВ ДМИТРИЙ ВИКТОРОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
ВОЗДУШНЫХ СУДОВ НА ОСНОВЕ АКСИАЛЬНОГО  
БЕСКОНТАКТНОГО ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель -  
доктор технических наук, профессор  
Воронин Сергей Григорьевич

Челябинск – 2020

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ .....	15
1.1 Классификация и состав систем электроснабжения воздушных судов .....	15
1.2 Требования к системам электроснабжения воздушных судов, их структурные схемы и режимы работы.....	22
1.3 Анализ существующих источников электроэнергии для воздушных судов и перспективы их развития.....	42
1.4 Выводы по первой главе и задачи исследования .....	46
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕРСПЕКТИВНОЙ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ.....	49
2.1 Обоснование перспективной конструкции электротехнического комплекса для воздушных судов .....	49
2.2 Разработка перспективной конструкции электротехнического комплекса для воздушных судов .....	56
2.3 Методы исследования переходных процессов в электромеханических преобразователях энергии (ЭМПЭ). Математическая модель системы электроснабжения.....,.....	60
2.4 Выводы по второй главе.....	70
ГЛАВА 3. РЕАЛИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ.....	72
3.1 Общие сведения.....	72
3.2 Расчет электромагнитных и электромеханических переходных процессов в комплексе.....	72
3.3 Исследование взаимосвязанных электромагнитных, электромеханических и динамических процессов в комплексе .....	79

3.4 Выводы по третьей главе.....	92
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ .....	94
4.1 Общие сведения, о программе и методике эксперимента и экспериментальном стенде.....	94
4.2 Проведение экспериментальных исследований и их результаты...	97
4.3 Определение КПД .....	99
4.4 Выводы по четвертой главе .....	101
ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ.....	103
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	106
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	119
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	132
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	138

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Применение электрической энергии на борту воздушного судна (ВС) обусловлено следующими преимуществами по сравнению с другими видами энергии:

- возможностью преобразования электрической энергии в другие виды энергии и обратного преобразования;
- удобством передачи на значительные расстояния;
- простотой контроля и регулирования агрегатов, возможностью дистанционного и автоматического управления;
- лучшие массогабаритные показатели устройств для ее производства, преобразования, передачи и распределения, по сравнению с соответствующими устройствами для других видов энергии;
- высокой надежностью в работе электрических агрегатов [101, 32, 29]

Существует много способов для повышения надежности систем электроснабжения воздушных судов и одним из таковых является создание параллельных источников электроэнергии. Исходя из этих требований в руководящих документах в ВС всегда проектируется и создается как минимум две параллельные и независимые друг от друга системы электроснабжения. А для устройств и систем, потребляющих электроэнергию и имеющих жизненно важное значение для обеспечения безопасности выполнения полетов, проектируется и создается не всегда две, а бывает три и даже более параллельные и независимые друг от друга системы электроснабжения. Кроме того, всегда предусматривается резервное (аварийное) питание от различных источников (аккумуляторные батареи, выдвижные генераторы и т.д.) [32, 9, 68 и др.].

В случае выхода из строя основного источника электрической энергии ВС в воздухе приводит к тому, что выполнение поставленной задачи становится невозможным. Это связано с тем, что резервные (аварийные) источники электрической энергии могут обеспечивать ВС 10-30 минут. Поэтому при подобной аварийной ситуации в Руководстве по летной эксплуатации экипажу ВС стоит задача обеспечить в кратчайшие сроки поиск подходящего аэродрома

(площадки) для выполнения посадки с использованием аварийных источников электрической энергии.

Кроме того, аварийный источник электроэнергии (как правило это аккумуляторная батарея – далее АБ) предназначена для обеспечения работоспособности минимального количества систем, необходимых для завершения полета и выполнения безопасной посадки. А такие важные системы, как управление вооружением, системы, предназначенные для предупреждения об облучении ВС его обороны – не работают. Соответственно, в случае, если ожидается бой с противником в воздухе или он ожидается – вероятность потерпеть поражение увеличивается многократно [86, 66, 10, 11 и др.] А если происходит ещё и отказ аварийного источника электроэнергии, то однозначно приводит к отключению силовой установки и, соответственно, крушению ВС.

С учетом развития современной техники и электроники очень важное значение придается качеству электроэнергии, вырабатываемой системами электроснабжения ВС. От него зависит работоспособность, живучесть и качество выполняемых функций всех устройств и систем, использующих для своего функционирования электрическую энергию.

Несомненно, что работа, направленная на поиски способов улучшения надежности систем электроснабжения ВС, а также уменьшения массы и размеров источников электроэнергии, повышения её качества всегда было и в настоящее время является весьма актуальной и значительной задачей, направленной прежде всего на улучшение боевых возможностей ВС, повышения степени безопасности выполнения полетов.

При проектировании системы электроснабжения ВС её строение и структура зависит от огромного количества параметров – предназначения, вида ВС, какие требования предъявляются к вырабатываемой электроэнергии и её характеристикам. В связи с этим на ВС всех поколений применяется и используется огромное количество различных систем электроснабжения для вырабатывания и обеспечения всех потребителей электроэнергией надлежащего качества. На сегодняшний день на многих ВС во всем мире (как на военных, так и

на гражданских) помимо источников электроэнергии, указанных выше (АБ) спроектированы и используются системы электроснабжения, вырабатывающие необходимое питание за счет ВСУ или ветряных генераторных установок.

**Степень научной разработанности вопроса.** Большой вклад в развитие современного электрооборудования ВС внесли Бируля И.Н. [6, 7], Зечихин Б.С.[69], Бут Д.А. [8], Винокуров В.А. [9], Ганджа С.А. [24, 25, 26, 27, 28], Исмагилов Ф.Р. [40, 41], Русаков А.М. [92], Гайтов Б.Х. [13, 14, 18, 19, 22] и др.

Очень большое значение и значительный вклад в работу по проектированию и созданию различных систем электроснабжения, а также их составных частей выполнили рабочие группы ученых, которыми руководили Голгофский Ф.И., Жарков В.Д., Калугин Б.Н., Левинских И.М., Островский В.Л., Федосов А.Ф. и др.

С момента первого практического применения на ВС электроэнергии прошло уже более 130 лет, за это время мощность её источников выросла с 200-300 Вт до 500 кВт, и это не предел. В последние десятилетия 20 века благодаря достижениям в области магнитных материалов и полупроводниковых приборов удалось создать силовые и управляющие устройства, которые позволяют кардинально перестроить всю систему вспомогательного энергоснабжения. Вслед за этим растет мощность приемников электрической энергии, увеличивается как количество специфических нагрузок, так и единичная мощность таких нагрузок. Радиоэлектронное оборудование самолета и, в первую очередь, средства радиоэлектронной борьбы и радиолокации имеют в основном характер импульсно-периодической нагрузки. При большой мощности такой нагрузки это приводит к проблеме обеспечения качества электрической энергии в самолетной системе электроснабжения и совместимости этой нагрузки с другими приемниками электрической энергии.

Однако работа над поиском решения проблемы повышения качества электроэнергии, надежности источников электроэнергии ВС, направленная на поиски способов улучшения надежности систем электроснабжения ВС, а также уменьшения массы и размеров источников электроэнергии, повышения её качества в настоящее время является весьма актуальной и значительной задачей,

направленной прежде всего на повышение степени безопасности выполнения полетов, улучшение боевых возможностей ВС Военно-Воздушных Сил РФ [101, 32]. На большинстве современных отечественных самолетов питание основной бортовой сети осуществляется от одного или нескольких генераторов постоянного или переменного тока, приводимых во вращение авиационными двигателями с изменяющейся скоростью вращения.

При увеличении высоты полёта теплоотдача нагретых частей электрических машин уменьшается. Повышение температуры отрицательно сказывается на работе высотных щеток, в состав которых входят олово и свинец. При температуре свыше 200°С легкоплавкие присадки выплавляются, что приводит к резкому износу щёток.

Механические, вибрационные и ударные перегрузки приводят к разрушению мест пайки проводов, к нарушению нормальной работы щёточно-коллекторных узлов и т. д. [53, 54].

Достижения полупроводниковой техники, изготовление и использование новых современных материалов дали возможность избавиться от большинства недостатков, указанных выше в бесколлекторных генераторах постоянного тока с вращающимися выпрямителями. Такие генераторы в настоящее время серийно выпускаются отечественной промышленностью. Но и у них существует ряд существенных недостатков, перечисленных ранее, кроме того:

- параметры вырабатываемой электрической энергии находятся практически на пороговом значении от требуемого, это связано с высоким коэффициентом пульсации напряжения;
- при изготовлении современных бесконтактных генераторов постоянного тока есть определенные сложности, это в первую очередь связано с тем, что листы магнитопроводов статоров и роторов выполняются методом штамповки, а обмоточные работы выполняются внутри статоров цилиндрической формы.

Для получения постоянного тока с необходимым и приемлемым уровнем пульсаций, а также с возможностью регулирования напряжения необходимо увеличивать количество фаз в системе переменного тока. Построение источников

постоянного тока по схеме синхронный генератор – преобразователь переменного тока в постоянный широко распространён в различных областях техники. Особенно эффективной такая схема оказывается при использовании генераторов с возбуждением от постоянных магнитов, так как при этом удаётся создать бесконтактный компактный источник. Наиболее распространённым вариантом построения такой схемы является применение трёхфазного генератора и двухполупериодного выпрямителя. Недостатком таких схем являются относительно высокие пульсации выпрямленного напряжения. Для их ликвидации приходится использовать довольно громоздкие фильтры. Возможно также применение синусных выпрямителей, которые позволят получить на выходе постоянное напряжение практически без пульсаций. Схемы и алгоритмы управления синусными выпрямителями достаточно сложны, требуют использования транзисторных ключей на полный выпрямленный ток и напряжение, в итоге оказываются существенно дороже схем с неуправляемым выпрямителем. Другим недостатком трёхфазных схем является их чувствительность к отказу силовых элементов выпрямителя. Действительно, выход из строя силового диода или транзистора приводит к выходу из строя всего устройства.

Увеличение числа фаз генератора и выпрямителя позволяет устранить оба перечисленных недостатка. Поэтому многофазные установки с неуправляемым диодным выпрямителем используются в ответственных системах энергоснабжения с повышенными требованиями по надёжности. Для выбора числа фаз чаще всего используют один наиболее наглядный критерий - допустимые пульсации напряжения. Хотя при одном и том же числе фаз генератора возможны различные варианты схем соединения его обмотки, которые могут влиять на суммарные электрические потери и пульсации выпрямленного напряжения не только в штатном режиме, но и при обрыве фазной обмотки или выпрямительного диода. В современных системах электроснабжения, в том числе в системах электроснабжения летательных аппаратов, увеличение количества фаз позволяет получить достаточный эффект, позволяющий уменьшить искажающее воздействие



на вырабатываемое напряжение. Однако, как известно, в подобных случаях существуют ограничения, касающиеся части выпрямительной нагрузки – обычно эти ограничения составляют от 15% до 30% от номинальной. И, соответственно, если есть необходимость увеличить долю нагрузки в системах электроснабжения постоянного тока следует повышать мощность устройств, вырабатывающих электрическую энергию. А это приводит к тому, что, если требования к параметрам переменного тока не изменять, а необходимо увеличивать мощность подключаемых потребителей постоянного тока, приходится значительно увеличивать мощность устройств, вырабатывающих электрическую энергию. И, в свою очередь, это приводит к изменению технических параметров, стоимости, а также и массогабаритных показателей СЭС ЛА в целом [12].

Электрические машины классической (радиальной) конструкции, несмотря на все их достоинства имеют ряд недостатков, которые при их разработке, создании и приобретении особого значения на тот момент не имели. Таковыми являются сложность конструкции и сложная технология изготовления, высокие массогабаритные показатели и стоимость, большое количество отходов при штамповке листов магнитопровода и т.д.

Современные достижения в области электротехники позволяют создавать системы электроснабжения с использованием высокотехнологичных магнитов с очень мощным магнитным потоком [100], в которых нет необходимости в наличии подвозбудителей и возбудителей, регулировать выходное напряжения с помощью современных электронных регуляторов. Но и они имеют свои недостатки – при коротком замыкании из-за наличия мощного магнитного потока магнитов возможно возникновение возгорания на борту воздушного судна (что практически невозможно при использовании обычных магнитов), которое может привести к катастрофе; в современном воздушном бою широко используются средства радиоэлектронной борьбы и мощный электромагнитный импульс противника может вывести из строя электронную систему регулирования выходного напряжения.

Одним из возможных перспективных направлений улучшения эксплуатационно-технических характеристик является разработка генераторных установок с магнитопроводом аксиальной конструкции, которая позволяет устранить ряд недостатков современных источников электроэнергии, применяемых на ВС. [30, 16, 15, 21, 18, 22, 46, 6, 47, 53, 49, 74, 52 и др.].

**Цель работы** – повышение эффективности систем электроснабжения воздушных судов за счет разработки новых электротехнических комплексов постоянного тока с использованием генератора аксиальной конструкции с улучшенными эксплуатационно-техническими характеристиками.

**Задачи исследования:**

- проведение анализа современного состояния систем электроснабжения ВС и их основных эксплуатационно-технических характеристик;
- разработка новой перспективной конструкции электротехнического комплекса для ВС;
- построение математической модели для расчета и исследования, на её основе, электромагнитных и электромеханических процессов в электротехническом комплексе;
- экспериментальное исследование статических и динамических характеристик разработанного электротехнического комплекса.

**Объект исследования** – электротехнический комплекс постоянного тока на основе стабилизированного аксиального бесконтактного генератора постоянного тока.

**Предмет исследования** – особенности конструкции и эксплуатационно-технические характеристики электротехнического комплекса постоянного тока.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач в работе использованы основы теории электрических цепей и методики расчетов электрических машин, теория обобщенного электромеханического преобразователя энергии, методы решения систем нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений и дифференциальных уравнений в частных производных, методы математического моделирования электромагнитных и

электромеханических процессов совместно с методом планирования эксперимента, метод математического и графического моделирования на ПК с использованием пакетов Matlab Simulink.

**Соответствие содержания диссертации заявленной специальности.** Работа выполнена в соответствии с пунктами паспорта специальности ВАК 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»: п. 1. – «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем»; п.3. – «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления».

**Научные положения и результаты, выносимые на защиту:**

1. Конструкция стабилизированного аксиального бесконтактного электротехнического комплекса постоянного тока, отличающаяся от известных конструкций способом изготовления магнитопроводов аксиальных электрических машин, что даёт возможность упростить технологию изготовления, снизить расход магнитных материалов, улучшить массогабаритные и энергетические показатели комплекса (п. 3 Паспорта).

2. Математическая модель на основе обобщенного электромеханического преобразователя энергии, отличающаяся учётом функциональной зависимости параметров электрической машины от тока и скорости вращения ротора, что даёт возможность исследовать взаимосвязанные электромагнитные, электромеханические и динамические процессы в электротехническом комплексе (п.1 Паспорта).

3. Методика расчёта расчета электромагнитных и электромеханических переходных процессов в электротехническом комплексе, отличающаяся тем, что позволяет решать вопросы синтеза электротехнических комплексов с заданными статическими и динамическими свойствами, что даёт возможность проводить исследование динамических характеристик переходных процессов с нелинейными коэффициентами, описывающие поведение системы

электроснабжения, при различных значениях момента инерции ротора, его активного сопротивления и скорости вращения (п.3 Паспорта).

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждается применением фундаментальных законов: теории электромагнитного поля (уравнений Максвелла для электромагнитного поля), теории электрических и магнитных цепей (уравнений Кирхгофа); согласованием теоретических положений и результатов расчета с данными экспериментальных исследований, апробацией на международных, всесоюзных, всероссийских и региональных научно-технических, конференциях и семинарах.

**Значение работы. Научное значение работы** заключается в том, что

- установлены функциональные зависимости рабочих и ударных токов ротора и статора предложенного электротехнического комплекса от скорости вращения, активных и индуктивных сопротивлений обмоток, позволяющие уже на начальном этапе проектирования определить допустимый диапазон их изменения;
- проведено исследование переходных процессов в системе, включающей три электромеханических преобразователя с нелинейными коэффициентами, позволяющее оценить провалы выходного напряжения в переходных режимах;
- построена математическая модель для расчета установившихся режимов, а также электромагнитных и электромеханических переходных процессов в электротехническом комплексе на основе обобщенного электромеханического преобразователя энергии, позволяющая решать вопросы синтеза электротехнических комплексов с заданными статическими и динамическими свойствами.

**Практическое значение работы** заключается в следующем:

- предложена методика расчета параметров системы электроснабжения воздушного судна в статическом и динамическом режимах работы для возможного использования при проектировании электротехнических комплексов;

- разработана и обоснована новая конструкция генератора, как основы электротехнического комплекса;
- экспериментально доказана работоспособность новой конструкции электроснабжения, её более высокую эффективность по сравнению с существующими;
- разработаны и зарегистрированы, установленным порядком, программы автоматизированных расчётов параметров аксиального бесконтактного генератора постоянного тока и его характеристик.

#### **Реализация выводов и рекомендаций работы.**

Научные положения, выводы и рекомендации использованы в отчете о НИР № 31205 «САЭ-АКС-ДЭМ» «Повышение эффективности систем автономного электроснабжения» (Филиал ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Краснодар)); используются в разработке и модернизации систем электроснабжения в продукции военного назначения в АО «НПО «Электромашина»»; в учебном процессе в ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Жуковского и Ю.А. Гагарина» и ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет».

**Апробация работы.** Основные положения и полученные результаты выполненного исследования были апробированы и получили одобрение: на международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы энергетики АПК» (Саратов, 2010 г.), на XXX-й Российской школе по проблемам науки и технологиям, посвященная 65-летию Победы, (МИАСС, 2010 г.), на школе-семинаре «Проблемы и направления информационного и летно-технического обеспечения выживаемости и живучести авиационных комплексов и систем управления ими» (Сочи, 2010 г.), на Международных научных конференциях «Технические и технологические системы» (Краснодар, материалы конференций №I, II, III, IV, V, VI, IX, X, 2009-2019 гг.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 24 печатных работы, 2 из них в журналах, рекомендованных ВАК. Получено 4 патента РФ на изобретения и 2 свидетельства о государственной регистрации программных продуктов.

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка используемой литературы из 99 наименований (отечественных и зарубежных авторов) и 3 приложений. Общий объём диссертации составляет 141 страницу, в том числе 118 страниц основного текста, включающего в себя 43 рисунка, 11 таблиц, и 23 страницы приложений.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первой главе** выполнен анализ источников электрической энергии, которые используются в воздушных судах на сегодняшний день, определены возможные направления для улучшения этих источников.

**Во второй главе** рассматривается аксиальная конструкция генератора как основы электротехнического комплекса постоянного тока, дано устройство и принцип действия разработанного на уровне изобретения аксиального бесконтактного генератора постоянного тока [77], проанализированы методы исследования переходных процессов и разработана математическая модель электромеханических и электромагнитных процессов, происходящих в разработанном электротехническом комплексе постоянного тока.

**Третья глава** посвящена реализации разработанной математической модели. Для исследования переходных электромагнитных и электромеханических переходных процессов, получения зависимостей между различными показателями, характеризующими процессы, происходящие в машине, уравнения электромагнитных и электромеханических переходных процессов в электротехническом комплексе с учетом насыщения и характера питающего напряжения решались на ЭВМ.

**В четвертой главе** в целях подтверждения основных теоретических положений были изготовлен экспериментальный образец аксиального бесконтактного генератора постоянного тока мощностью 1,5 кВт и выполнен комплекс экспериментальных исследований, показана сходимость теоретических и экспериментальных исследований.

## ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 1.1 Классификация и состав систем электроснабжения воздушных судов

Боевые возможности и боевая эффективность воздушных судов ВВС определяются как их летно-тактическими данными, так и тактико-техническими характеристиками электрооборудования. Выполнение боевой задачи напрямую связано с устойчивостью параметров и надежностью бортовых систем электроснабжения (СЭС).

Система электроснабжения воздушного судна (СЭС ВС) - сложная энергетическая система, предназначенная для производства, преобразования, передачи и распределения электрической энергии потребителям. Она состоит из достаточно большого количества узлов и агрегатов: генераторов переменного и постоянного тока различных конструкций и исполнения, преобразователей электроэнергии различных типов (статических и электромашинных), батарей для аварийного электропитания, различной аппаратуры, предназначенной для осуществления регулировки параметров электроэнергии, включения, а также защиты элементов бортовой сети, генераторов и потребителей электрической энергии.

В состав СЭС ВС входят источники электроэнергии и бортовая электрическая сеть.

Согласно ГОСТ Р 54703-2017 [29], все потребители электроэнергии ВС условно разбивают на несколько основных групп:

- приемники 1-категории, основная задача которых в аварийной ситуации – это гарантированное выполнение безопасной посадки;
- приемники 2-й категории, основная задача которых – это обеспечить безопасное продолжение полета, а также успешно выполнить поставленную задачу и совершить посадку;
- приемники 3-й категории, в случае отказа которого значительного влияния на безопасность полета не оказывается.

Приемники 1-й категории, для того, чтобы обеспечить достаточно высокую надежность электроснабжения, подключаются к шинам специальных распределительных устройств постоянного и переменного тока (аварийным шинам). Их схема коммутации предусматривает возможность подключения к источникам как первичных (вторичных), так и аварийных систем электроснабжения.

СЭС ВС принято классифицировать по признакам [43, 46, 104, 9, 68 и др.]:

- по своему назначению:
  - ✓ основные – это источники электрической энергии, которые осуществляют обеспечение необходимой энергией все или большую часть потребителей во время полета воздушного судна;
  - ✓ резервные (или вспомогательные) – это источники электрической энергии, задача которых обеспечить необходимым питанием небольшое число потребителей, пока двигатели, и соответственно основные источники электрической энергии еще не запущены;
  - ✓ аварийные – это источники электрической энергии, которые должны обеспечивать только те потребители, без функционирования которых невозможно безопасное завершение полета в кратчайшие сроки.
- по виду источника электрической энергии:
  - ✓ первичные – такие источники, ротор которых приводится во вращение напрямую от авиационных двигателей либо при помощи специальных агрегатов, обеспечивающих постоянную частоты вращения вала;
  - ✓ вторичные – такие источники, в которых необходимая электрическая энергия вырабатывается с использованием различных преобразователей (инверторов, выпрямителей, трансформаторов и т.д.) из энергии, получаемой от первичной системы;
- по роду тока первичных источников электроэнергии:
  - ✓ постоянного тока;
  - ✓ переменного тока;
  - ✓ комбинированные;



- по виду вырабатываемой электроэнергии: СЭС постоянного и переменного тока постоянной частоты и системы электроснабжения переменного тока переменной частоты.

- по уровню напряжения:  $U = 28 \text{ В}, 36 \text{ В}, 115 \text{ В}, 208 \text{ В}$ ;
- по количеству проводов, предназначенных для передачи электроэнергии: однопроводные, двухпроводные, трехпроводные;
- по уровню стабилизации частоты:
  - ✓ стабильной частоты;
  - ✓ нестабильной частоты.

Исходя из различных вариантов и возможностей строения систем электроснабжения существует несколько основных видов, которые нашли широкое применение в авиации [50, 107, 101, 104]:

- постоянного тока с  $U = 28 \text{ В}$ ;
- переменного трехфазного тока нестабильной частоты с  $U = 208 \text{ В}$ ;
- переменного трехфазного тока стабильной частоты с  $U = 208 \text{ В}$ ;
- вторичная система переменного однофазного тока стабильной частоты с  $U = 115 \text{ В}$ ;
- вторичная система переменного трехфазного тока стабильной частоты с  $f = 400 \text{ Гц}$  с  $U = 208 \text{ В}$ .

Принадлежность системы электроснабжения ВС к определенному признаку определяется типом ее первичной системы.

Принцип построения СЭС заключается в выборе первичных и вторичных источников, объединенных в единую электрическую сеть, способов и устройств преобразования, передачи и распределения электроэнергии [50, 51].

В системах первого вида – СЭС постоянного тока (рисунок 1.1) основным источником электроэнергии является генератор постоянного тока  $G=$ , который получает механическую энергию вращения от двигателей воздушного судна.

Генератор вырабатывает напряжение значением 28 В. Для получения переменного тока частотой 400 Гц с различными уровнями напряжений

используются инверторные преобразователи различных типов. Как и во всех типах систем электроснабжения резервным источником питания в аварийной ситуации является аккумуляторная батарея, которая подключена к сети постоянного тока.

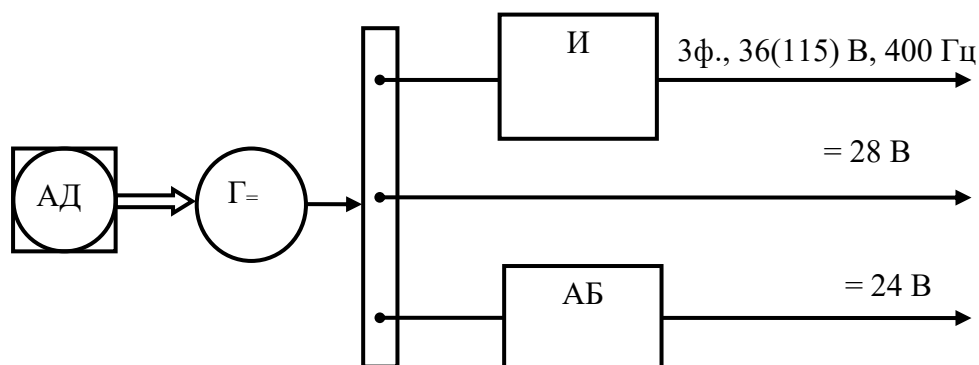


Рисунок 1.1 - Система электроснабжения постоянного тока

Основным источником электроэнергии СЭС второго вида (рис. 1.2) является генератор переменного тока. Вследствие нестабильной частоты вращения ротора АД, а соответственно, ротора генератора СЭС вырабатывает напряжение нестабильной частоты. Получение переменного тока стабильной частоты достигается с использованием статического преобразователя частоты, который получает электроэнергию от генератора постоянного тока. От этого генератора непосредственно получают питание и потребители переменного тока нестабильной частоты. Для получения постоянного тока напряжением 28 В используются трансформаторно-выпрямительные устройства (ТВУ).

Основным источником электроэнергии СЭС третьего вида (рисунок 1.3) также является генератор переменного тока.

Для получения стабильной частоты ротор генератора связан с авиационным двигателем через специальный агрегат, который устроен таким образом, что выходной его вал независимо от изменений оборотов двигателя вращается с постоянной скоростью, чем и обеспечивается постоянство частоты.

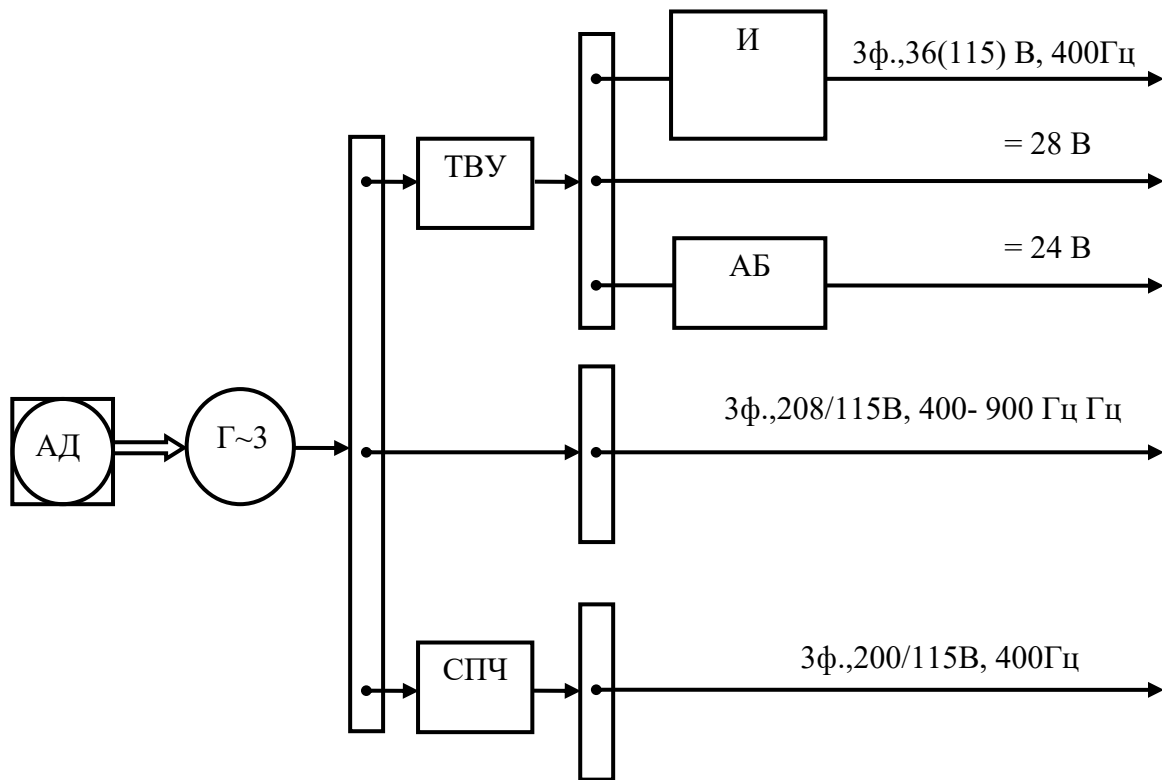


Рисунок 1.2 – Система электроснабжения переменного тока  
нестабильной частоты

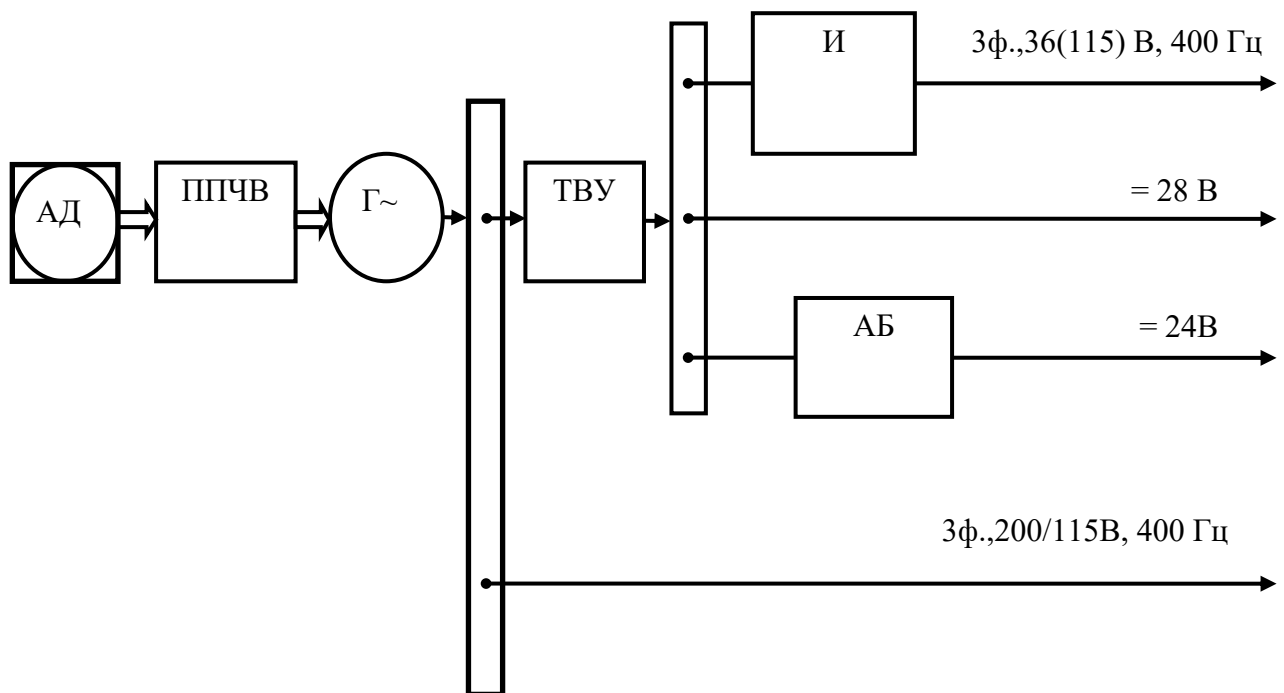


Рисунок 1.3 - Система электроснабжения переменного тока стабильной  
частоты

Трансформаторно-выпрямительное устройство (ТВУ), подключаемое к сети переменного тока, преобразует переменный ток, вырабатываемый генератором, в постоянный напряжением 28 В.

СЭС этого вида в настоящее время применяются на небольших и средних самолетах (в частности, на Л-39, Л-410).

В комбинированных СЭС основными источниками электроэнергии являются генератор постоянного тока низкого напряжения  $\Gamma=$  и генератор переменного тока  $\Gamma\sim$ , приводимые во вращение от АД (например, на самолетах типа Л-410, АН-26, вертолетах). На некоторых самолетах (например, МиГ-29) используется привод постоянной частоты вращения (ППЧВ) для приведения во вращение ротора генератора переменного тока.

На рисунке 1.4 представлена комбинированная СЭС (СЭС первого и второго вида). Данная система включает в себя систему первого вида, которая представлена системой электроснабжения постоянного тока и систему второго вида, которая представлена системой электроснабжения переменного тока, обеспечивающая электрической энергией нестабильной частоты потребителей, при работе которых не обязательна стабильность частоты.

В свою очередь, для обеспечения электроэнергией переменного тока нестабильной частоты в системе установлен генератор переменного тока. Такая СЭС используется на самолетах Л-410, Су-25, Су-27, МиГ-29 и их модификациях.

Для того, чтобы было возможно обеспечить параллельную работу систем электроснабжения первого (постоянного тока) и второго (переменного тока) видов необходимо соблюдение ряда требований и условий.

Для СЭС первого вида это:

- у первичных и вторичных источников электрической энергии, которые включаются на параллельную работу должна быть одинаковая полярность напряжений;
- напряжение бортовой сети не должно превышать напряжения источника, который подключается к ней.

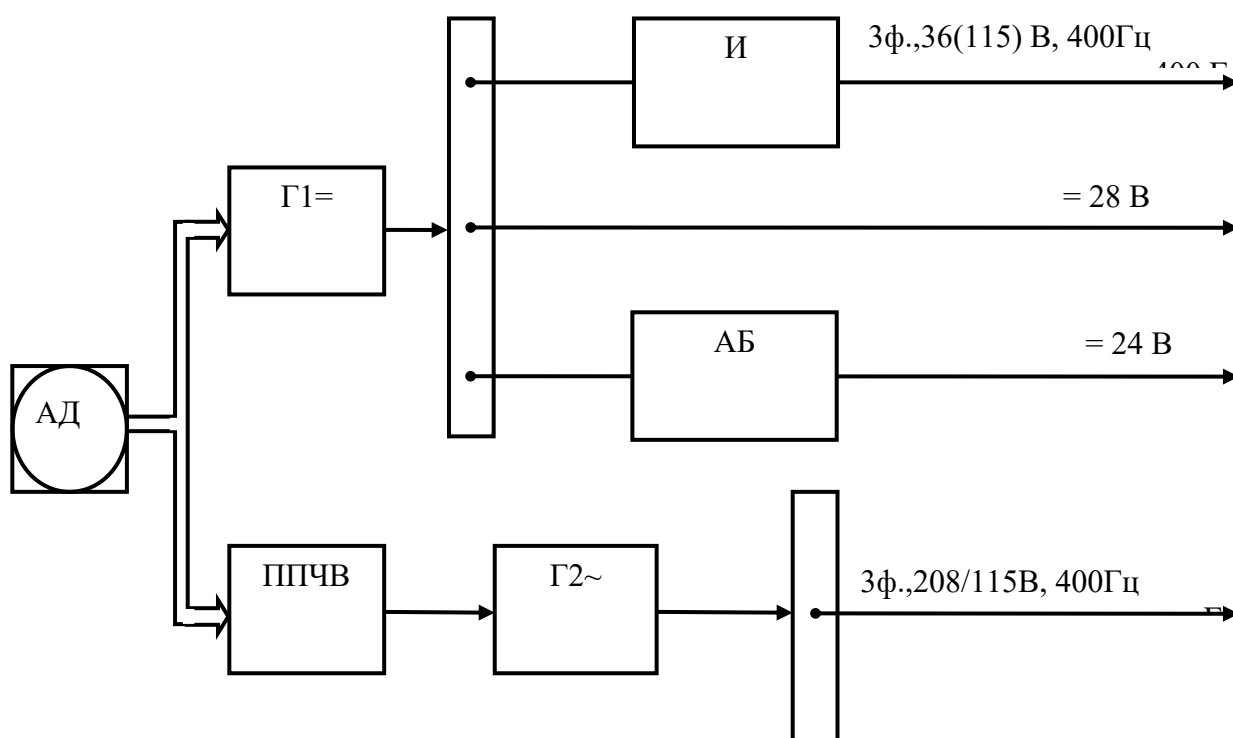


Рисунок 1.4 - Комбинированная система электроснабжения

Для контроля выполнением условий, которые были указаны выше существует аппаратура для защиты и управления – это дифференциально-минимальное реле (ДМР) и аппарата защиты и управления (АЗУ). Важным условием нормальной параллельной работы генераторов является равномерное распределение нагрузки между ними. В общем случае нагрузка должна распределяться пропорционально мощности параллельно работающих генераторов. На ЛА, как правило, устанавливаются однотипные генераторы. Поэтому нагрузка между ними должна делиться поровну. Это достигается при равенстве напряжений генераторов.

Для систем электроснабжения переменного тока реализация включения каналов для параллельной работы необходимо соблюдение следующих требований и условий:

- фазы каналов должны чередоваться в одинаковом порядке;
- для частот каналов и сети должно обеспечиваться равенство;
- для напряжений каналов и сети должно обеспечиваться равенство;
- напряжения каналов по фазе должны совпадать.

Равномерное распределение как активной и так реактивной нагрузок является существенным требованием для обеспечения параллельной работы генератора переменного тока.

Чтобы обеспечивалось равномерное распределение активной нагрузки необходимо соответствие внешних характеристик генераторов и равенство напряжений.

Чтобы выполнялось условие обеспечения равномерного распределения реактивной нагрузки – соответствие механических характеристик ППС и равенство частот тока.

Анализ СЭС ВС показал, что обязательным ее элементом являются источники постоянного тока. На современных ВС около 50 % потребителей электроэнергии работают на постоянном токе, поэтому разработка и исследование систем постоянного тока и их элементов является весьма актуальной научной задачей.

## **1.2 Требования к системам электроснабжения воздушных судов, их структурные схемы и режимы работы**

Основная функция СЭС ВС – генерирование электроэнергии с необходимыми параметрами для всего электрооборудования воздушного судна как на земле, так и в воздухе. Необходимые параметры – это те характеристики вырабатываемой электроэнергии, при которых все потребители электроэнергии работают в штатном режиме.

Механизация и автоматизация процессов управления ВС (взлет, посадка, отклонение рулей в полете, перекачка топлива и др.), установка энергоемких систем жизнеобеспечения, вооружения, навигации, радиосвязи и радиолокации обусловили необходимость увеличения суммарной мощности источников электроэнергии в системах электроснабжения ВС до сотен кВт. Этим объясняется увеличение количества устанавливаемых на борту ВС источников электроэнергии и рост единичной мощности каждого отдельно взятого источника.

В процессе работы аппаратуры, вырабатывающей электрическую энергию могут возникать различные ситуации, в разной степени оказывающие влияние на работу электроаппаратуры в целом. Устройства и аппаратура, которые установлены на воздушных судах, оказывают различное влияние на выполнение боевой задачи и полета в целом. В некоторых случаях при отказах различных элементов систем электроснабжения приходится отключать часть приемников и выполнять переход на электропитание от резервных или аварийных источников электроэнергии.

Различают несколько режимов работы систем электроснабжения: нормальный, частичный, аварийный и ненормальный.

Нормальный режим работы – в данном режиме, электрической энергией в необходимых количествах обеспечено все электрооборудование, которому она требуется для нормального функционирования;

Частичный режим работы – это такой режим, при котором система электроснабжения не может вырабатывать электрическую энергию в необходимом количестве; в связи этим некоторым потребителям прекращается подача электроэнергии, а оставшаяся в сети аппаратура обеспечивается от работоспособных СЭС.

Аварийный режим – это такой режим, при котором вследствие выхода из строя различных элементов, либо системы электроснабжения в целом приходится переводить аппаратуру, минимально необходимую для удержания воздушного судно в воздухе и выполнения экстренной посадки на питание от резервных или аварийных источников электроэнергии.

Ненормальный режим – это такой режим, при котором на некоторое (непродолжительное) время происходит прекращения нормального функционирования системы электроснабжения, как правило причинами подобных перебоев являются различные проблемы в работе регулирующей и управляющей аппаратуры, замыкания в проводке, а также ряд других причин. Однако, после отключения устройств, которые отказали, аппаратурой защиты возможно

прекращение ненормального режима. После этого возможно восстановление нормальной работоспособности системы.

Технические требования, которые необходимо соблюдать при проектировании систем электроснабжения ВС, изложены в ГОСТ 54703-2017. Согласно ГОСТу 54703-2017, на проектируемом ВС разрешается использовать следующие типы первичных и вторичных систем электроснабжения:

- переменного трехфазного тока постоянной частоты;
- постоянного тока.

Допускается (но это в исключительных случаях) если будет использоваться система переменного трехфазного тока переменной частоты и система переменного однофазного тока постоянной частоты вместо первичной и вторичной систем соответственно.

На самолетах (вертолетах) допускается применение систем электроснабжения следующих типов:

- переменного трехфазного тока номинальным напряжением 115/200 В постоянной номинальной частоты 400 Гц;
- переменного трехфазного тока номинальным напряжением 230/400 В постоянной номинальной частоты 400 Гц;
- переменного трехфазного тока номинальным напряжением 115/200 В переменной частоты 360 -800 Гц;
- переменного трехфазного тока номинальным напряжением 230/400 В переменной частоты 360 - 800 Гц;
- постоянного тока номинальным напряжением 27 В;
- постоянного тока номинальным напряжением 270 В.

Системы электроснабжения самолетов (вертолетов) должны состоять не менее чем из двух независимых каналов или подсистем.

На самолетах (вертолетах) с одним двигателем допускается применять одноканальные основные СЭС, если электропитание приемников электроэнергии, необходимых для безопасного полета и посадки, обеспечивается другими



источниками электроэнергии (в том числе аккумуляторными батареями) или безопасный полет и посадка обеспечиваются без использования электроэнергии.

Допускается электрическое соединение независимых подсистем при отказе одной из независимых.

Первичные и вторичные источники переменного и постоянного тока должны обеспечивать установившиеся нормальные рабочие характеристики, указанные в таблицах 1.1-1.3, рисунках 1.6-1.17 (ГОСТ Р 54073-2017).

Системы трехфазного переменного тока должны быть соединены в звезду с заземленной нейтралью.

Все бортовые потребители необходимо обеспечивать электрической энергией, соответствующим определенным параметрам. Этими параметрами, которые и определяют качество электроэнергии, являются: отклонения напряжения и частоты от стандартных (заданных) значений в любых режимах работы системы при изменении различных параметров работы (изменяющаяся нагрузка на систему электроснабжения, изменения частоты вращения вала, приводящего во вращение ротор), длительность переходных режимов, модуляцию напряжения и частоты, форма кривой напряжения переменного тока и величина пульсации напряжения постоянного тока.

Как известно, изменения вышеперечисленных параметров также достаточно серьезно зависят от подключения к источникам электрической энергии однофазных потребителей – в первую очередь из-за неравномерности. Для минимизации этих негативных моментов необходимо обеспечивать максимально возможную равномерность подключения к системам электроснабжения потребителей. Кроме того, так как ко всем системам воздушных судов предъявляются повышенные требования к надежности, то в системах электроснабжения должно включаться при проектировании как минимум два независимых энергоканала. При этом обязательно должно учитываться, что структура системы проектируется таким образом, чтобы отказ любого из каналов не влиял на работоспособность остальных источников электрической энергии.

Нормальные рабочие характеристики систем переменного тока номинальным напряжением 115/200 В переменной частоты 360...800 Гц

Наименование характеристики	Допустимое значение характеристики
<p>Установившаяся характеристика:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- среднее по трем фазам действующее значение напряжения в точке регулирования, В</li> <li>- фазное напряжение на входных выводах приемников, В</li> <li>- небаланс напряжений, В, не более</li> <li>- модуляция напряжения, В, не более</li> <li>- сдвиг фазных напряжений</li> <li>- коэффициент искажения для первичных источников питания при линейной симметричной нагрузке, не более</li> <li>- коэффициент искажения для первичных и вторичных источников питания при наличии нелинейной, несимметричной и импульсно-периодической нагрузки, не</li> <li>- коэффициент амплитуды</li> <li>- составляющая напряжения постоянного тока, В</li> <li>- частота, Гц</li> <li>- модуляция частоты, Гц</li> </ul>	<p>От 114 до 119</p> <p>От 104 до 122</p> <p>6,7</p> <p>2,5</p> <p>От 116° до 124°</p> <p>0,06</p> <p>0,12</p> <p>От 1,31 до 1,51</p> <p>От+0,1 до-0,1</p> <p>От 360 до 800</p> <p>4</p>
<p>Переходная характеристика:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- пик напряжения, В</li> <li>- частота, Гц</li> <li>- максимальная скорость изменения частоты, Гц/с</li> </ul> <p>Установившаяся характеристика:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- среднее по трем фазам действующее значения напряжения в точке регулирования, В</li> </ul>	<p>От-310 до +310</p> <p>От 360 до 800</p> <p>250</p> <p>От 114 до 119</p>

Нормальные рабочие характеристики систем переменного тока номинальным напряжением 115/200 В постоянной частоты 400 Гц

Наименование характеристики	Допустимое значение характеристики
<p>Установившаяся характеристика:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- среднее по трем фазам действующее значение напряжения в точке регулирования, В</li> <li>- фазное напряжение на входных выводах приемников, В</li> <li>- небаланс напряжений, В, не более</li> <li>- модуляция напряжения, В, не более</li> <li>- сдвиг фазных напряжений</li> <li>- коэффициент искажения для первичных источников питания при линейной симметричной нагрузке, не более</li> <li>- коэффициент искажения для первичных и вторичных источников питания при наличии нелинейной, несимметричной и импульсно-периодической нагрузки, не более</li> <li>- спектр искажения напряжения при линейной симметричной</li> <li>- коэффициент амплитуды</li> <li>- составляющая напряжения постоянного тока, В</li> <li>- частота, Гц</li> <li>- скорость изменения частоты из-за ухода, Гц/с, не более</li> <li>- модуляция частоты, Гц</li> <li>- спектр частотных составляющих модуляции частоты</li> </ul>	<p>От 114 до 118</p> <p>От 108 до 119</p> <p>3</p> <p>2,5</p> <p>От 116° до 124°</p> <p>0,05</p> <p>0,08</p> <p>См. рисунок 1.6</p> <p>От 1,31 до 1,51</p> <p>От +0,1 до -0,1</p> <p>От 380 до 420</p> <p>2,5</p> <p>4</p> <p>См. рисунок 1.7</p>
<p>Переходная характеристика:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- пик напряжения, В</li> <li>- напряжение, В</li> <li>- частота, Гц</li> </ul>	<p>От -234 до +234</p> <p>См. рисунок 1.8</p> <p>См. рисунок 1.9</p>

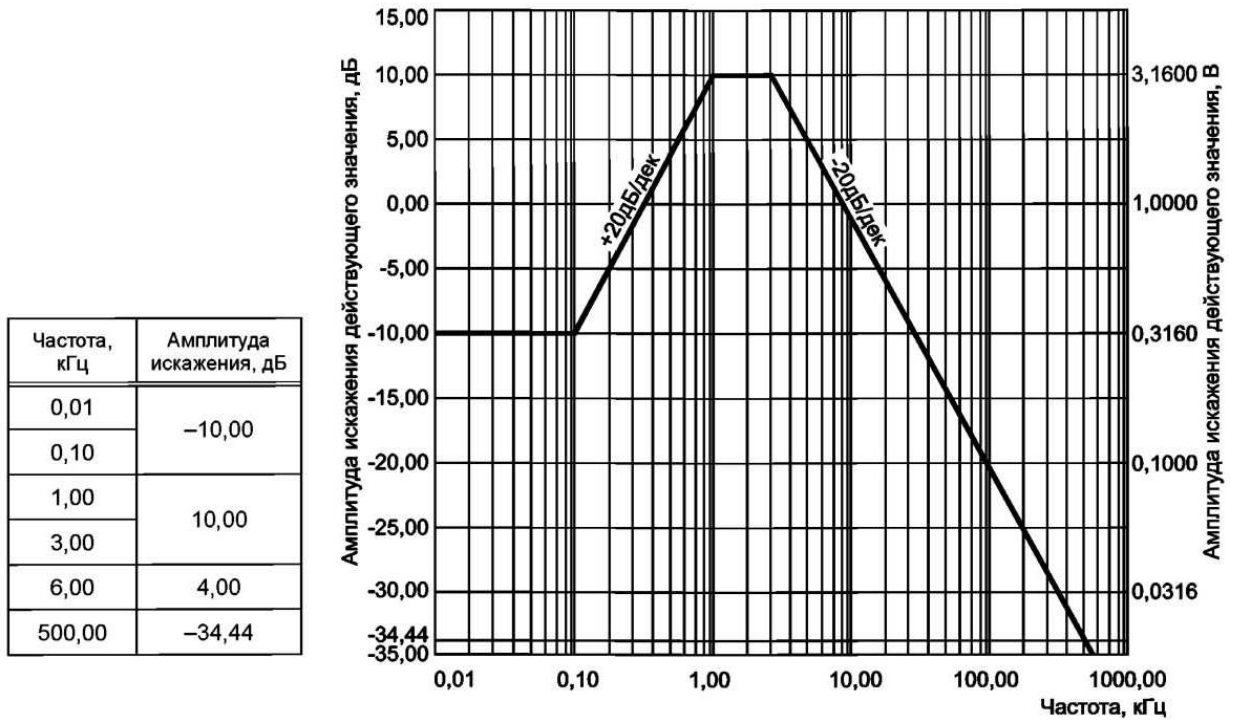


Рисунок 1.6 – Спектр максимального искажения напряжения переменного тока постоянной частоты 400 Гц при линейной симметричной нагрузке

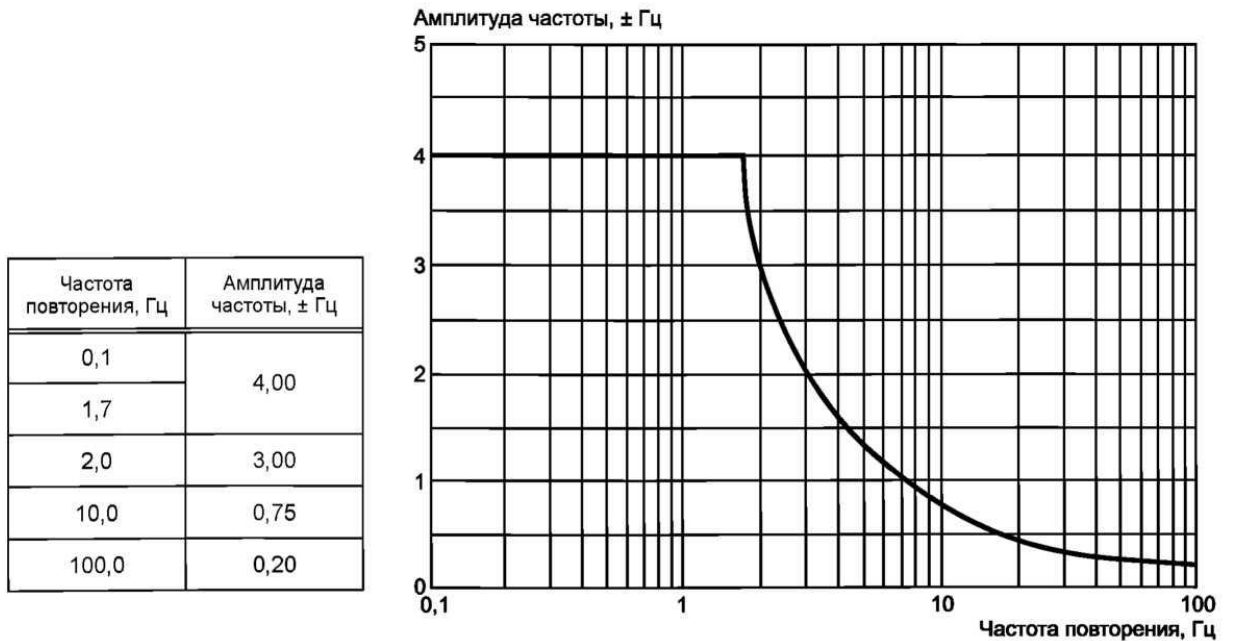
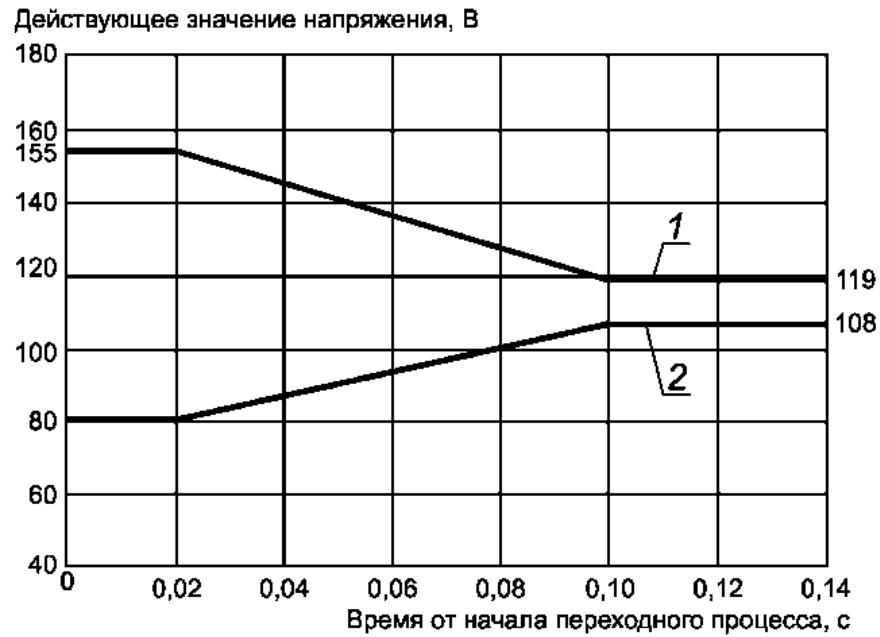
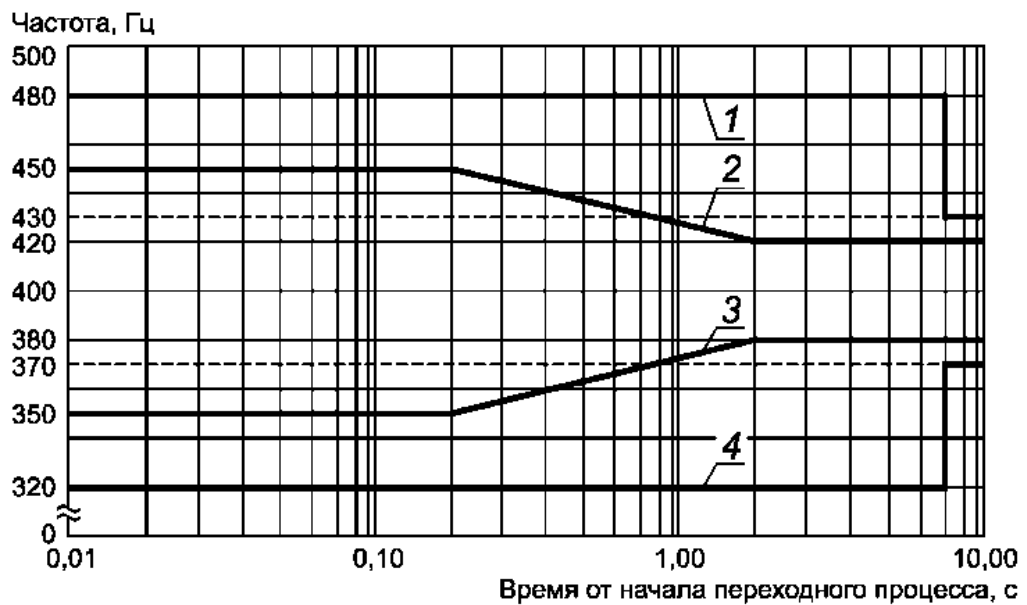


Рисунок 1.7 – Спектр частотных составляющих огибающей кривой модуляции частоты переменного тока постоянной частоты 400 Гц и переменной частоты 380...800 Гц



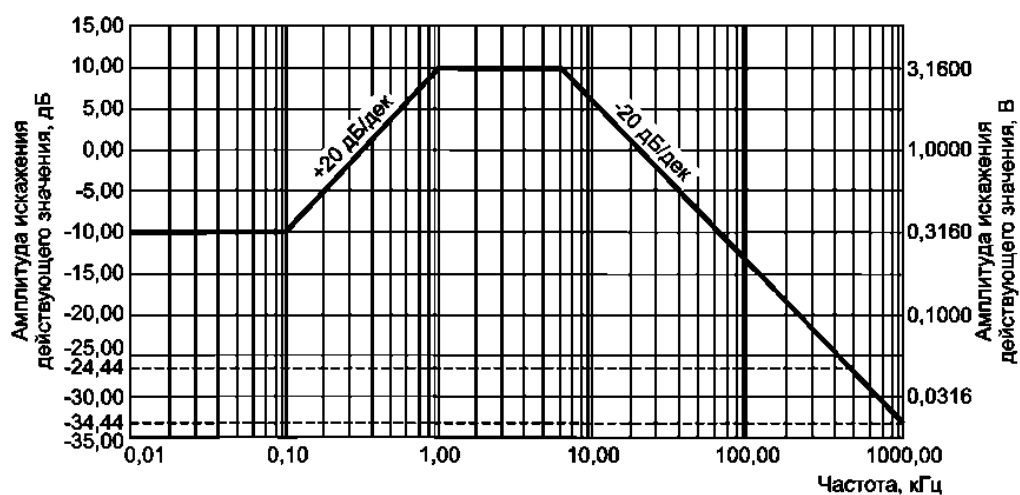
1 — верхний предел действующего значения напряжения;  
2 — нижний предел действующего значения напряжения

Рисунок 1.8 – Огибающие приведенных значений нормальных переходных напряжений переменного тока номинальным напряжением 115/200 В постоянной частоты 400 Гц



1 и 4 — верхний и нижний пределы ненормальной переходной частоты;  
2 и 3 — верхний и нижний пределы нормальной переходной частоты

Рисунок 1.9 – Огибающие переходных частот переменного тока постоянной частоты 400 Гц



Частота, кГц	Амплитуда искажения, дБ
0,01	-10,00
0,10	
1,00	10,00
3,00	
6,00	
500,00	-24,44
1000,00	-34,44

Рисунок 1.10 – Спектр максимального искажения напряжения переменного тока переменной частоты 380...800 Гц при линейной симметричной нагрузке.

Таблица 1.3

Нормальные рабочие характеристики постоянного тока систем 27 и 270 В

Наименование характеристики	Допустимое значение характеристики		
	СЭС 27 В	СЭС 27 В	СЭС 270
Установившаяся характеристика: - напряжение в точке регулирования, В - напряжение на входных выводах приемников, В - спектр максимальных пульсаций напряжения - амплитуда пульсаций, В, не более	От 27 до 29	От 25,4 до 29,4	От 260 до 280
	От 24,0 до 29,4 См. рисунок 1.11		От 250 до 280 См.рисунок 1.16
Переходная характеристика: - напряжение, В	См. рисунок 1.12	См. рисунок 1.13	См. рисунок

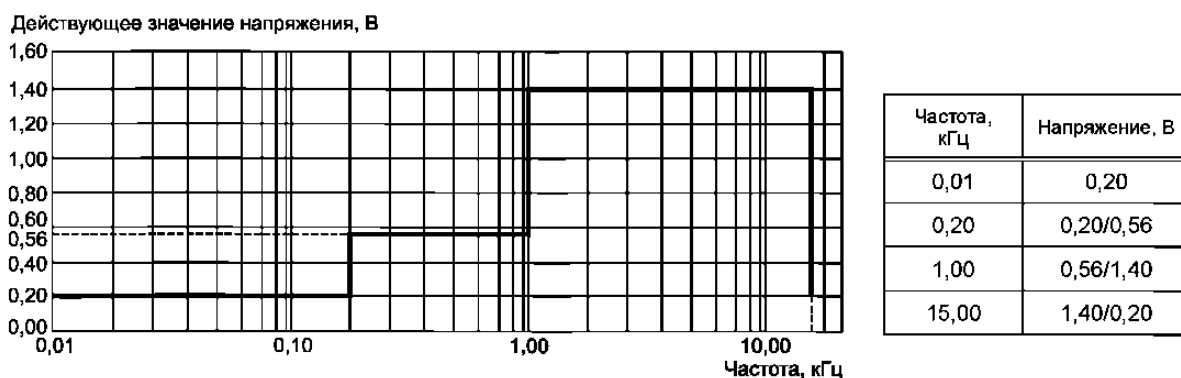


Рисунок 1.11 – Спектр максимальных пульсаций напряжения систем постоянного тока 27 В

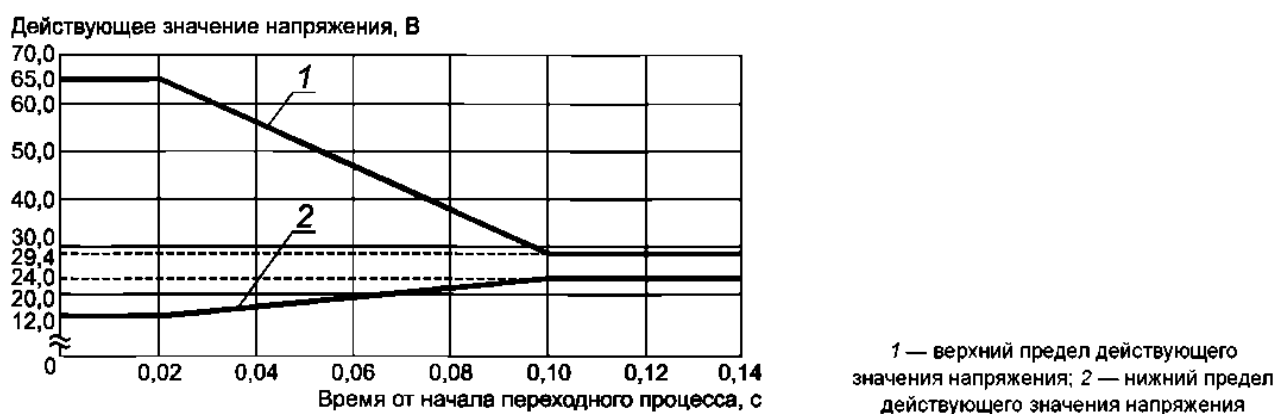


Рисунок 1.12 – Огибающие приведенных значений нормальных переходных напряжений первичных систем постоянного тока 27 В

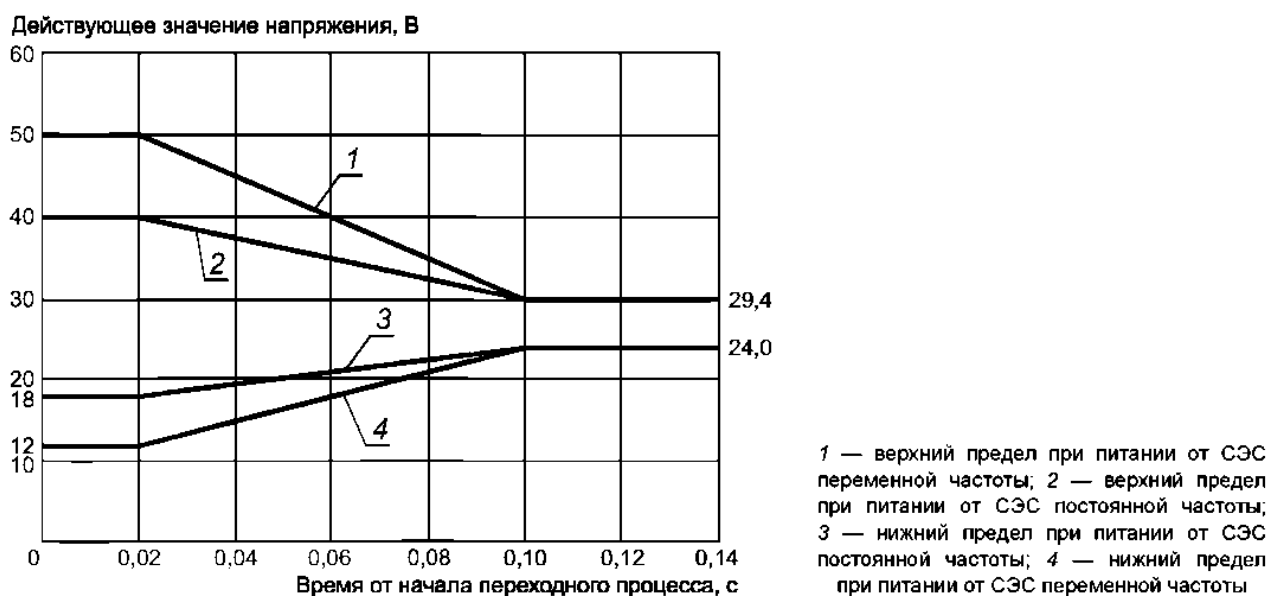


Рисунок 1.13 – Огибающие приведенных значений нормальных переходных напряжений вторичных систем постоянного тока 27 В

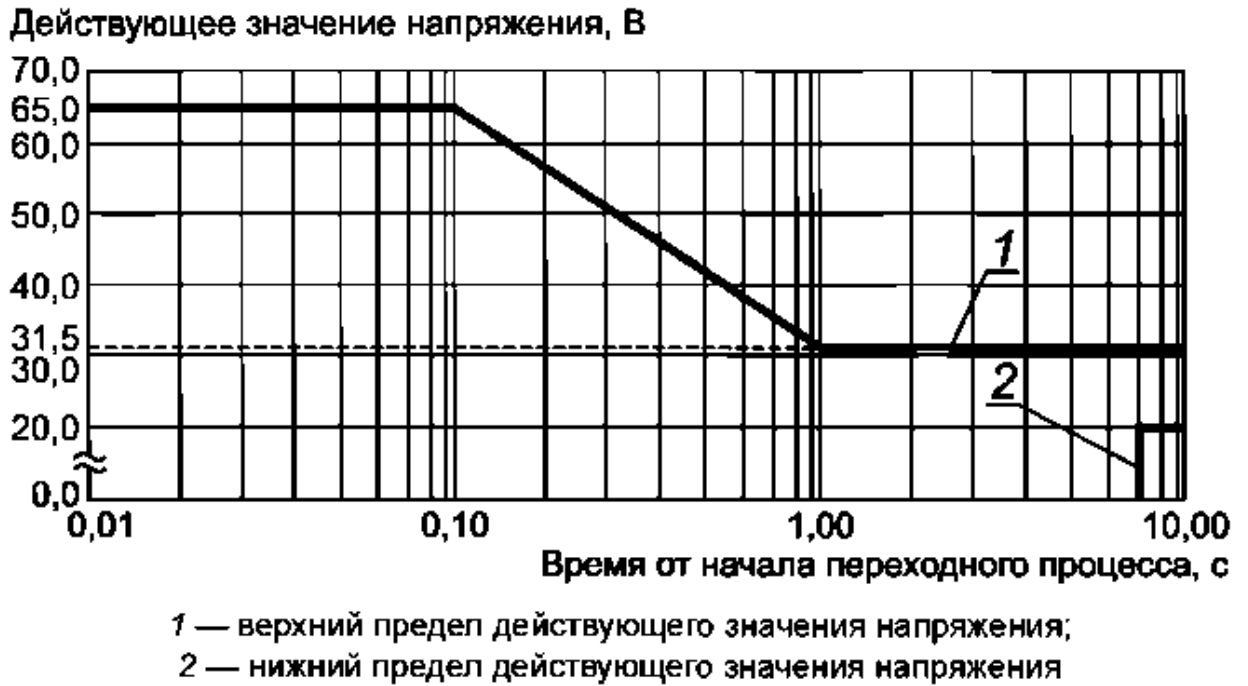
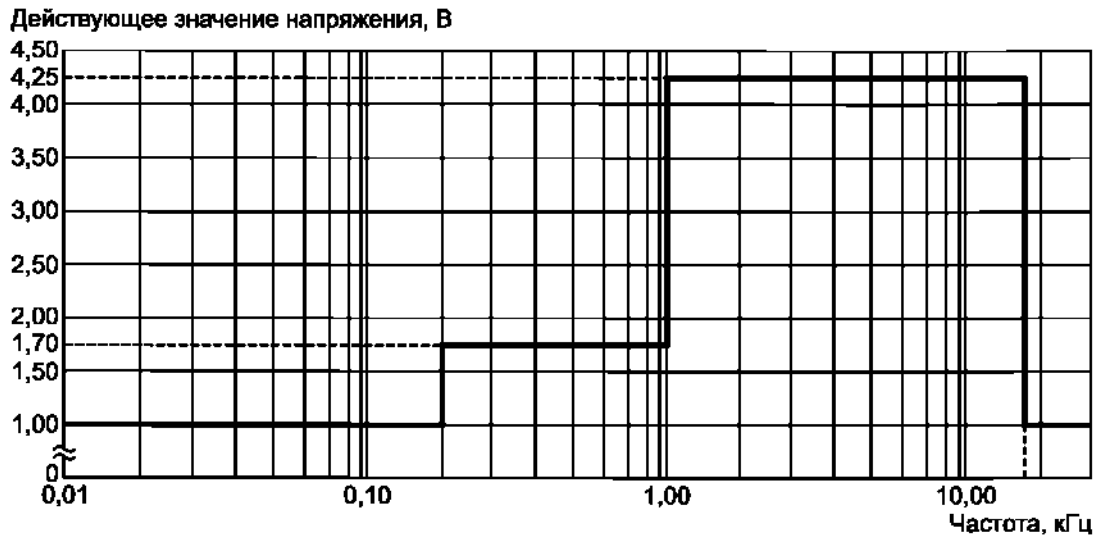


Рисунок 1.14 – Пределы приведенных значений ненормальных повышенных и пониженных напряжений первичных систем постоянного тока 27 В



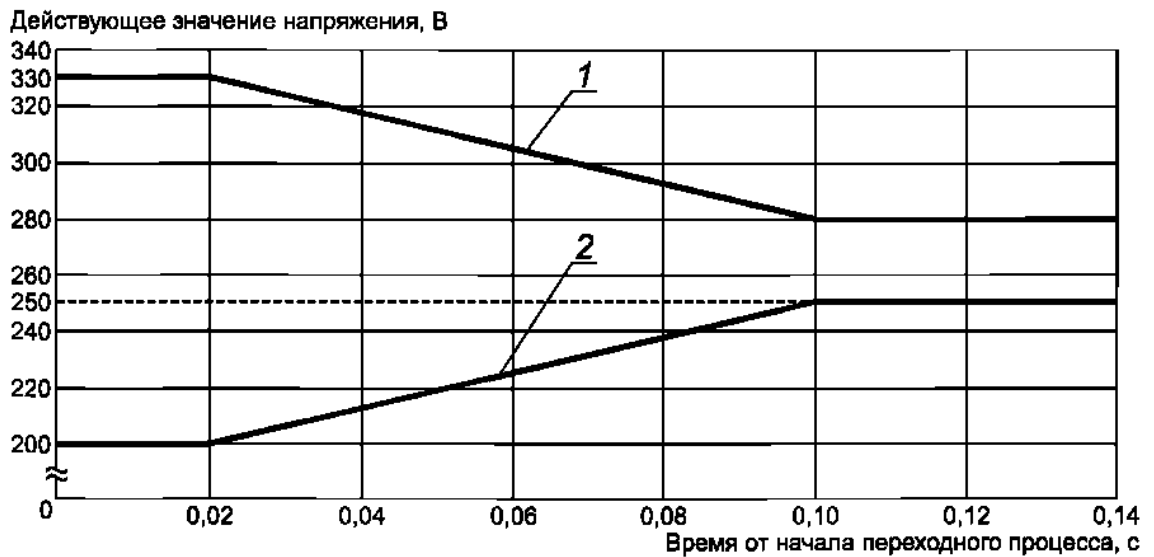
Рисунок 1.15 – Пределы приведенных значений ненормальных повышенных и пониженных напряжений вторичных систем постоянного тока 27 В





Частота, кГц	Напряжение, В
0,01	1,00
0,20	1,00/1,70
1,00	1,70/4,25
15,00	4,25/1,00
30,00	1,00

Рисунок 1.16 – Спектр максимальных пульсаций напряжений систем постоянного тока 270 В



1 — верхний предел действующего значения напряжения; 2 — нижний предел действующего значения напряжения

Рисунок 1.17 – Огибающие приведенных значений нормальных переходных напряжений систем постоянного тока 270 В

Поэтому представляют интерес анализ количества фаз и его влияния на качество выходного напряжения.

Таким образом, СЭС ВС должны соответствовать следующим основным требованиям:

1. Высокая надежность и непрерывность (бесперебойность) электроснабжения.

2. Высокое качество параметров электрической энергии, которое характеризуется стабильностью показателей, длительностью и характером переходных процессов.

3. Минимальная масса и габариты при обеспечении максимальной мощности. Во многих случаях критерии массы считаются приоритетными и, как правило, оцениваются показателем удельной массы.

4. Высокие энергетические показатели, которые, как правило, оцениваются значением КПД.

5. Максимальная автоматизация (необслуживаемые или с минимальным обслуживанием) и длительный срок службы. Причем, структура СЭС должна быть ремонтпригодной и предусматривать возможность дальнейшего развития и модернизации.

6. Низкая стоимость, то есть затраты на изготовление и эксплуатацию системы в течение заданного времени работы при заданной надежности должны быть минимальными. Требования по стоимости обычно находятся в противоречии с остальными требованиями к СЭС, и решение этой проблемы при проектировании перспективных систем электроснабжения требует компромиссных решений [50, 68, 56, 73, 97, 104, 111, 112, 113, 114 и др.].

Для анализа бортовых СЭС в качестве основных типов современных ВС рассмотрим самолеты МиГ-29 и Су-27 и их модификации.

СЭС самолета МИГ-29 комбинированная, предназначена для обеспечения питания бортовых потребителей электроэнергией переменного трехфазного тока  $U = 36, 208/115$  В и  $f = 400$  Гц и постоянного тока  $U = 28$  В (рисунок 1.18).

Система электроснабжения включает в себя два канала. Кроме того, оба канала включают в себя как основные, так и аварийные источники электрической энергии.

Источниками питания бортовой сети постоянным током напряжением 28 В являются:

- стартер-генератор ГСР-СТ-12/40 (таблица 1.4);
- две аккумуляторные батареи (АБ) 15СЦС-45Б.

Стартер-генератор является основным источником, работает только в генераторном режиме, стартерный режим не используется. АБ - это резервный источник, который служит для питания жизненно-важных потребителей постоянного тока.

Таблица 1.4

Технические характеристики ГСР-СТ-12/40

Номинальная мощность, кВА	12
Напряжение линейное номинальное, В	28,5
Ток номинальный, А	400
Частота вращения номинальная, об/мин	4000...9000
Размеры щёток в состоянии поставки, мм	8x20x31
Критическая высота щеток, мм:	17
Ток возбуждения, А	1,9...15
Температура окружающей среды $t^{\circ}$ , С	-60...+60
Масса изделия, кг, не более	32

Источниками питания бортовой сети переменным током являются:

- генератор ГТ-30НЖЧ12 (основной источник, который служит для питания потребителей переменным током стабилизированного напряжения 115/208 В и частотой 400 Гц (таблица 1.5));

- силовой трехфазный понижающий трансформатор Т-1,5/0,2 (служит в качестве основного источника питания потребителей переменным током  $U = 36$  В и  $f = 400$  Гц);

- электромашинный преобразователь ПТО-1000/1500 (резервный источник, который служит для питания жизненно-важных потребителей переменным трехфазным током  $U = 36$  В и переменным однофазным током  $U = 115$  В и  $f = 400$  Гц).

В нормальном режиме работы бортовая сеть питается от стартер-генератора постоянного тока напряжением 28 В. В случае его отказа предусмотрено аварийное питание бортовой сети от АБ.

Таблица 1.5

## Технические характеристики ГТ30НЖЧ12-2С

Номинальная мощность, кВА	30
Напряжение линейное номинальное, В	208
Ток номинальный, А	83,3
Частота вращения номинальная, об/мин	12000±120
Частота номинальная, Гц	400±4
Коэффициент мощности	0,8 (отстающий)
Расход топлива на охлаждение генератора при давлении на входе в вал генератора 1270 кПа (13 кгс/см <sup>2</sup> ) и температуре масла +120°С, л/мин	11,5±0,5
Режим работы генератора	продолжительный
Масса изделия, кг, не более	14
Габариты, мм	279хØ236

При этом происходит отключение таких наиболее мощных потребителей, как автоматический радиокompас АРК-19, бортовая радиолокационная станция

Н0019, самолетный радиолокационный запросчик СРЗ, станция предупреждения об облучении Л006 ЛМ, радиолокационная система ближней навигации А323.

В нормальном режиме работы потребители напряжения 115 В подключаются к генератору переменного тока, а потребители напряжения 36 В подключаются ко вторичной обмотке трансформатора. Преобразователь работает как резервный источник. В случае отказа генератора переменного тока или трансформатора Тр-1,5/0,2 жизненно-важные потребители по напряжению 115 В и 36 В (бортовые системы регистрации, бортовые цифровые вычислительные машины БЦВМ, устройства ввода-вывода, система единой индикации СЕИ, бортовая радиолокационная станция Н0019, квантовая оптико-локационная станция, самолетный радиоответчик, самолетный радиозапросчик и авиационная радиолиния) переключаются на питание от преобразователя [101, 32, 9, 68, 56, 73, 104].

Предназначение СЭС самолета Су-27 (рисунок 1.19) – это обеспечение электрической энергией бортовых приемников. Она вырабатывает электроэнергию постоянного тока с напряжением 28 В и трехфазного переменного напряжением 208/115 В. Система электроснабжения включает в себя два канала – правый и левый. Кроме того, каждый идентичен другому и включает как основные (генераторы), так и резервные (аккумуляторные батареи) источники электрической энергии.

СЭС самолета Су-27 представляет собой работающие совместно первичную систему электроснабжения переменным током и вторичную систему электроснабжения постоянным током, а также систему, которая управляет распределением между бортовым оборудованием электроэнергии.

Как основной источник питания и в правом и в левом канале используются генераторы ГТ30НЖЧ12.

Главные положительные качества генераторов этой модели – это бесконтактность, меньший вес и размеры, а также достаточно высокая надежность по сравнению с генераторами, установленными на предыдущих поколениях ВС.

Что касается недостатков, то для нормальной работы и генерирования электроэнергии надлежащего качества генераторы ГТ30НЖЧ12 очень критичны к стабильности частоты вращения ротора. Для выполнения этого требования перед генератором установлены электромuftа и ПГЛ-40 (гидропривод лопаточный), которые в комплексе с генератором составляют блок ГП-21.

Согласно статистическим данным, генератор выходит из строя достаточно редко (порядка 7-8%), а вот у блока ГП-21 с надежностью значительно хуже (44-47%). А система, обеспечивающая постоянную скорость вращения ротора генератора, увеличивает вес в 2,5 раза и габаритные размеры в 1,4 раза. [56, 73, 104, 101].

Так как в системе происходит генерирование электроэнергии только переменного тока, для того, чтобы получить электроэнергию постоянного тока в системе есть три устройства для выпрямления – ВУ-6Б. Это силовые трехфазные трансформаторы совместно с диодными выпрямительными мостами. Как резервные источники питания в системе работают два преобразователя ПТС-800БМ совместно с аккумуляторными батареями 20НКБН-25.

Резервные источники электроэнергии обеспечивают:

- питание системы дистанционного управления, триммеры;
- питание командно-планового прибора, планового навигационного прибора, ДА-200;
- питание системы ограничительных сигналов, ИК-ВК, СРО, СО-69;
- запуск и управление двигателями; аварийный пуск-сброс подвесок;
- обогрев приемника воздушного давления (основного и резервного);
- питание защитных устройств и автоматического регулятора воздухозаборника;
- охлаждение двигателя, системы предупреждения перегрева;
- антиобледенение фонаря; управление гидросистемой, тормозным щитком, флаперонами, передним колесом;
- аварийный слив топлива;

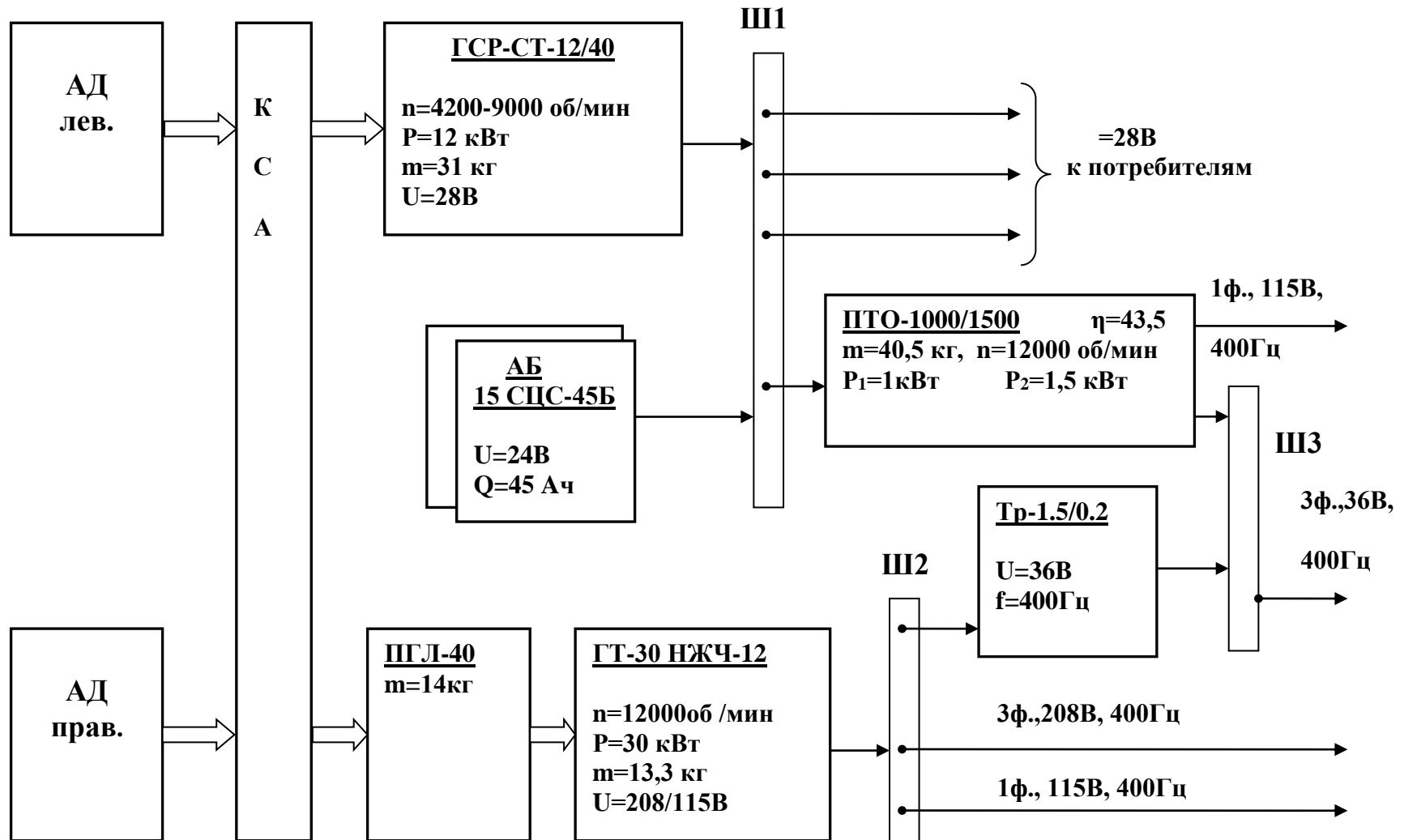


Рисунок 1.18 - Структурная схема СЭС самолета МИГ-29

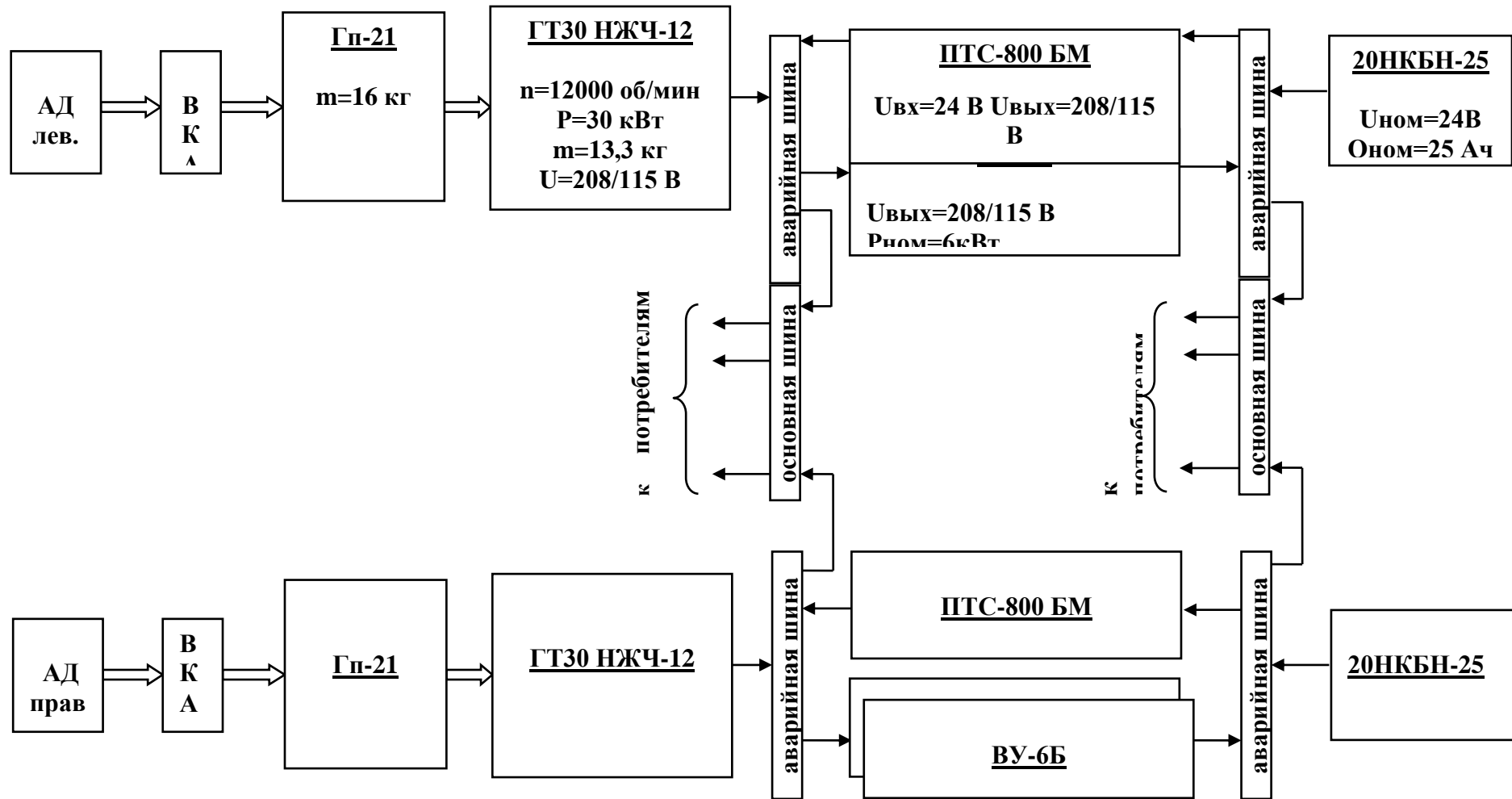


Рисунок 1.19 - Структурная схема СЭС самолета СУ-27.



- питание расходомера, САПС;
- питание системы пожаротушения;
- питание светотехнического оборудования;
- системы ограничения хода ручки; ЭКРАН, РИ, САС-4 (системы аварийных сигналов), ТЕСТЕР; КДЛІА (типовой комплекс связи); РВ-21; АРК-22; МРП.
- питание светотехнического оборудования;
- питание сигнализации подвесок;
- питание фонаря;
- питание системы кондиционирования;
- питание топливной системы и указателя положения ИП-52.

В случае выхода из строя одного из генераторов, то с помощью коммутационной аппаратуры происходит переключение питания бортового оборудования на рабочий генератор. Однако в этом случае полет завершается, а пилоты должны найти подходящий аэродром для выполнения посадки.

Если выходят из строя сразу оба генератора, то происходит разделение и электроэнергия постоянного тока поступает от аккумуляторной батареи, а переменного – от преобразователя ПТС-800БМ.

При отказе выпрямительного устройства вся нагрузка по постоянному току распределяется между оставшимися двумя, на безопасность выполнения полета это влияния не оказывает.

Когда происходит выход из строя двух выпрямительных устройств происходит отключение части бортового оборудования и, соответственно оставшийся выпрямитель обеспечивает постоянным током оставшееся оборудование. Но в этом случае полет завершается, а пилоты должны найти подходящий аэродром для выполнения посадки.

В случае неисправности сразу всех трех выпрямительных устройств происходит автоматическое переключение питания от резервного источника постоянного тока – аккумуляторную батарею, которая может обеспечивать

оставшиеся подключенными потребители в течение 10-15 минут, ограничивая время пилотам для принятия решения.

Также очень важно, что при выходе из строя двух или трех выпрямительных устройств происходит автоматическое отключение системы единой индикации «Нарцисс», бортовой радиолокационной станции (РЛПК - 27), запросчика системы государственного опознавания (СРЗ - 1), квантовой оптико-локационной станции (КОЛС), нацеленной системы целеуказания (НСЦ), станции активных помех (изделие Л - 203), станции предупреждения об облучении (СПО - 15), радиотехнической системы ближней навигации (РСБН).

В случае выхода из строя двух генераторов, то, кроме уже перечисленных систем отключаются: система воздушных сигналов (СВС), бортовая цифровая вычислительная машина (БЦВМ), автомат постановки пассивных помех (АПП-50), обогрев инерциальной системы курсовертикали (ИК-ВК), режим «форсаж», обогрев ПВД и др.

Поиск подходящего аэродрома и выполнение посадки на него становится для пилотов задачей первостепенной важности, поскольку время работы АБ ограничено 10-15 минутами. Всё это позволяет говорить о том, что при разработке систем электроснабжения очень важное значение имеет то, что необходимо обращать внимание на соблюдение достаточно высоких и требуемых параметров к вырабатываемой электрической энергии и высокой надежности её источников. [112, 32, 9, 69, 57, 74, 114].

### **1.3 Анализ существующих источников электроэнергии**

В современном мире производители и разработчики электромашинной продукции привязаны к стандартной (радиальной) конструкции генераторов и электродвигателей. На сегодняшний день это имеет смысл, когда эти устройства большую часть своей работы проводят в номинальных режимах. Подобные условия работы, как правило, составляют не более 10% от общего количества требуемых электромашин. Остальные требуют от электромашин, в частности от

электроприводов, более гибкого отношения к ненормальным (частичным) нагрузкам, в том числе за счет регулирования частоты вращения. Они должны иметь во всем диапазоне регулирования частоты вращения стабильно высокий КПД. При поддержании постоянной частоты вращения привод должен потреблять энергию, пропорциональную моменту сопротивления [4].

Что касается систем электроснабжения ВС, то они во многом определяют облик и достижимые ВС тактико-технические характеристики. На большинстве современных отечественных самолетов питание основной бортовой сети осуществляется от одного или нескольких генераторов постоянного или переменного тока, приводимых во вращение авиационными двигателями с изменяющейся скоростью вращения.

При увеличении высоты полёта теплоотдача нагретых частей электрических машин уменьшается. Повышение температуры отрицательно сказывается на работе высотных щеток, в состав которых входят олово и свинец. При температуре свыше 200°C легкоплавкие присадки выплавляются, что приводит к резкому износу щёток.

Механические, вибрационные и ударные перегрузки приводят к разрушению мест пайки проводов, к нарушению нормальной работы щёточно-коллекторных узлов и т. д. [54, 56, 81, 96].

Достижения в области полупроводниковых элементов, использование современных более совершенных материалов и элементов дали возможность устранить многие из вышеуказанных проблемных направлений в разработке и изготовлении бесконтактных источников электрической энергии постоянного тока с вращающимися выпрямителями. Такие генераторы в настоящее время серийно выпускаются отечественной промышленностью. Но и у них существует ряд существенных недостатков, перечисленных ранее, кроме того:

- параметры вырабатываемой электрической энергии находятся практически на пороговом значении от требуемого, это связано с высоким коэффициентом пульсации напряжения;

- при изготовлении современных бесконтактных генераторов постоянного тока есть определенные сложности, это в первую очередь связано с тем, что листы магнитопроводов статоров и роторов выполняются методом штамповки, а обмоточные работы выполняются внутри статоров цилиндрической формы.

Для получения постоянного тока с необходимым и приемлемым уровнем пульсаций, а также с возможностью регулирования напряжения необходимо увеличивать количество фаз в системе переменного тока. В современных системах электроснабжения, в том числе в системах электроснабжения летательных аппаратов, увеличение количества фаз позволяет получить достаточный эффект, позволяющий уменьшить искажающее воздействие на вырабатываемое напряжение. Однако, как известно, в подобных случаях существуют ограничения, касающиеся части выпрямительной нагрузки – обычно эти ограничения составляют от 15% до 30% от номинальной. И, соответственно, если есть необходимость увеличить долю нагрузки в системах электроснабжения постоянного тока следует повышать мощность устройств, вырабатывающих электрическую энергию. А это приводит к тому, что, если требования к параметрам переменного тока не изменять, а необходимо увеличивать мощность подключаемых потребителей постоянного тока, приходится значительно увеличивать мощность устройств, вырабатывающих электрическую энергию. И, в свою очередь, это приводит к изменению технических параметров, стоимости, а также и массогабаритных показателей СЭС ЛА в целом.

Электрические машины классической (радиальной) конструкции, несмотря на все их достоинства имеют ряд недостатков, которые при их разработке, создании и приобретении особого значения на тот момент не имели. Таковыми являются сложность конструкции и сложная технология изготовления, высокие массогабаритные показатели и стоимость, большое количество отходов при штамповке листов магнитопровода и т.д.

Достойной заменой радиальных электрических машин являются электрические машины аксиальной конструкции. Преимущества аксиальных

конструкций в сравнении с традиционными (радиальными) электрическими машинами отражены в таблице 1.6.

Таблица 1.6

## Сравнительная характеристика радиальных и аксиальных ЭМ

№ п/п	Недостатки контактных радиальных ЭМ	Преимущества бесконтактных аксиальных ЭМ
1	Невысокий КПД из-за потерь на щеточно-коллекторном узле.	Выше КПД из-за отсутствия потерь на ЩКУ.
2	При увеличении высоты полёта теплоотдача нагретых частей электрических машин уменьшается. Повышение температуры отрицательно сказывается на работе высотных щеток, в состав которых входят олово и свинец, а именно: при температуре свыше 200°C легкоплавкие присадки выплавляются, что приводит к резкому износу щёток.	Благоприятные условия теплоотдачи, охлаждения и вентиляции. Повышенная надежность из-за отсутствия ЩКУ.
3	Механические, вибрационные и ударные перегрузки приводят к разрушению мест пайки проводов, к нарушению нормальной работы щёточно-коллекторных узлов и т. д.	Повышенная надежность из-за отсутствия ЩКУ.
4	Большие эксплуатационные расходы, связанные с необходимостью систематического контроля состояния щеток и коллектора, а также ухода за ними.	Сравнительная простота эксплуатации и ремонта.
5	Сложность изготовления и эксплуатации из-за наличия закрытой зубцовой зоны.	Открытая зубцовая зона позволяет упростить обмоточные работы
6	Большое количество отходов стали при штамповке статоров и роторов – увеличение стоимости оборудования.	Практически безотходное использование магнитных материалов (экономия 20-25% электротехнической стали.

Лучшие массогабаритные и энергетические показатели, более жесткая конструкция, улучшение условий теплоотдачи, а также охлаждения и вентиляции, открытая зубцовая зона позволяет существенно упростить обмоточные работы, существенное снижение отходов магнитных материалов при производстве, более удобное соединение узлов и механизмов, некоторое упрощение в использовании и выполнении ремонтных работ [54, 56, 81, 90, 95] позволяют говорить о том, что

разработка и исследование аксиальных электрических машин и замена ими радиальных электрических машин является весьма актуальным и оправданным.

#### **1.4 Выводы по первой главе и задачи исследования**

Для достижения основной цели диссертации в первой главе решена первая задача исследования: проведен анализ современного состояния систем электроснабжения ВС и их основных эксплуатационно-технических характеристик.

Как следует из проведенного анализа, бортовые системы электроснабжения (традиционной радиальной конструкции) в существующем виде во многом исчерпали возможности дальнейшего совершенствования в части увеличения мощности и повышения качества генерируемой электроэнергии. Обеспечение выполнения непрерывно возрастающих с развитием авиационной техники требований к системам электроснабжения и к электроэнергетическим комплексам ВС в целом связано с поиском кардинально новых подходов к построению их силовых структур. Определенные предпосылки для решения стоящих проблем уже созданы в предыдущие годы в нашей стране рядом ведущих организаций и специалистов в области авиационной электроэнергетики.

Таким образом, учитывая современное состояние и тенденции развития бортовой электроэнергетики, можно говорить о том, что одним из наиболее важных направлений совершенствования СЭС ВС является разработка новых систем электроснабжения на базе новых источников электроэнергии.

Решение вопросов совершенствования СЭС находится в неразрывной связи с решением вопросов улучшения массогабаритных и энергетических показателей, получения высоких показателей надежности, автономности и живучести СЭС.

Одним из направлений, позволяющим улучшить эксплуатационно-технические характеристики бортовых СЭС, является разработка источников электрической энергии с аксиальной конструкцией магнитопровода [50, 75].

Поэтому совершенствование существующих конструкций систем электроснабжения воздушных судов является актуальной задачей, а одним из

перспективных путей – это разработка и исследование аксиальных электрических машин.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать следующие выводы:

1. Основными недостатками эксплуатируемых бортовых источников электроэнергии являются:

- невысокий КПД (50-70%) из-за потерь на щеточно-коллекторном узле;
- выполнение полета на большой высоте отрицательно сказывается на работе высотных щеток из-за повышения их температуры (выплавление присадок);
- механические, вибрационные и ударные перегрузки на борту ВС приводят к разрушению мест пайки проводов, к нарушению нормальной работы щеточно-коллекторных узлов и т. д.;
- большие эксплуатационные расходы, связанные с необходимостью систематического контроля состояния щеток и коллектора, а также ухода за ними;
- большое количество отходов стали при штамповке статоров и роторов увеличивает стоимость оборудования;
- параметры вырабатываемой электрической энергии находятся практически на пороговом значении от требуемого, это связано с высоким коэффициентом пульсации напряжения;
- при изготовлении современных бесконтактных генераторов постоянного тока есть определенные сложности, это в первую очередь связано с тем, что листы магнитопроводов статоров и роторов выполняются методом штамповки, а обмоточные работы выполняются внутри статоров цилиндрической формы;
- относительно сложная система управления, что также оказывает влияние на показатели надежности преобразователя.

2. Одним из возможных путей решения вышеперечисленных проблем является замена источников электроэнергии радиальной конструкции на источники электроэнергии аксиальной конструкции.

Устранение недостатков существующих источников энергии связано с повышением эффективности систем электроснабжения воздушных судов за счет

разработки новых электротехнических комплексов постоянного тока на основе генератора аксиальной конструкции.



## **ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕРСПЕКТИВНОЙ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ**

### **2.1 Обоснование перспективной конструкции электротехнического комплекса для воздушных судов**

Для всех преобразователей электрической энергии в механическую и наоборот механической в электрическую существует показатель, как правило чаще всего используемый – это удельная мощность, которая концентрируется в воздушном зазоре преобразователей.

Одним из важнейших критериев, который определяет уровень технического совершенства электромеханических преобразователей, является вес устройства, отнесенный на единицу вырабатываемой мощности. Соответственно, чем выше этот показатель, то с увеличением мощности уменьшается общая масса преобразователей, и, поэтому, снижается итоговая стоимость. При разработке вышеуказанных преобразователей существует такой немаловажный фактор, как уменьшение расхода материалов, необходимых для создания электромеханических преобразователей. Одним из основных способов достижения этого является изменение магнитной индукции в сторону её увеличения в воздушном зазоре, совместно с ним увеличивают и линейную нагрузку – все это оказывает определенное влияние на размеры электротехнических комплексов.

Также при определении значений линейной нагрузки имеет значение конструкция электротехнических комплексов. Увеличение нагрузки приводит к тому, что необходимо увеличивать количество витков в обмотках, что достаточно ограничено конструкцией современных электротехнических комплексов. Это ограничение приводит к необходимости увеличения плотности тока, которое, в свою очередь способствует увеличению потерь, магнито – движущей силы

реакции якоря, сечения проводов и нагрева самого источника электрической энергии.

При значительных величинах линейной нагрузки существуют такие проблемы, как отсутствие возможности генерировать электрическую энергию требуемой мощности и проблематичность размещения обмотки якоря на заданных размерах (диаметре). Проводимые научные исследования в области электротехники свидетельствуют о том, разработка генераторов, направленная на минимизацию их массы упирается в определенное значение линейной нагрузки. А попытки увеличения нагрузки до требуемых значений невозможно по причине существенных перегревов.

Повышение индукции в воздушном зазоре генераторов, создаваемых для воздушных судов приводит к тому, что увеличиваются потери в стали, так как частоты работы этих устройств несколько выше, в свою очередь это способствует их перегреву. А если выполнять обмотку возбуждения больших размеров, то это повлечет за собой увеличение диаметра ротора, что, в свою очередь также оказывает негативный эффект.

В современных «классических» генераторах увеличение отношения активной длины обмотки генератора к диаметру ротора позволяет повысить массо-энергетические показатели генераторов. Это объясняется тем, что увеличение до некоторого значения отношения активной длины обмотки генератора к диаметру ротора приводит к определенному улучшению массоэнергетических параметров источников электрической энергии за счет уменьшения общего объема неактивных частей обмотки. Также это приводит к снижению потерь и уменьшению общей массы устройства. Но это имеет и негативный эффект – обмотки начинают нагреваться значительно сильнее из-за снижения теплоотдачи, соответственно необходимо модернизировать систему охлаждения генераторов. А при уменьшении диаметра якоря представляется проблематично размещать значительное количество пазов на нем, что затрудняет укладку соответствующих обмоток. Параметры вырабатываемой вышеуказанными источниками электроэнергии соответствует значениям, указанным в государственном

стандарте, однако, коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения меньше указанного в стандарте всего на 5,4%. Уменьшить пульсации возможно за счет увеличения числа фаз, что отражено на рисунках 2.1-2.3 и таблице 2.1.

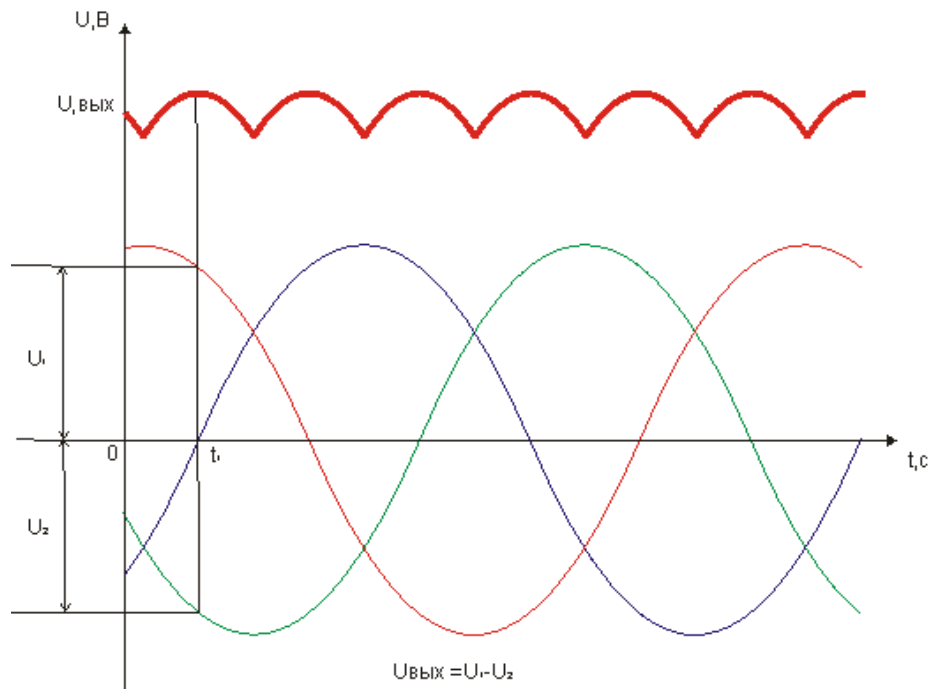


Рисунок 2.1 – Зависимость напряжения трехфазного выпрямителя от времени

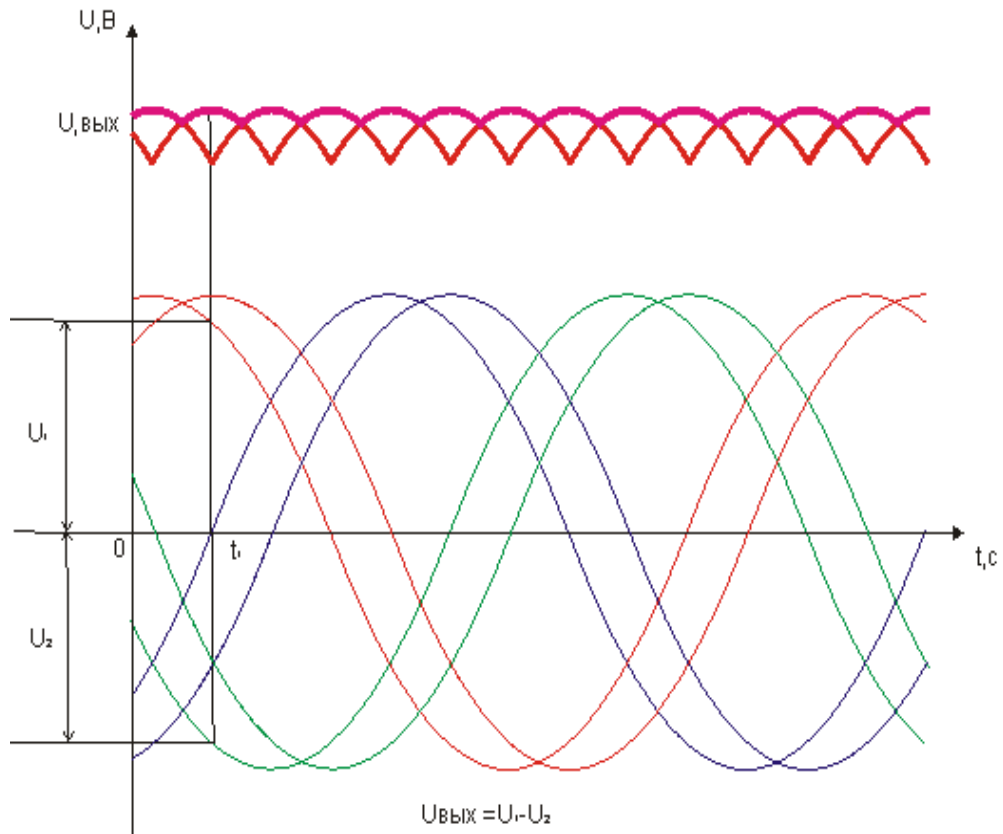


Рисунок 2.2 – Зависимость напряжения шестифазного выпрямителя от времени

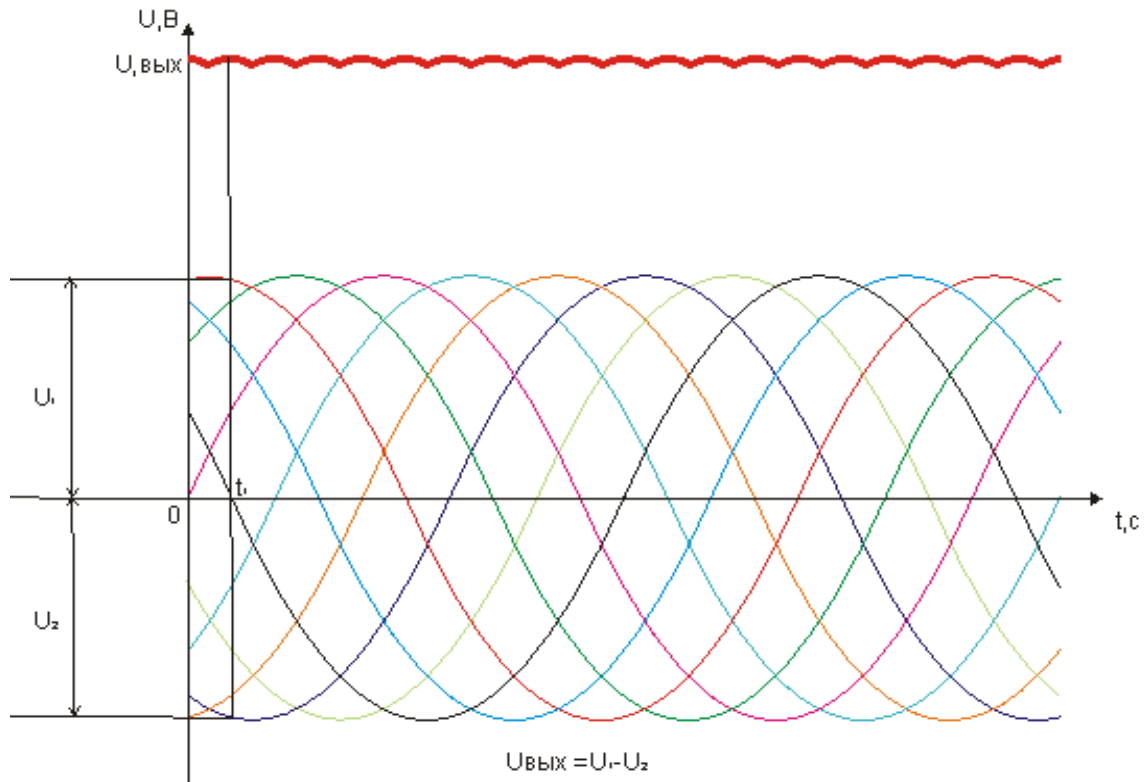


Рисунок 2.3 – Зависимость напряжения девятифазного выпрямителя от времени

Таблица 2.1. Таблица сравнения выпрямителей

Тип выпрямителя	$K_B$	$K_{п, \%}$
ГОСТ Р 54073-2017		7,4
Однофазный однополупериодный	0,45	157
Однофазный мостовой	0,9	78,5
Двухфазный с нулевой точкой	0,9	78,5
Трехфазный с нулевой точкой	1,17	30
Трехфазный мостовой	2,34	7,0
Шестифазный мостовой	2,42	1,75
Девятифазный мостовой	2,57	0,75

$K_B$  – коэффициент выпрямления,  $K_{п}$  – коэффициент пульсации

Кроме того, при изготовлении современных бесконтактных генераторов постоянного тока есть определенные сложности, это в первую очередь связано с тем, что листы магнитопроводов статоров и роторов выполняются методом штамповки, а обмоточные работы выполняются внутри статоров цилиндрической

формы. Большое количество отходов стали при штамповке статоров и роторов увеличивает стоимость оборудования. [20, 49 и др.].

У аксиальных электрических машин есть несколько преимуществ по сравнению с существующими. В первую очередь, это процесс производства магнитопровода, который является более простым и позволяет значительно снизить количество отходов при изготовлении, что также еще позволяет снизить траты на материалы, используемые при этом. Это возможно за счет внесения изменений в конструкцию электрических машин, а также в сам процесс производства их магнитных систем.

Современные способы, используемые для изготовления электрических машин классической конструкции основаны на процедурах штамповки из листов заранее подготовленной электротехнической стали заготовок, из которых впоследствии сформируют пакеты роторов (якорей) и статоров будущих электрических машин. Это производство имеет свои недостатки: каждая заготовка для будущего пакета роторов (якорей) и статоров выштамповывается отдельно, что усложняет процедуру их изготовления; возрастает стоимость изготовления электромашин по причине того, что в процессе штамповки листов необходимого размера формируется большое количество отходов, которые можно будет использовать только после повторной переплавки и формирования из них новых листов стали. Эти отходы могут составлять до 50%, а, в некоторых случаях и выше...

Используемая до сих пор технология, по которой выполняется изготовление магнитопроводов для торцевых электрических машин, заключается в следующем. Из материалов, предназначенных для производства магнитопроводов нарезают полосы необходимого размера (ширины). Затем выполнялась намотка этих полос на стальные кольца. Намотка проводится до достижения необходимого диаметра магнитопровода, после чего напрессовывается еще одно кольцо с внешней стороны. Далее с помощью специального оборудования в этих заготовках вырезают пазы необходимых размеров.

Основными минусами подобной технологии можно назвать в первую очередь сложность и высокую стоимость в изготовлении подобных электрических машин, а также достаточно невысокая скорость их сборки. Вместе с этим, при формировании пазов в заготовке проявляется эффект заусенцы, которые, накладываясь друг на друга от слоя к слою приводят к замыканию всей намотанной полосы, также формируется «наклеп» что значительно снижает магнитные свойства будущих магнитопроводов. И первое, и второе приводят к тому, что значительно снижаются магнитные характеристики составных частей будущих электрических машин, и, как следствие к ухудшению их характеристик после сборки.

Поэтому при сборке составных частей электротехнического комплекса, который рассматривается в настоящей работе использован разработанный под руководством профессора Гайтова Б.Х. способ изготовления магнитопроводов аксиальных электрических машин [78]. В данном способе из заготовки электротехнической стали отрезается полоса (или полосы) необходимых размеров (длины и ширины). Затем выполняется их намотка на заготовленные стальные кольца до достижения необходимого диаметра и фиксации ещё одним кольцом снаружи. Отличается указанный способ тем, что нарезка полос из электротехнической стали выполняется одновременно на необходимое количество, а формирование пазов с последующим отжигом выполняется ещё до начала наматывания полученных полос. Затем производится намотка не на стальное, а на ферромагнитное кольцо и после достижения необходимого размера также фиксируются ферромагнитными кольцами снаружи.

Для определения места и параметров будущих пазов на заготовленной полосе используются современные вычислительные системы, которые по заданной программе выполняют расчет размеров и расстояния между пазами и управляют механизмами, формирующими эти пазы.

В процессе намотки лента имеет определенную степень натяжения, это позволяет исключить смещение витков относительно друг друга во всех направлениях, каждый последующий слой оказывает давление на предыдущий и

позавершению процесса намотки выполняется точечная сварка конца ленты с предыдущим витком. Такая технология производства магнитопровода приводит к отсутствию любых перемещений всех витков в любых направлениях относительно друг друга. Кроме того, все процедура изготовления магнитопровода, начиная от нарезки полос электротехнической стали необходимых размеров (длины и ширины) и количества, с последующим формированием пазов и отжигом позволяет одновременно потоком изготавливать необходимое количество составных частей будущих электрических машин. Это поточное производство позволяет значительно повысить производительность труда, а технология выполнения пазов приводит к существенной экономии электротехнической стали. Выполнение отжига заготовок сразу после вырубки пазов и до формирования магнитопровода позволяет значительно улучшить его магнитные свойства, а также обеспечить необходимую достаточно качественную изоляцию друг от друга витков электротехнической стали будущей электрической машины.

Данный способ изготовления магнитопроводов также дает возможность снизить количество отходов при производстве, тем, что в процессе нарезки могут оставаться достаточно узкие полосы электротехнической стали, которые все равно в дальнейшем возможно использовать для одновременного производства маломощных и малогабаритных электрических машин.

Также, электротехнические комплексы и системы торцевой конструкции имеют еще одно достоинство – они обладают моментом инерции, значительно превышающем его у электрических машин радиальной конструкции. У источников электрической энергии систем автономного электроснабжения и авиационных источников электроэнергии в силу периодического изменения скорости вращения приводного вала (из-за изменения скорости ветра, частоты вращения турбины и т.д.). Соответственно, одним из направлений стабилизации вырабатываемой электрической энергии, является максимальное увеличение длительности переходных процессов. Это дает дополнительное время системам регулирования тока и напряжения для своевременной реакции на изменения и

выдачу управляющих сигналов. Поэтому в случае, когда конструкция электрическая машина выполнена аксиальной, то значительный момент инерции позволяет увеличивать время переходного процесса. Соответственно, ротор в электротехнических комплексах аксиальной конструкции выступает дополнительно в роли стабилизатора скорости вращения, чем обеспечивает снижение чувствительности источника электрической энергии к воздействию внешних факторов. [19, 72, 73, 75, 49, 74, 80, 81, 82, 83, 84, 92 и др.].

## **2.2 Разработка перспективной конструкции электротехнического комплекса для воздушных судов**

Исходя из вышеизложенного следует, что для систем электроснабжения ВС, целесообразно использовать генераторы с магнитопроводами аксиальной конструкции.

На рис. 2.4, 2.5 и 2.6 представлен аксиальный генератор, его функциональная (структурная) и электрическая схема с системой управления электроснабжения, соответственно [79].

Генератор аксиальной конструкции как электротехнический комплекс содержит:

- 1- корпус;
- 2 - постоянный многополюсный магнит индуктора подвозбудителя;
- 3, 10 – боковые аксиальные магнитопроводы;
- 4 - многофазную обмотку якоря подвозбудителя;
- 5 - однофазную обмотку возбуждения возбудителя;
- 6 - дополнительную обмотку б возбуждения возбудителя;
- 7 - аксиальный магнитопровод;
- 8 - многофазную обмотку якоря возбудителя;
- 9 - однофазную обмотку возбуждения основного генератора;
- 11– многофазная обмотка якоря основного генератора;
- 12 – вал;



- 13,14 – подшипниковые узлы;
- 15,16 – диски;
- 17, 18, 19 – выпрямители.

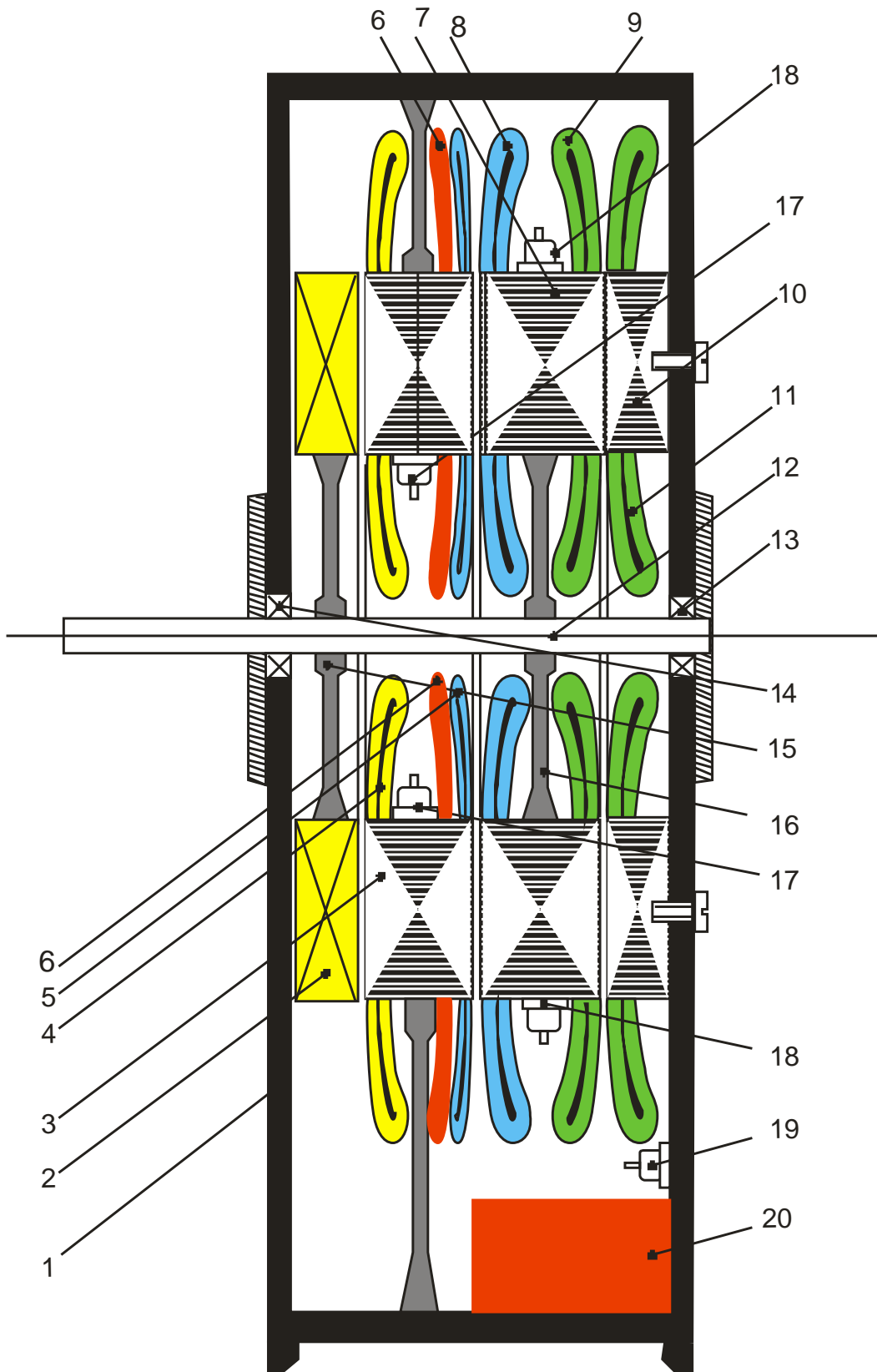


Рисунок 2.4 - Общий вид аксиального бесконтактного генератора в разрезе

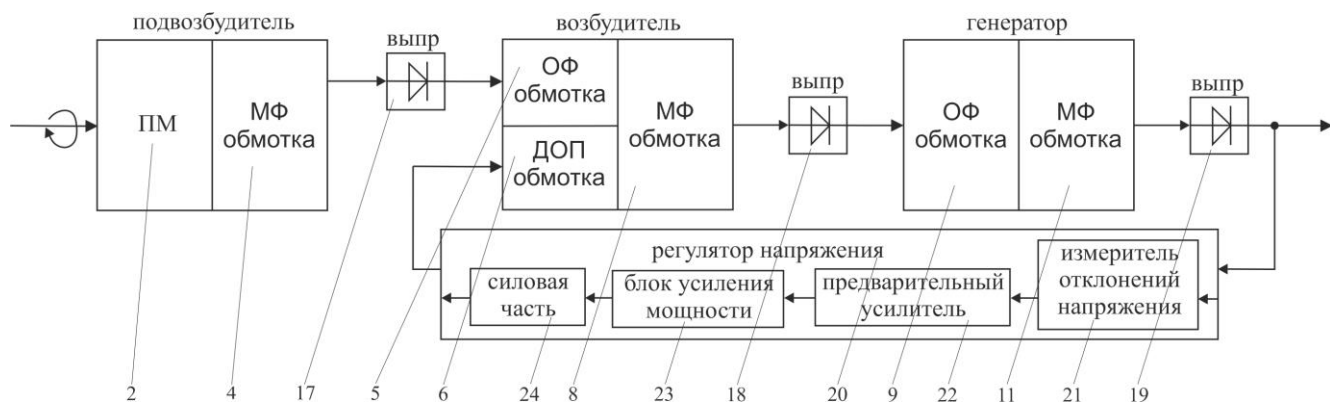


Рисунок 2.5 – Функциональная (структурная) схема аксиального бесконтактного генератора

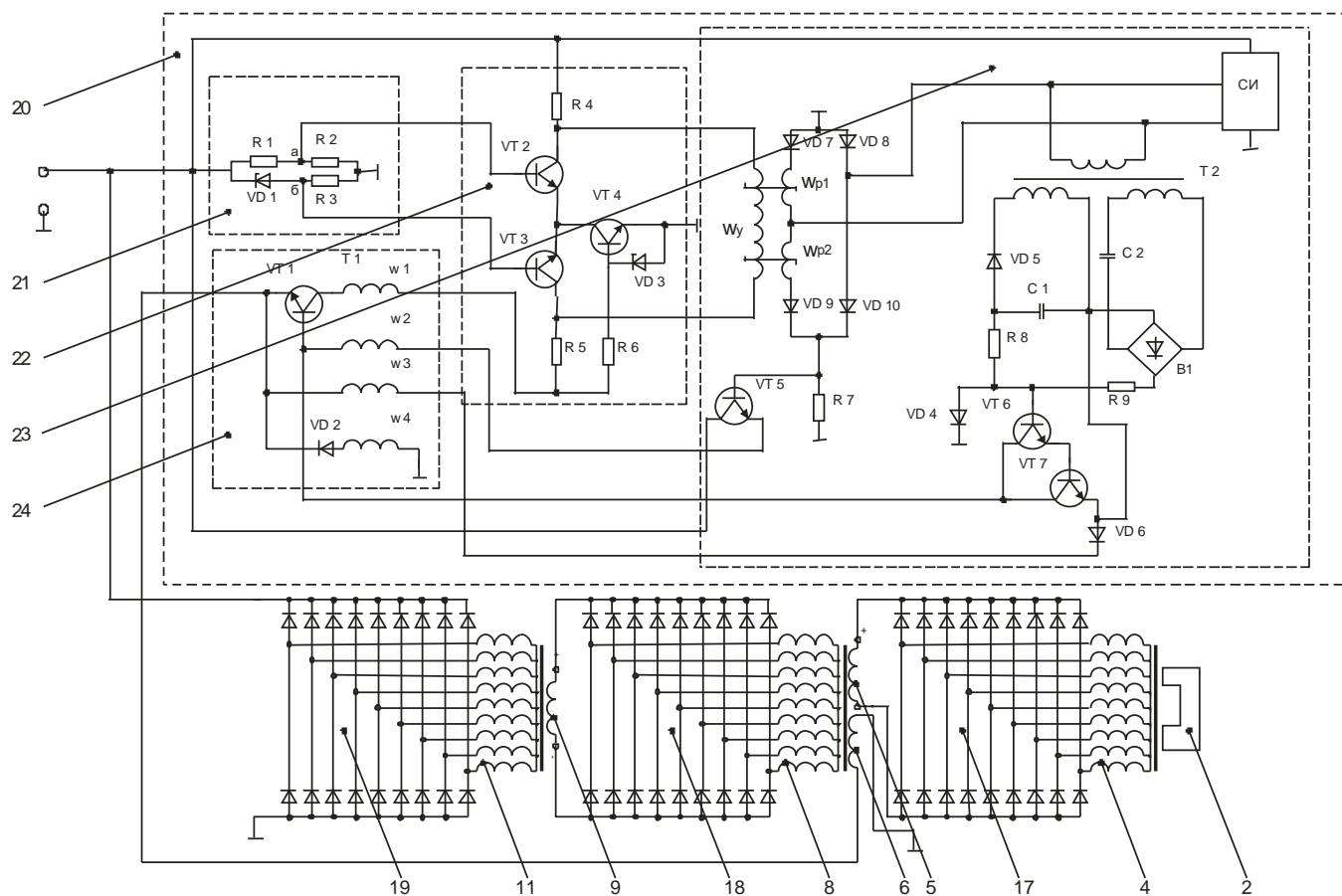


Рисунок 2.6 – Электрическая схема аксиального бесконтактного генератора

В нижней части корпуса генератора устанавливается регулятор напряжения 20 (рис 2.4, рис. 2.5), состоящий из измерителя отклонений напряжения 21 (рис. 2.5),

предварительного усилителя 22, блока усиления мощности 23 и силовой части 24, при этом измеритель отклонений напряжения 21 включается на выходное напряжение  $U$  генератора (рис 2.5), а дополнительная обмотка возбуждения 6 возбуждителя подключается к силовой части 24 регулятора напряжения.

Принцип работы аксиального бесконтактного генератора постоянного тока:

Вместе с валом установки вращаются многополюсный магнит, внутренние аксиальные магнитопроводы с многофазной обмоткой якоря возбуждителя и однофазной обмоткой возбуждения основного генератора. Магнитный поток, создаваемый многополюсным магнитом 2 наводит ЭДС в многофазной обмотке якоря подвозбудителя 4. ЭДС в многофазной обмотке якоря подвозбудителя, выпрямленная выпрямителем 17 подается на однофазную обмотку возбуждения возбуждителя 5.

Созданный магнитный поток взаимодействует с многофазной обмоткой 8 якоря возбуждителя, уложенной в пазы внутреннего аксиального магнитопровода 7, и наводит в ней многофазную систему ЭДС, которая выпрямляется многофазным двухполупериодным выпрямителем 18 и подается на однофазную обмотку возбуждения 9 основного генератора, уложенную в пазы внутреннего аксиального магнитопровода 7. Магнитный поток однофазной обмотки возбуждения 9 основного генератора взаимодействует с многофазной обмоткой 11 якоря основного генератора, уложенной в пазы бокового аксиального магнитопровода 10, и наводит в ней многофазную систему ЭДС, которая выпрямляется многофазным двухполупериодным выпрямителем 19 и подается в сеть.

Стабилизация выходного напряжения  $U$  генератора осуществляется следующим образом. Если выходное напряжение  $U$  генератора изменяется (например, при изменении частоты вращения входного вала или изменении нагрузки), то изменяется разность потенциалов между точками а и б (рис. 2.5), т.е. изменяется величина сигнала рассогласования  $\Delta U = \varphi(U - U_3)$ . Например, с понижением напряжения генератора сигнал рассогласования измерителя отклонений напряжения 21 (разность потенциалов между точками а и б)

уменьшается, что приводит к уменьшению тока в обмотке управления  $w_y$  магнитного усилителя блока усиления мощности 23. Уменьшение магнитодвижущей силы (МДС), создаваемой обмоткой управления  $w_y$  магнитного усилителя, обуславливает увеличение длительности импульсов на резисторе R7, служащем нагрузкой магнитного усилителя.

Эти импульсы управляют работой транзистора VT5 усилителя блока усиления мощности 23. Транзистор VT5 управляет работой транзистора VT1 силовой части 24 регулятора напряжения. При увеличении длительности импульсов на резисторе R7 время открытого состояния транзисторов VT5 и VT1 увеличивается, соответственно увеличивается средняя величина тока возбуждения в дополнительной обмотке возбуждения возбuditеля 6. Магнитные потоки, созданные обмотками 5 и 6 и направленные согласно, наводят суммарную ЭДС в обмотке якоря возбuditеля 8, а соответственно, увеличивается ток в обмотке возбуждения 9 основного генератора и создаваемый им магнитный поток. ЭДС генератора, создаваемая этим потоком в обмотке 11 якоря основного генератора, а соответственно и выходное напряжение  $U$ , увеличивается, стремясь к заданному значению [48, 49, 75, 76, 77].

### **2.3 Методы исследования переходных процессов в электромеханических преобразователях энергии (ЭМПЭ). Математическая модель системы электроснабжения**

Проведение различных работ, связанных с выполнением исследований в области электротехники и электромеханики затрудняется различными факторами. В первую очередь это высокая стоимость и большой объем трудозатрат при создании экспериментальных образцов. С учетом развития уровня мощности современных источников электрической энергии до многих сотен киловатт возникает ряд сложностей при проведении некоторых видов экспериментов.

В подобных ситуациях и с учетом современного развития компьютерных технологий более актуальным и перспективным будет использование математического моделирования до этапа создания физических моделей. Также

удобно и практично использовать математическое моделирование при исследовании объектов в предельных режимах работы.

Использование вычислительных ресурсов современных компьютеров позволяет при исследовании математических моделей в относительно короткие сроки получать максимально возможное количество информации практически о всех возможных режимах работы исследуемых образцов. Особенно эффект от применения математического моделирования проявляется при исследовании сложных процессов, меняющихся линейным и нелинейным законам и большим количеством изменяющихся параметров [1].

На сегодняшний день математическое моделирование дает возможность провести экспериментальные исследования практически любых разработанных объектов и ещё не созданных в виде реальных объектов. За счет этого стоимость исследований значительно снижается, так как не требуется создания действующих образцов для проведения физических экспериментов. Соответственно использование различных программ для создания математических моделей при выполнении исследовательских и проектно-конструкторских работ является весьма актуальным и востребованным направлением.

Для математического описания свойств системы электроснабжения, как частного случая синхронного генератора с многофункциональным ротором, в динамических режимах целесообразно воспользоваться моделью обобщенного электромеханического преобразователя энергии (ОЭМПЭ).

Разработанная А.В. Ивановым-Смоленским [33, 34, 35, 36, 37, 38], И.П. Копыловым [46, 39, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63], Г. Кроном [67], Г.А. Сипайловым [95], Н. Хенкоком [104], А.М. Сугроровым [96], Г.Н. Петровым [88] и другими отечественными и зарубежными учеными теория ОЭМПЭ - это математическая теория электрических машин, позволяющая на принципиально новой основе с широким использованием компьютерных технологий проводить исследования изменения практически всех характеристик машин при различных

режимах работы. Электрическая машина, как ОЭМПЭ, представляется в виде системы электрических цепей, находящихся в относительном движении. Ясно, что, система уравнений ОЭМПЭ является нелинейной даже при простых коэффициентах. И, естественно, при замене постоянных коэффициентов нелинейными система значительно усложняется. Параметры ротора не являются постоянными величинами при изменении режима работы машины.

Такое непостоянство имеет место при учете насыщения эффекта вытеснения тока, когда вторичные параметры представляют нелинейные функциональные зависимости от тока и скорости вращения ротора. В ряде работ, как например, [59], электрическая машина ОЭМПЭ, представлена в двух осях  $\alpha$ - $\beta$ . Такое упрощение обусловлено значительными затратами машинного времени.

На рис. 2.6 представлена электрическая схема системы электроснабжения. На «нижней» части схемы представлена электромагнитная и электромеханическая системы. Как видно из схемы, имеет место три электромеханических преобразования энергии (магнит 2-система обмоток 4; обмотки 5, 6 - обмотка 8; обмотка 9 - обмотка 11) и шесть электрических преобразований (обмотка 4 – выпрямитель 17, выпрямитель 17 – обмотка 5, обмотка 8 – выпрямитель 18, выпрямитель 18 – обмотка 9, обмотка 11 – выпрямитель 19, выпрямитель 19 – выходные зажимы электромеханического преобразователя энергии).

На рис. 2.7 приведены пространственные модели отдельных частей машины в привязке к осям  $\alpha$ - $\beta$ .

На рис. 2.7 обозначено: ПМ – постоянный магнит, М3, М7, М10 – аксиальные магнитопроводы 3, 7, 10 в соответствии с рис. 2.4. Система координатных осей жестко связана со статором, ротор с обмотками вращается со скоростью  $\omega_{\text{вращ}}$ .

В предыдущем разделе описан принцип работы системы электроснабжения. Для описания электромеханических и электромагнитных процессов, протекающих в исследуемой системе необходимо составить систему дифференциальных уравнений.

В рассматриваемой машине с неоднократным преобразованием энергии при ее передаче от одного узла машины к другому представляется целесообразным воспользоваться 9-ти фазной системой электромеханического преобразования энергии.

Такая система дифференциальных уравнений, с учетом общей нелинейности и несимметричности модели, позволит обеспечить минимизацию пульсаций выходных параметров.

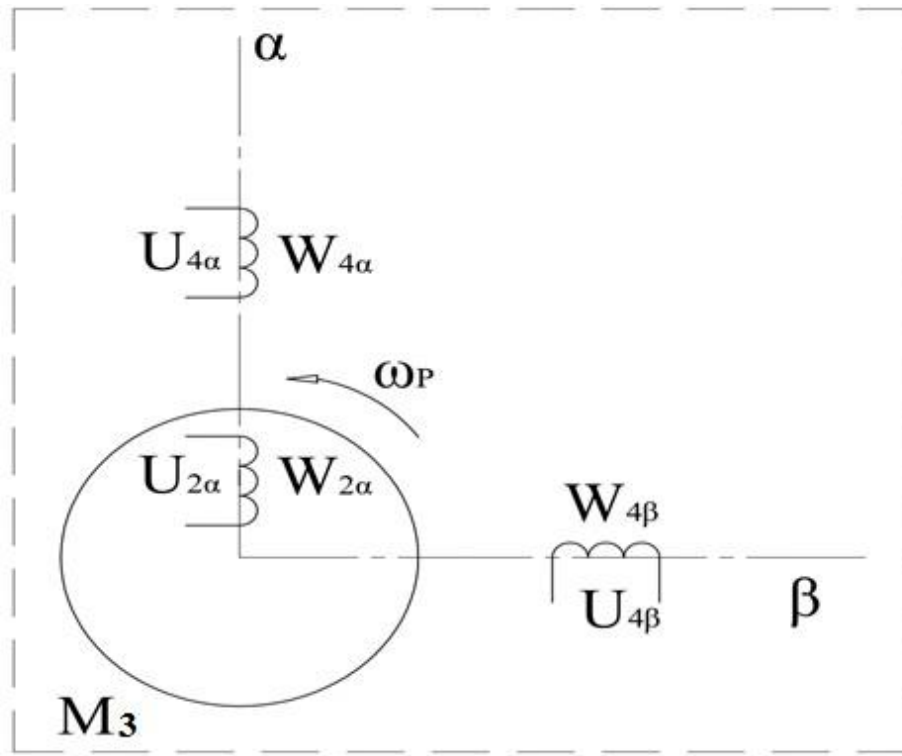
Система дифференциальных уравнений ОЭМПЭ представляет собой многообмоточную структуру с группами статорных и роторных обмоток, находящихся в относительном движении.

Симметричную многофазную электрическую машину с синусоидальным напряжением на ее обмотках удобно анализировать, приведя ее к двухфазной.

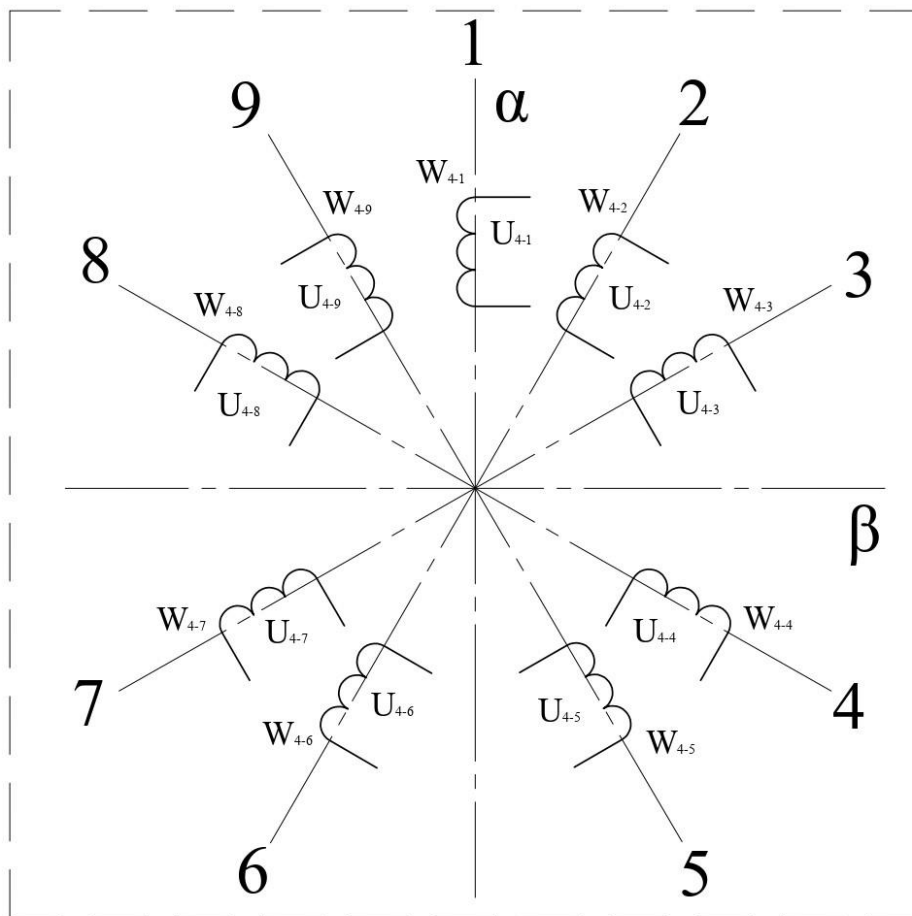
При составлении математической модели за основу взята двухфазная система в геометрическом и электрическом отношениях однородная, с синусными обмотками, которая заменяет реальную многофазную.

При составлении математической модели рассмотрены следующие составляющие системы электроснабжения:

- подвозбудитель (постоянной многополюсный магнит 2, многофазная обмотка якоря 4);
- выпрямитель 17;
- возбудитель (однофазная обмотка возбуждения 5, дополнительная обмотка возбуждения 6, многофазная обмотка якоря 8);
- выпрямитель 18;
- основной генератор (однофазная обмотка возбуждения 9, многофазная обмотка якоря 1);
- выпрямитель 19.

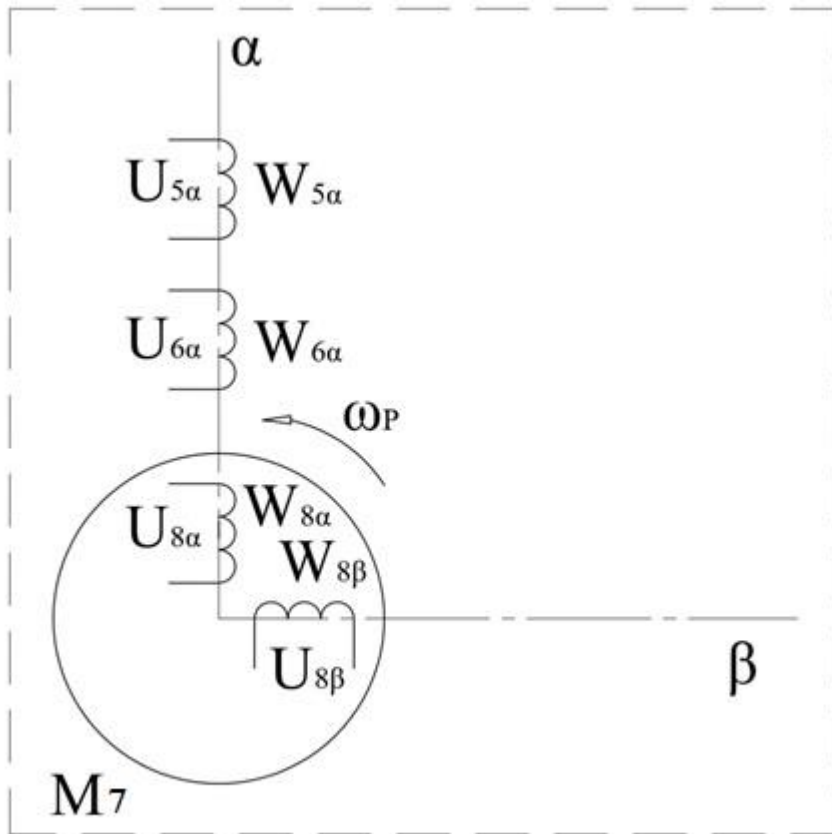


a)

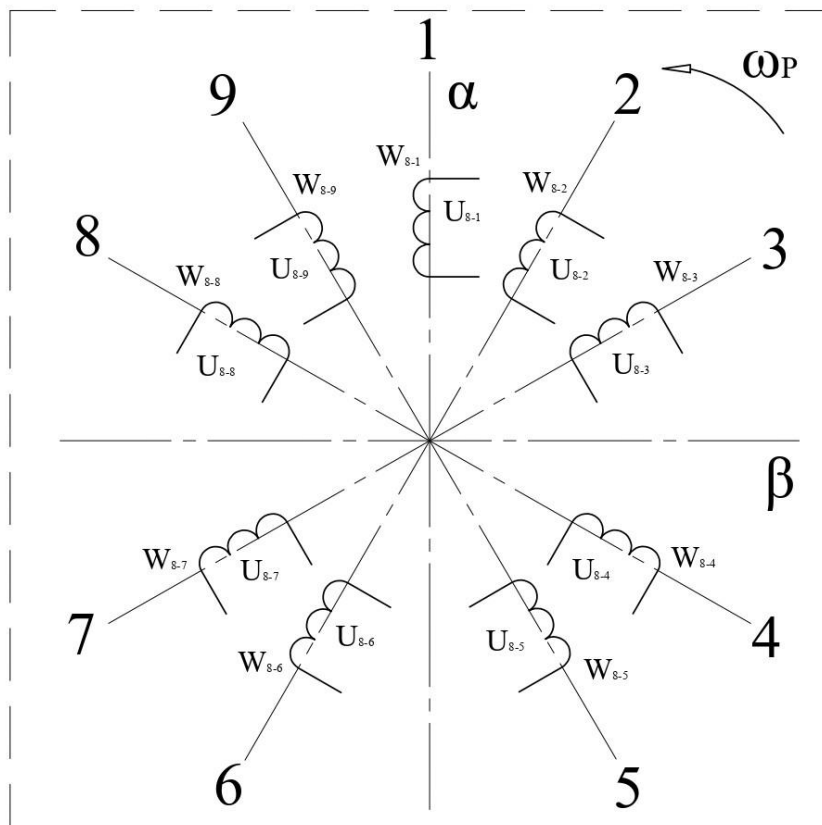


b)

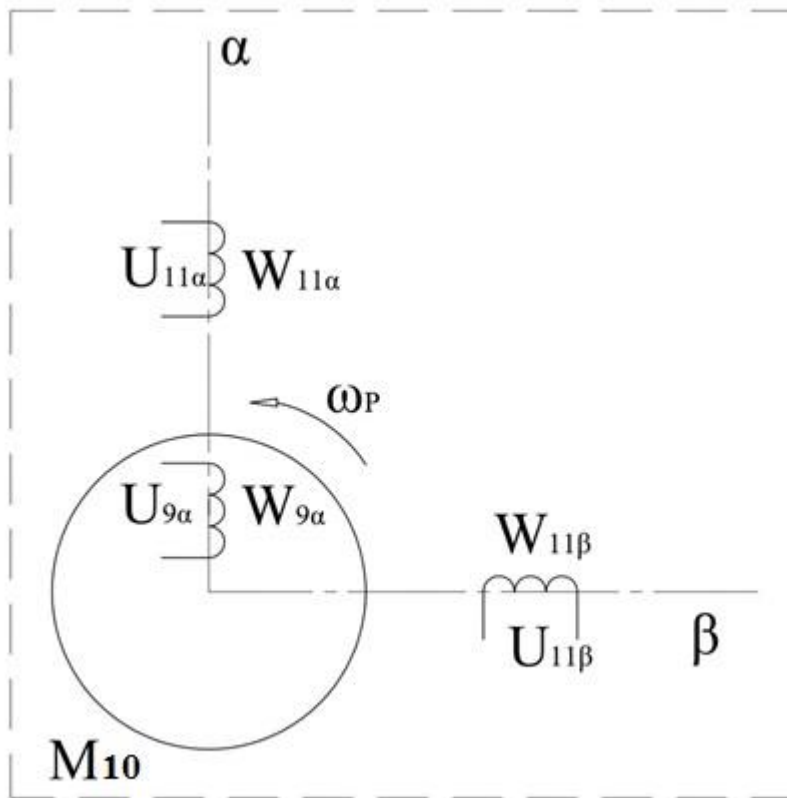




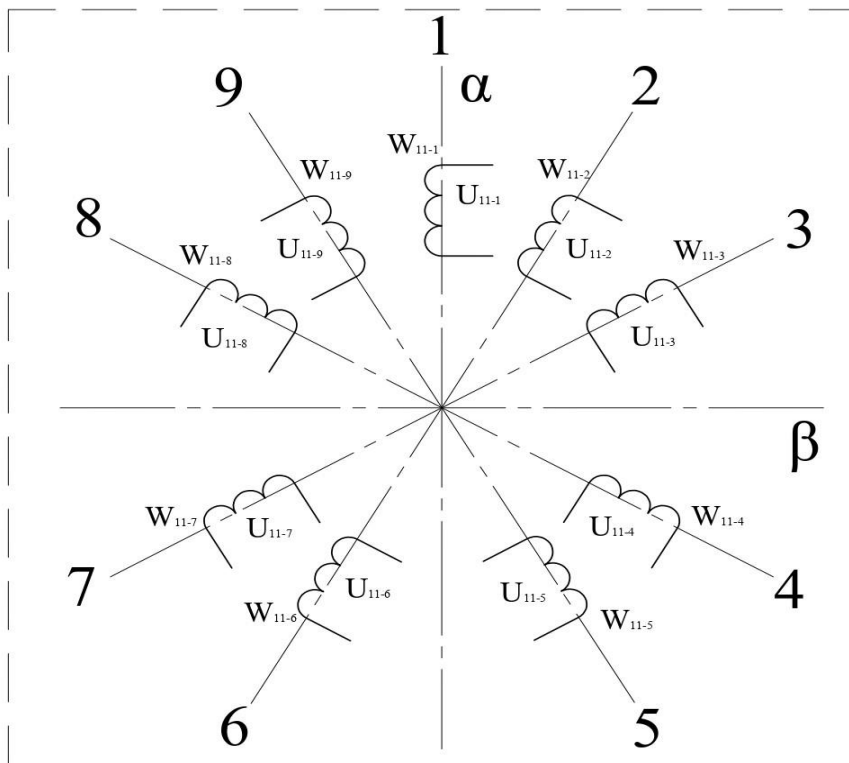
B)



Gamma)



д)



е)

Рисунок 2.7 - Пространственная модель

При составлении системы дифференциальных уравнений подвозбудитель представлен одной обмоткой; многофазная обмотка якоря 4, многофазная обмотка 8, многофазная обмотка 11 якоря представлены уравнениями по двум осям  $\alpha$ - $\beta$  с последующим преобразованием в 9-ти фазную систему, с индексацией «4», «8», «11», соответственно.

$$\left. \begin{aligned} U_2 &= R_2 i_2 + \frac{d\Psi_2}{dt} \\ -U_{4\alpha} &= R_4 i_{4\alpha} + \frac{d\Psi_{4\alpha}}{dt} + \omega_p \Psi_{4\alpha} \\ -U_{4\beta} &= R_4 i_{4\beta} + \frac{d\Psi_{4\beta}}{dt} + \omega_p \Psi_{4\beta} \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

Потокосцепления в (2.1) следуют из выражений:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_2 &= L_2 i_2 + M_1 i_{4\alpha} \\ \Psi_{4\alpha} &= L_4 i_{4\alpha} + M_1 i_2 \\ \Psi_{4\beta} &= L_4 i_{4\beta} \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

Напряжение, формирующееся на обмотке 5 возбуждения возбудителя:

$$\left. \begin{aligned} U_{51} &= \frac{1}{T} \int u_{4\alpha} dt \\ U_5 &= K_e U_{51} \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

Уравнения напряжений, формирующихся на обмотках возбудителя 5, 6 и 8:

$$\left. \begin{aligned} U_5 &= R_5 i_5 \\ U_6 &= R_6 i_{6\alpha} \\ -U_{8\alpha} &= R_8 i_{8\alpha} + \frac{d\Psi_{8\alpha}}{dt} + \omega_p \Psi_{8\alpha} \\ -U_{8\beta} &= R_8 i_{8\beta} + \frac{d\Psi_{8\beta}}{dt} - \omega_p \Psi_{8\beta} \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

Потокосцепления в (2.4) следуют из выражений:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{8\alpha} &= L_8 i_{8\alpha} + M_7 i_5 + M_7 i_6 \\ \Psi_{8\beta} &= L_8 i_{8\beta} \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

Напряжение, формирующееся на обмотке 9:

$$\left. \begin{aligned} U_{91} &= \frac{1}{\tau} \int u_{8\alpha} dt \\ U_9 &= K_E U_{91} \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

Уравнения напряжений, формирующихся на обмотках 11:

$$\left. \begin{aligned} U_9 &= R_9 i_{9\alpha} \\ -U_{11\alpha} &= R_{11} i_{11\alpha} + \frac{d\Psi_{11\alpha}}{dt} + \omega p \Psi_{11\alpha} \\ -U_{11\beta} &= R_{11} i_{11\beta} + \frac{d\Psi_{11\beta}}{dt} - \omega p \Psi_{11\beta} \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

Потокосцепления в (2.7) следуют из выражений:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{11\alpha} &= L_{11} i_{11\alpha} + M_{10} i_9 \\ \Psi_{11\beta} &= L_{11} i_{11\beta} \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

Напряжение, формирующееся после обмоток 11:

$$\left. \begin{aligned} U_{12.1} &= \frac{1}{\tau} \int u_{11\alpha} dt \\ U_{12} &= U_{12.1\text{ном}} C_1 + A_1 (U_{12.1\text{ном}} - U_{12.1}) + \frac{d(U_{12.1\text{ном}} - U_{12.1})}{dt} B_1 \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

Токи  $i_j^{iN}$  в фазах девятифазных обмоток 4,8,11 (где  $j$  – номер фазы (см. рис. 2.6),  $i$  – принадлежность обмотки к статорной (S) и роторной (r) системам, N – номер обмотки на схеме) определяются по формулам:

$$\left. \begin{aligned}
 i_1^{iN} &= i_\alpha^i; \\
 i_2^{iN} &= \frac{i_\alpha^N}{\cos \varphi_1} = \frac{i_\beta^N}{\cos 1,25\varphi_1}; \\
 i_3^{iN} &= \frac{i_\alpha^N}{\cos 2\varphi_1} = \frac{i_\beta^N}{\cos 0,25\varphi_1}; \\
 i_4^{iN} &= -\frac{i_\alpha^N}{\cos 1,5\varphi_1} = \frac{i_\beta^N}{\cos 0,75\varphi_1}; \\
 i_5^{iN} &= -\frac{i_\alpha^N}{\cos 0,5\varphi_1} = \frac{i_\beta^N}{\cos 1,75\varphi_1}; \\
 i_6^{iN} &= -\frac{i_\alpha^N}{\cos 0,5\varphi_1} = -\frac{i_\beta^N}{\cos 1,75\varphi_1}; \\
 i_7^{iN} &= -\frac{i_\alpha^N}{\cos 1,5\varphi_1} = -\frac{i_\beta^N}{\cos 0,75\varphi_1}; \\
 i_8^{iN} &= \frac{i_\alpha^N}{\cos 2\varphi_1} = -\frac{i_\beta^N}{\cos 0,25\varphi_1}; \\
 i_9^{iN} &= \frac{i_\alpha^N}{\cos \varphi_1} = -\frac{i_\beta^N}{\cos 1,25\varphi_1}.
 \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

При составлении уравнений 2.1–2.10 приняты следующие обозначения:

- $\alpha$  и  $\beta$  - оси заторможенной системы координат;
- $i$ - номер обмотки, в соответствии со схемой 2.5;
- $\omega_p$  – угловая скорость вращения ротора (постоянного многополюсного магнита 2 и магнитопровода 7) (рис. 2.6, 2.7);
- $M_3$  – взаимная индуктивность обмотки возбуждения постоянного магнита и девятифазной обмотки 4 якоря подвозбудителя;
- $M_7$  – взаимная индуктивность обмоток 5 (обмотка возбуждения возбудителя), 6 (дополнительная обмотка возбуждения возбудителя) и девятифазной обмотки 8 возбудителя;
- $M_{10}$  – взаимная индуктивность обмотки 9 возбуждения и девятифазной обмотки 11 основного генератора;
- $\varphi = 2\pi/m_2$  – угол сдвига фаз,
- $m_2 = 9$  – число фаз обмоток 4, 8 и 11.

- $U_5, U_6, U_9$  – выпрямленное напряжение на обмотках 5, 6 и 9 соответственно;
- $R_i$  – сопротивления обмоток 5, 6 и 9, соответственно.

Следует заметить, что собственные индуктивности зависят от степени намагничивания соответствующих магнитопроводов (при проведении численного эксперимента –  $L(i)$ ),  $K_b$  – коэффициент выпрямления (принят равным 2,51 [95]), коэффициенты  $A_1, B_1, C_1$  учитывают схему регулятора напряжения и параметры его элементов.

Уравнения динамики механической части исследуемой системы имеют вид уравнений равновесия моментов:

$$\left. \begin{aligned} M_3 - M_b - j \frac{d\omega_p}{dt} \\ M_3 = [M_3(i_2 i_{4\alpha}) - M_7(i_5 i_{8\beta} + i_6 i_{8\beta}) + M_{10}(i_9 i_{11\beta})] \cdot P \\ M_b = A_2 \omega_p^2 \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

где:

- $M_3$  – электромагнитный момент,
- $J$  – момент инерции вращающихся масс,
- $M_b$  – вращающий момент,
- $A_2$  – коэффициенты, учитывающие зависимость вращающего момента  $M_b$  от угловой скорости вращения ротора  $\omega_p$ ;
- $p$  – число пар полюсов системы электроснабжения [23, 79, 85, 87].

## 2.4 Выводы по второй главе

1. Для решения второй задачи исследования обоснована и разработана новая конструкция электротехнического комплекса постоянного тока, имеющая по сравнению с известными устройствами следующие преимущества: легко реализуемая технология изготовления магнитопроводов статора и ротора, практически безотходное использование магнитных материалов, лучшие условия охлаждения, улучшение массогабаритных и энергетических показателей,

существенное упрощение обмоточных работ благодаря открытой зубцовой зоне, удобство сочленения с механизмом и приводом, сравнительная простота эксплуатации и ремонта. При этом, в качестве основного и резервного источников постоянного тока для воздушных судов целесообразно выбрать электротехнический комплекс постоянного тока на основе аксиального бесконтактного генератора постоянного тока.

2. В рамках решения третьей задачи исследования построена математическая модель электротехнического комплекса на базе дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные и электромеханические процессы. Параметры машины в модели учтены путём введения их функциональных зависимостей от тока и скорости вращения ротора.

## **ГЛАВА 3. РЕАЛИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

### **3.1 Общие сведения**

В целях исследования системы электроснабжения в переходных электромагнитных и электромеханических переходных процессах, получения зависимостей между различными показателями, характеризующими процессы, происходящие в машине, уравнения электромагнитных и электромеханических переходных процессов в исследуемой системе с учетом насыщения и характера питающего напряжения решались на ЭВМ.

### **3.2 Расчет электромагнитных и электромеханических переходных процессов в комплексе**

#### **3.2.1 Аппроксимация кривой намагничивания**

Для учета насыщения в роторе и сердечнике статора при исследовании электрических машин необходимо иметь аналитические выражения кривых намагничивания материалов ротора и статора машины.

При выборе аппроксимирующих функций кривой намагничивания необходимо выполнить ряд требований:

- а) обеспечение достаточной точности и простоты;
- б) недопустимость наличия разрывов в производной.

Известны методы аналитической аппроксимации кривой намагничивания магнитопроводов такие как кусочно-степенная аппроксимация Л.Р.Неймана, кусочно-линейная, специальными функциями, метод Лагранжа сплайнами [59, 60 и др].



При выборе метода аппроксимации, отвечающего вышеперечисленным требованиям, необходимо стремиться к выбору наиболее простого метода, обеспечивающего необходимую точность.

В [17] использована аппроксимация кривой намагничивания, основанная на том, что петля гистерезиса представлена в виде прямоугольника. Подобное представление возможно только в областях глубокого насыщения и поэтому неприемлема.

В [14] предложен метод аппроксимации тригонометрической функции вида:

$$A=B*\arctg (C_i), \quad (3.1)$$

где  $B$ ,  $C_i$  – коэффициенты, которые можно отыскать методом наименьших квадратов. Недостатком указанного метода является недостаточная плавность перехода между участками кривой намагничивания.

Указанных недостатков лишен метод аппроксимации с помощью сплайн-функций [100]. При сплайн-аппроксимации через каждые две соседние точки кривой (экспериментальные или расчетные) проводят полином третьей степени, что обеспечивает высокую точность (до 1-3%) и плавность перехода между участками кривой.

Кривую намагничивания стали  $B (H)$  при расчете режимов генератора заменяют функцией  $\mu(i)$ , которая получается при осуществлении следующих преобразований

$$\mu = \frac{B}{H};$$

$$H=A*i, \quad (3.2)$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость материала;

$i$  – мгновенное значение тока;

$B$ ,  $H$  – магнитная индукция и напряженность магнитного поля, соответственно;

$A$  – постоянный коэффициент, зависящий от геометрии машины и обмоточных данных.

Аппроксимация функции  $\mu(i)$ , осуществлялась методом сплайн-аппроксимации по специальной подпрограмме. Исследования показали, что аппроксимация кривых намагничивая с помощью сплайн-функции на 10-12 % повышает точность аппроксимации.

### 3.2.2 Реализация математической модели на ЭВМ

В задачу исследований входит решение системы уравнений, описывающие электромагнитные и электромеханические переходные процессы в исследуемой системе с учетом насыщения, изменения формы задающего вращательного движения, особенностей многократного преобразования энергии.

Целью вычислительного эксперимента является:

- получение картины электромагнитных и электромеханических переходных процессов с учетом изменяющейся формы задающего вращательного движения;
- оценка формы кривой выходного напряжения моментов инерции и сопротивления, вторичных параметров, технологических характеристик на показатели, характеризующие переходных процесс;
- нахождения функциональных зависимостей между различными показателями режимов работы генераторной установки, характеризующими динамические свойства машины.

### 3.2.3 Выбор метода решения задачи

Численное решение данной задачи представляет значительные вычислительные сложности.

Задача состоит из плохо стыкуемых подзадач:

- токи в проводниках описываются системой обыкновенных дифференциальных уравнений во времени, когда в некоторых уравнениях имеют место нелинейные коэффициенты. Уравнения не могут быть разрешены относительно неизвестных токов и даны в неявном виде;

– уравнения движения связаны с электромагнитными уравнениями через неявно выраженные токи и постоянная времени электромеханических величин отличается на несколько порядков от постоянной времени электромагнитных величин.

### 3.2.4 Решение нелинейной системы обыкновенных дифференциальных уравнений

Общей сложностью, независимо от метода, является неявный вид обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) относительно  $\frac{di_k}{dt}$ , где  $k=1, \dots, n$ . Возможно, на каждом шаге интегрирования решать линейную систему уравнений относительно токов

$$\begin{pmatrix} a_{11} \dots a_{1n} \\ \dots \dots \dots \\ a_{n1} \dots a_{nn} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \frac{di_1}{dt} \\ \dots \\ \frac{di_n}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1 \\ \dots \\ f_n \\ \cdot \end{pmatrix}, \quad (3.3)$$

где матрица  $|\alpha_{ij}|$  находится на каждом шаге интегрирования с учетом значений матрицы  $|f_i|$  правых частей.

Возможны следующие методы решения ОДУ:

- методы интегрирования ОДУ (явная схема);
- конечно-разностные методы решения (неявная схема).

Метод интегрирования ОДУ наиболее экономичен во времени и легко программируется для постоянного шага по времени. Шаг во времени, как показывают предварительные грубые прикидки, может меняться до 100 раз. Возникают сложности программирования переменного шага [43];

Конечно-разностные методы решения:

- методы типа Адамса (многоточечные методы). Возможен автоматический выбор шага, однако метод может дать плохие результаты при очень сильном дроблении шага. При изменении шага «начальные значения» приходится считать по совершенно другому алгоритму. Это является следствием того, что метод многоточечный [43];

- явные методы типа Рунге-Кутта с автоматическим выбором шага. Метод является одноточечным и дробление шага не отражается «болезненно» на всем алгоритме. Более того, существует разновидности метода, позволяющие увеличивать шаг, если это не отражается на заданной точности. Существуют явные методы Рунге-Кутта, позволяющие интегрировать слабожесткие системы [100]. Метод требует большего машинного времени, чем первые два. Метод условно устойчив;

- неявные методы Рунге-Кутта или методы Гирре [43]; методы имеют преимущество перед методом Рунге-Кутта - они являются безусловно устойчивыми, что позволяет, в частности, производить существенное увеличение шага интегрирования по сравнению с явным методом Рунге-Кутта. Метод обычно применяется для решения сильно жестких систем ОДУ, применение к нежесткой или слабо жесткой системе может привести к существенной потере точности.

Таким образом, составленный алгоритм решения системы уравнений позволяет найти неизвестные токи, электромагнитный момент, угловую скорость ротора в любой момент времени.

Алгоритм реализован на языке ФОРТРАН-4 с использованием среды «Mathcad» [89,90 и др.]. Фрагмент решения приведен в приложении 1.

При определении интервала времени записи выходных функций системы необходимо определить постоянные времени. Постоянные времени электромагнитного и электромеханического переходных процессов определяются по известным формулами [31]:

$$T_{\omega} = \frac{\omega_p * J}{M_H} \quad (3.4)$$

$$T_{\text{эмаг}} = \frac{L_i}{R_i} \quad (3.5)$$

- $M_H$  - номинальный момент на валу;
- $\omega_p$  – скорость вращения ротора;
- $J$  – момент инерции;
- $L_i, R_i$  - индуктивность и активное сопротивление, соответствующего узла машины.

В качестве объекта исследования были выбраны электротехнические системы, построенные на базе модели авиационного генератора аксиального типа мощностью 1,5 кВт, как частный случай генератора, номинальные данные которых сведены в табл. 3.1.

По данным численного эксперимента построена картина переходного процесса в генераторе мощностью 1,5 кВт.

Таблица 3.1 - Номинальные данные исследуемого генератора

Наименование данных	Объект исследования
$P_H$ , кВт	1,5
$U_H$ , В	220
$f_H$ , Гц	50
$R_s$ , Ом	7,03
$X_s$ , Ом	10,35
$X_m$ , Ом	110,6
$J$ , кг*м <sup>2</sup>	0,0032
$M_H$ , Н*м	9,7
$\omega_{вр.}$ , рад/с	153,9

Прим. В качестве параметров приняты параметры стандартного генератора мощностью 1,5 кВт.

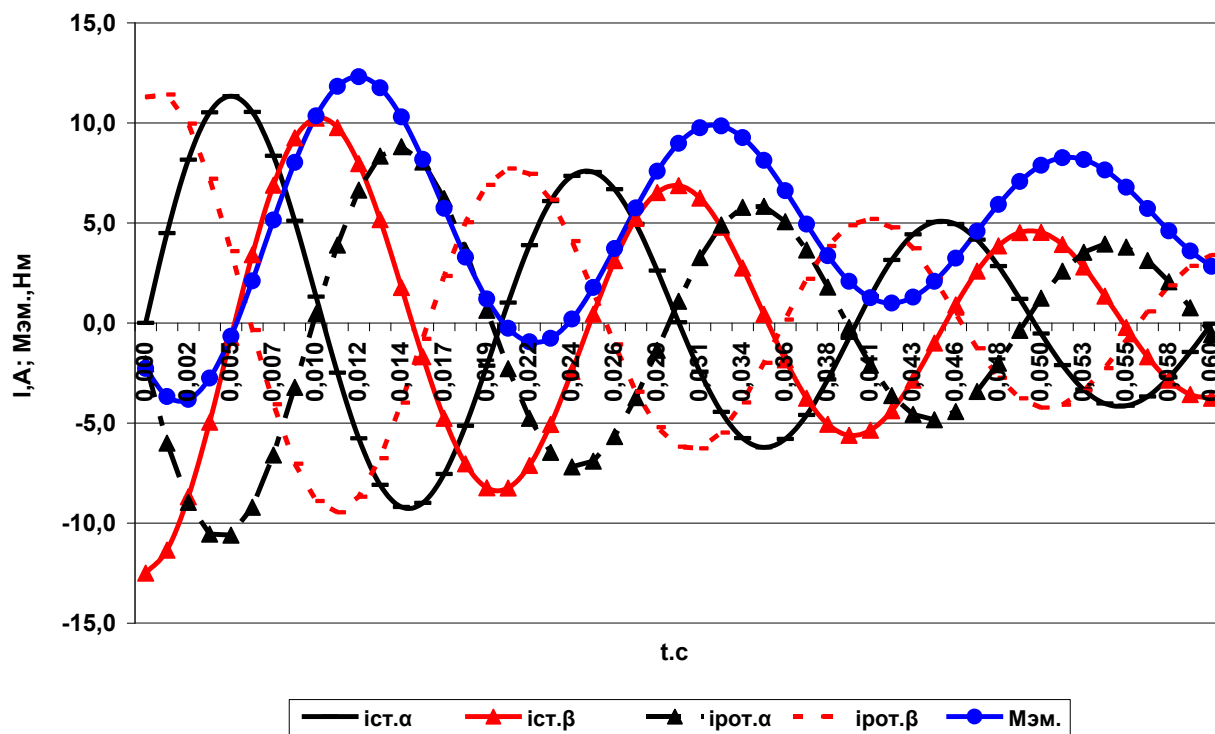


Рисунок 3.1- Зависимости токов в статоре и роторе по осям  $\alpha$  и  $\beta$ , электромагнитного момента при переходном процессе

На рис. 3.1 представлены зависимости токов в статоре и роторе по осям  $\alpha$  и  $\beta$  от времени, зависимость электромагнитного момента от времени при переходном процессе. Из графиков видно, что токи в роторах по осям  $\alpha$  и  $\beta$  находятся в противофазе с соответствующими токами статора. Токи статора и ротора по оси  $\beta$  отстают от аналогичных токов по оси  $\alpha$  на угол  $90^\circ$ , что соответствует математической модели установки и свидетельствует об ее адекватности. Из графиков (рис.3.1) видно, что в первые два-три периода токи в статоре и роторе по осям  $\alpha$  и  $\beta$  имеют максимальные (ударные) значения, что и обуславливает максимальные значения электромагнитного момента.

### 3.3. Исследование взаимосвязанных электромагнитных, электромеханических и динамических процессов в комплексе

Для оценки влияния изменения электромагнитных параметров генератора на показатели, которые характеризуют электромагнитный и электромеханический переходный процесс в машине ( $I_{уд.s}$ ,  $I_{удг}$ ,  $\dot{\eta}$ ) и отыскания функциональных зависимостей между ними в диапазоне изменения параметров был применен метод планирования эксперимента [59, 60];

В качестве переменных факторов приняты:

- активное сопротивление ротора при 13 % изменении его величины (фактор  $X_1$ ), базовое значение 5,1 Ом;
- активное сопротивление статора при 8 % изменении его величины (фактор  $X_2$ ), базовое значение 3,25 Ом;
- напряжение, подаваемое на обмотку подвозбудителя при 6,5 % изменении его величины (фактор  $X_3$ ), базовое значение 46 В;
- момент инерции  $J$  при 46% изменении его величины (фактор  $X_4$ ), базовое значение момента инерции -  $3,1 * 10^{-3}$  кг\*м<sup>2</sup>;
- скорость вращения ротора  $\omega_{вр}$ , при 20% изменении его величины (фактор  $X_5$ ), базовое значение скорости вращения ротора – 127,5 рад/с.

За целевые функции приняты:

- ударные значения токов статора по осям  $\alpha$  и  $\beta$ , соответственно,  $i_{уд.\alpha}^s$ ,  $i_{уд.\beta}^s$ ;
- ударные значения токов ротора по осям  $\alpha$  и  $\beta$ , соответственно,  $i_{уд.\alpha}^r$ ,  $i_{уд.\beta}^r$ ;
- среднее значение тока подвозбудителя  $I_{ср}$ ;
- действующее значение выходного напряжения  $U_{вых.}$ ;
- КПД ( $\eta$ ) машины.

Согласно методу ортогонального центрального композиционного планирования при пяти независимых переменных проведение 32 экспериментов [2, 3, 61].

Метод планирования эксперимента (МПЭ) используется при наличии математической модели перебором параметров ЭМПЭ. Изменение одного параметра при неизменных других параметрах машины не дает возможности найти нужное соотношение. МПЭ позволяет правильно провести эксперимент и обеспечивает уменьшение числа опытов.

Переход от реальных переменных  $R, U, \omega, J$  к относительным  $X_1 \dots X_5$  производится согласно [2, 3]. В табл.3.2 приведены показатели планирования эксперимента объекта исследования.

По полученным значениям целевых функций (эксперименты 1-32) построена квадратичная модель вида

$$Y_k = b_{k0} + \sum_{i=1}^5 (b_{ki} * X_i) + \sum_{(i)} (b_{kij} * X_i * X_j) + \sum_{(i)} (b_{kij} * X_i), \quad (3.6)$$

где  $k=1,2,\dots,12$ ;

$$Y_1 = i_{y\delta.\alpha}^s;$$

$$Y_2 = i_{y\delta.\beta}^s;$$

$$Y_3 = i_{y\delta.\alpha}^r;$$

$$Y_4 = i_{y\delta.\beta}^r;$$

$$Y_5 = I_{\text{возб.}};$$

$$Y_6 = U_{\text{ВВК}};$$

$$Y_7 = \eta;$$

$b_{k0}, b_{ki}, \dots, b_{kij}$  – коэффициенты полинома..

Расчет коэффициентов полинома проведен согласно [2, 3]. В табл. 3.3 приведены расчетные коэффициенты полиномов.

На рис.3.7-3.18 приведены кривые, характеризующие переходный процесс и функциональную связь между различными факторами, определяющие этот процесс в электротехническом комплексе. Отсев незначимых коэффициентов полиномов и проверка адекватности модели (2.2 - 2.10) не проводился, так как



дисперсия воспроизводимости равна нулю и поставленная задача решалась как динамическая.

Средняя ошибка аппроксимации рассчитывалась по формуле

$$\Delta Y_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{Y}_i - Y_i)}{N}, \quad (3.7)$$

где  $\bar{Y}_i$  - рассчитанные по полиномиальной модели значения функции цели;

$Y_i$  - рассчитанные по модели (2.2 - 2.10) те же функции цели;

$N=32$  – количество опытов.

Согласно [2, 3, 61] полином (3.6) аппроксимируем модель (2.2 - 2.10) с достаточной точностью, если значения  $Y$ , рассчитанные по (2.2 - 2.10) отличаются от значений  $\bar{Y}$ , рассчитанные для каждого уравнения, более чем на (5-10) %.

В табл. 3.3 приведены значения средних ошибок аппроксимации целевых функций, которые не превышают предельно-допустимого предела для средних ошибок [2, 3]. На основании вышеизложенного, для ориентировочных расчетов возможна замена полиномом вида (3.6) модели (2.2 - 2.10).

По результатам расчетов проведена оценка влияния параметров на динамические характеристики машины. Наибольшее влияние на величины целевых функций оказывают величины активного сопротивления ( $R_r$ ) ротора.

На величину ударных токов статора и ротора наибольшее влияние оказывает активные сопротивления соответствующих частей машины, наименьшее - момент инерции ротора.

Момент инерции оказывает наименьшее влияние на величину КПД.

На рис. 3.2 представлены зависимости  $U_{\text{вых.}}(J)$  при различных значениях сопротивления ротора  $R_r$ . Анализ кривых позволяет сделать заключение о незначительном влиянии величины момента инерции на выходное напряжение электромеханического преобразователя и значительном влиянии величины активного сопротивления ротора  $R_r$  на  $U_{\text{вых.}}$ .

На рис. 3.3 представлены зависимости  $U_{\text{вых.}}(\omega_{\text{вращ.}})$  при различных значениях момента инерции ротора  $J$ . Анализ кривых показывает, что влияние величины скорости вращения  $\omega_{\text{вращ.}}$  на величину  $U_{\text{вых.}}$  существенно, особенно с изменением величины момента инерции  $J$ . Поэтому для стабилизации выходного напряжения при изменении частоты вращения ротора необходим стабилизатор напряжения, который установлен в исследуемой системе.

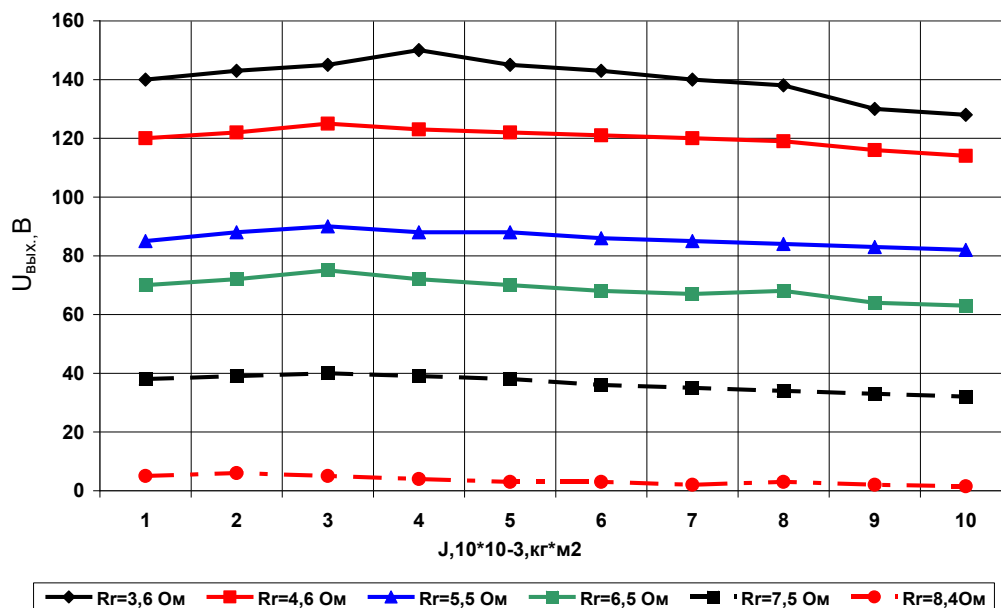


Рисунок 3.2- Зависимости выходного напряжения от момента инерции системы при различных значениях сопротивления ротора

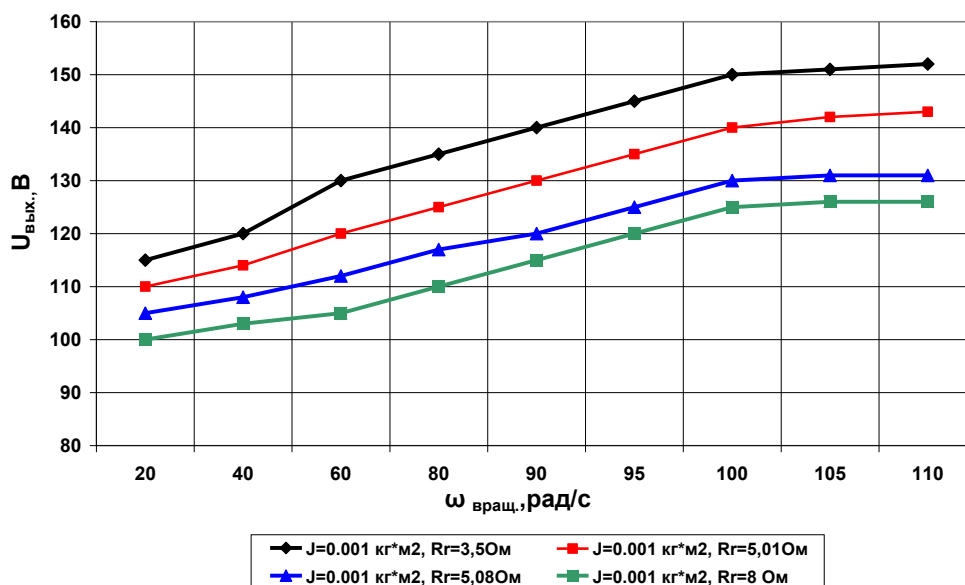


Рисунок 3.3 - Зависимости выходного напряжения от скорости вращения при различных значениях момента инерции системы

Таблица 3.2 - Показатели планирования эксперимента на объекте исследования №1

№№ ОПЫТОВ	Переменные параметры										Целевые функции						
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	Y <sub>5</sub>	Y <sub>6</sub>	Y <sub>7</sub>
	R <sub>r</sub>	R <sub>s</sub>	U <sub>v</sub>	J	ω <sub>вр</sub>						$i_{y\delta,\alpha}^s$	$i_{y\delta,\beta}^s$	$i_{y\delta,\alpha}^r$	$i_{y\delta,\beta}^r$	I <sub>возб.</sub>	U <sub>вых.</sub>	η
	Ом	Ом	В	кг*м <sup>2</sup>	рад/с						А	А	А	А	А	В	
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>
1	4,5	3	49	1,57	102	-1	-1	+1	-1	-1	9,7	12,1	-9,9	-9,8	5,2	146	0,76
2	4,5	3,5	49	1,57	153	-1	+1	+1	-1	-1	9,8	12,2	-10,1	-10,0	5,3	142	0,78
3	5,8	3,5	43	1,57	102	+1	+1	-1	-1	-1	8,6	10,9	-6,8	-7,1	4,8	139	0,78
4	4,5	3,5	43	1,57	102	-1	+1	-1	-1	-1	9,6	12,1	-10,1	-10,1	5,5	145	0,77
5	4,5	3	43	1,57	153	-1	-1	-1	-1	+1	11,3	11,6	-11,6	-10,8	6,2	115	0,75
6	5,8	3	49	1,57	153	+1	-1	+1	-1	+1	8,5	10,7	-7,2	-7,3	5,1	138	0,79
7	4,5	3,5	49	1,57	102	-1	+1	+1	-1	-1	9,8	12,3	-9,8	--9,7	5,3	142	0,79
8	4,5	3,5	49	1,57	102	-1	+1	+1	-1	-1	11,5	11,8	-11,1	-10,9	6,1	114	0,77
9	4,5	3	43	1,57	153	-1	-1	-1	-1	+1	11,3	11,5	-10,9	-11,2	6,2	151	0,77
10	5,8	3	49	4,52	153	+1	-1	+1	+1	+1	8,6	10,8	-6,7	-7,0	4,9	139	0,75

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>15</i>	<i>16</i>	<i>17</i>	<i>18</i>
11	4,5	3,5	43	1,57	10	-1	+1	-1	-1	-1	8,5	9,7	-8,7	-9,7	5,3	138	0,77
12	5,8	3,5	43	1,57	102	+1	+1	-1	-1	-1	8,4	9,2	-7,9	-10,9	5,4	81	0,77
13	4,5	3,5	43	4,52	102	-1	+1	-1	+1	-1	11,5	11,7	-11,2	-11,2	5,0	116	0,75
14	4,5	3	49	4,52	153	-1	-1	+1	+1	+1	11,3	11,6	-11,6	-7,0	6,2	116	0,76
15	4,5	3	43	1,57	102	-1	-1	-1	-1	-1	11,4	11,7	-10,9	-9,7	6,1	112	0,76
16	5,8	3,5	43	1,57	102	+1	+1	-1	-1	-1	8,4	9,8	-6,9	-8,9	4,8	135	0,8
17	5,8	3	43	4,52	153	+1	-1	-1	+1	+1	8,5	9,7	-8,7	-10,8	5,3	140	0,79
18	5,8	3	49	1,57	153	+1	-1	-1	-1	+1	8,4	9,2	-7,9	-10,9	5,2	82	0,8
19	5,8	3,5	49	4,52	153	+1	+1	+1	+1	+1	8,5	9,4	-8,8	-11,8	5,4	141	0,77
20	5,8	3	49	1,57	102	+1	-1	+1	-1	-1	9,9	10,4	-7,8	-7,2	5,1	115	0,79
21	4,5	3	43	4,52	153	-1	-1	-1	+1	+1	11,4	11,7	-11,2	-9,7	5,5	150	0,78
22	4,5	3	49	4,52	102	-1	-1	+1	+1	-1	11,3	11,6	-8,8	-9,0	6,1	115	0,79
23	4,5	3,5	49	4,52	102	-1	+1	+1	+1	-1	11,4	11,7	-11,0	-7,9	6,2	113	0,77
24	5,8	3,5	43	4,52	153	+1	+1	-1	+1	+1	10,1	11,8	-8,7	-8,9	5,4	79	0,78
25	4,5	3,5	49	1,57	153	-1	+1	+1	-1	+1	11,2	9,8	-11,3	-10,9	6,3	113	0,76
26	5,8	3	49	1,57	102	+1	-1	+1	-1	-1	8,6	9,9	-8,6	-8,9	5,2	83	0,8

Продолжение табл.3.2

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>15</i>	<i>16</i>	<i>17</i>	<i>18</i>
27	5,8	3,5	49	1,57	102	+1	+1	+1	-1	-1	8,7	10,1	-7,8	-10,9	5,1	82	0,79
28	5,8	3,5	49	4,52	153	+1	+1	+1	+1	+1	9,9	10,6	-8,7	-7,9	5,3	78	0,79
29	5,8	3	49	4,52	102	+1	-1	+1	+1	-1	10,1	10,1	-8,8	-11,7	5,8	76	0,81
30	5,8	3,5	43	4,52	102	+1	+1	-1	+1	-1	9,8	8,9	-8,4	-7,6	5,4	75	0,78
31	4,5	3	43	4,52	153	-1	-1	-1	+1	+1	9,0	11,9	-11,0	-11,0	5,7	112	0,77
32	4,5	3	43	4,52	153	-1	-1	-1	+1	+1	11,5	10,3	-11,1	-9,5	4,8	151	0,78

Таблица 3.3 - Значения коэффициентов и средней ошибки аппроксимации для целевых функций

$b_{ki}$	$Y_i$						
	$i_{y\delta,\alpha}^s$	$i_{y\delta,\beta}^s$	$i_{y\delta,\alpha}^r$	$i_{y\delta,\beta}^r$	$I_{\text{возб.}}$	$U_{\text{вых.}}$	$\eta$
	A	A	A	A	A	B	
$b_{k0}$	9,886	9,61	9,375	9,124	24,5	100,4	0,775
$b_{k1}$	0,021	0,017	0,048	0,051	0,76	-0,265	0,15
$b_{k2}$	-1,22	-0,98	-1,4	-1,24	-2,051	-15,9	2,1
$b_{k3}$	-0,05	0,01	0,71	0,82	0,24	-0,71	2,3
$b_{k4}$	0,071	0,068	0,08	0,079	2,4	-0,261	0,02
$b_{k5}$	0,071	0,069	0,014	0,02	2,25	-0,379	0,3
$\Delta Y_{\text{cp.}}$	2,1	1,58	0,898	1,1	2,21	4,8	3,65

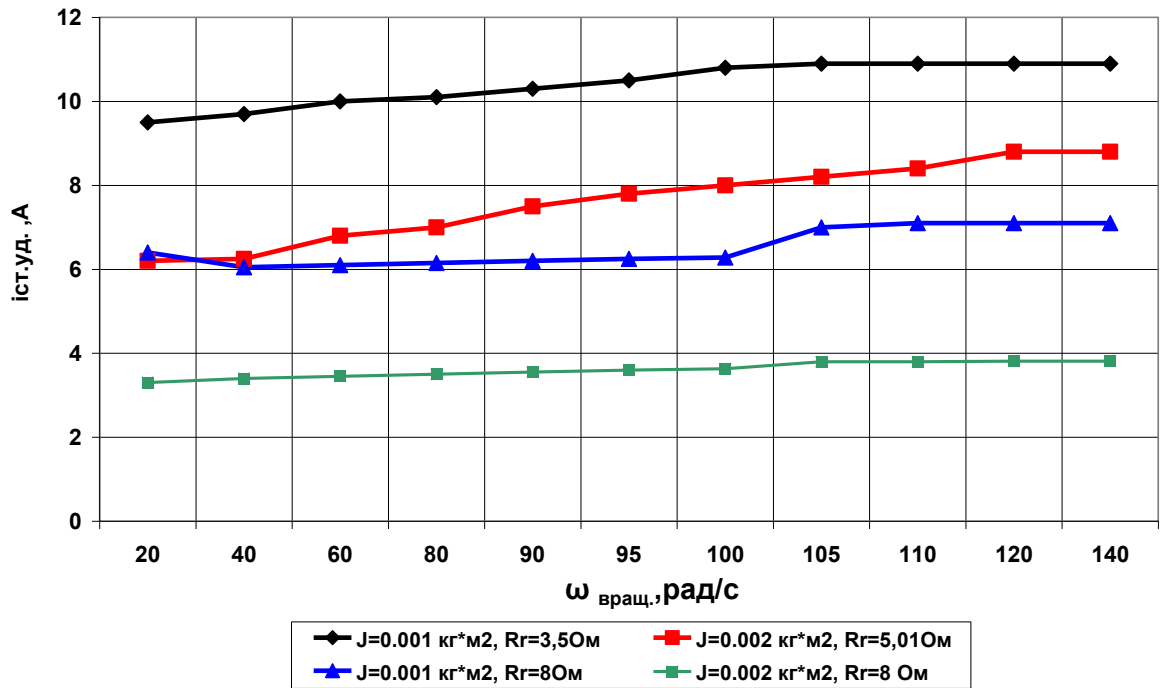


Рисунок 3.4- Зависимости ударного тока обмотки статора по оси  $\alpha$  от скорости вращения

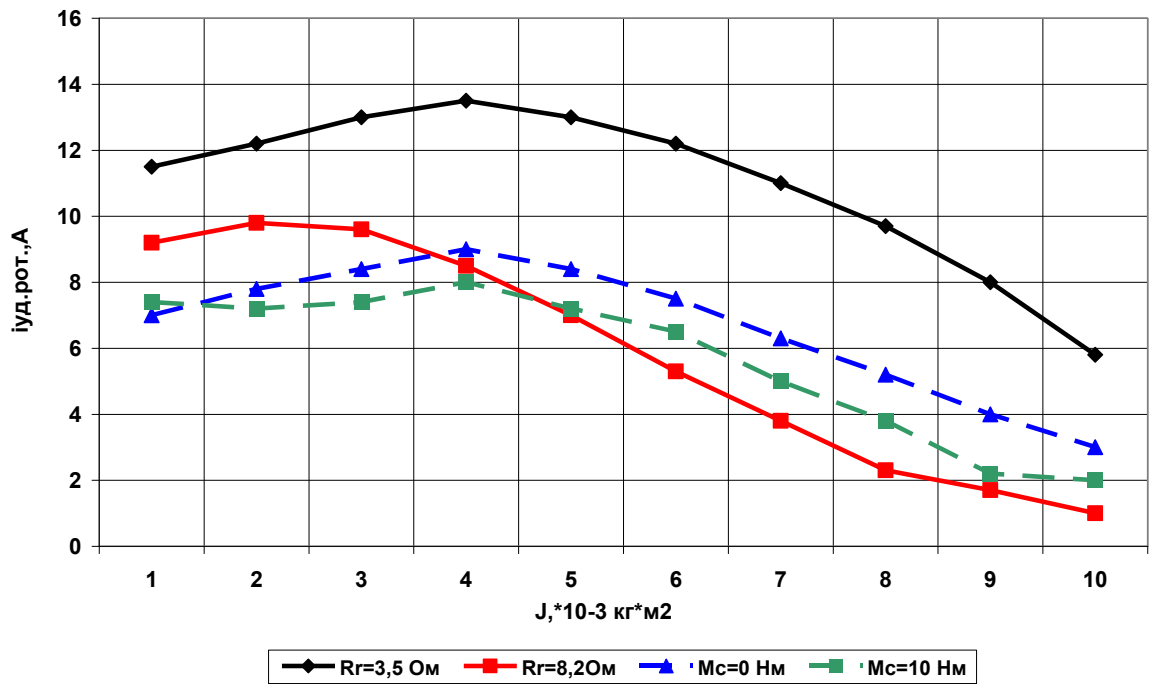


Рисунок 3.5 - Зависимости ударного тока обмотки ротора по оси  $\alpha$  от момента инерции при  $R_r=var$ ,  $M_c=var$

Представленные на рис. 3.4 зависимости  $i_{y\delta.\alpha}^s(\omega_{\text{вращ.}})$  при  $J=\text{var}$  подтверждает положение о том, величина момента инерции не оказывает существенного влияния на величину ударного тока статора.

Представленные на рис. 3.5  $i_{y\delta.\alpha}^r(J)$  при  $R_r=\text{var}$ ,  $M_c=\text{var}$  дают основание сделать вывод о том, что активное сопротивление ротора и момент сопротивления всей системы влияют на изменение электромагнитных нагрузок, что оказывает влияние на величину ударного тока ротора. Следует также отметить, что изменение величины момента сопротивления приводит к изменению механической нагрузки на валу, оказывающее существенное влияние на обмен энергией между машиной и сетью.

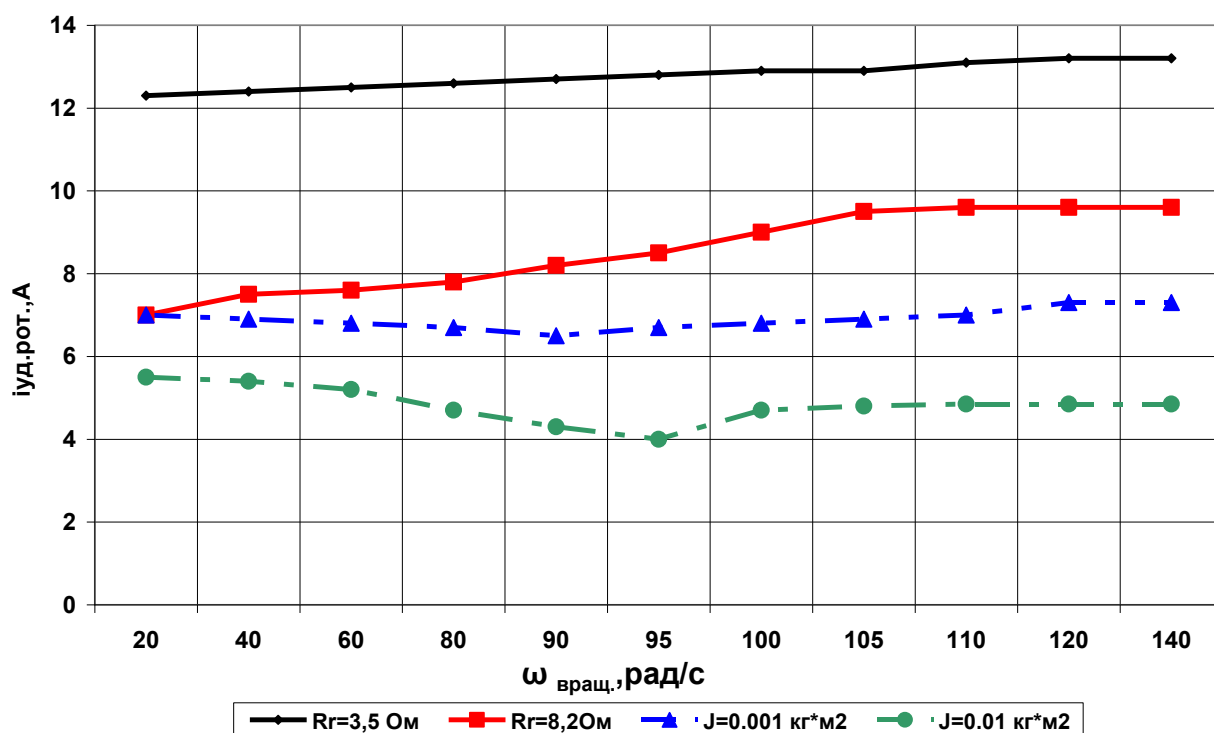


Рисунок 3.6 - Зависимости ударного тока обмотки ротора по оси  $\alpha$  от скорости вращения при  $R_r=\text{var}$ ,  $J=\text{var}$



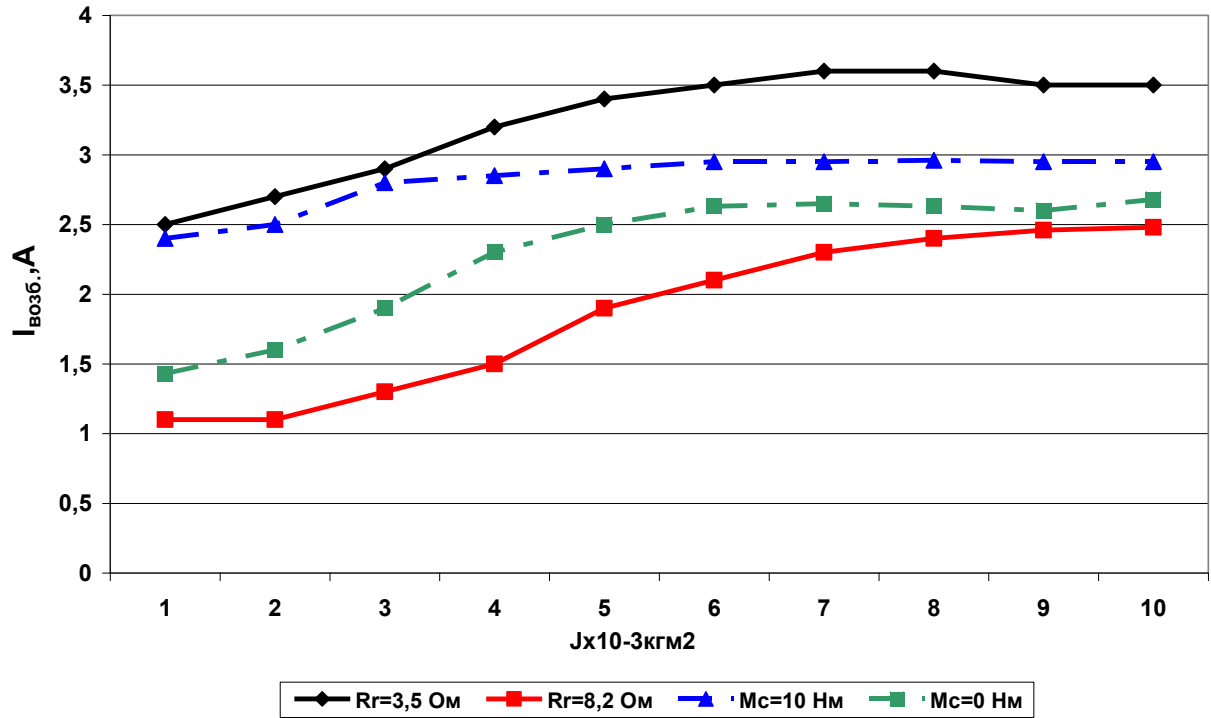


Рисунок 3.7- Зависимости тока возбуждения от момента инерции при  $R_r = \text{var}$ ,  
 $M_c = \text{var}$

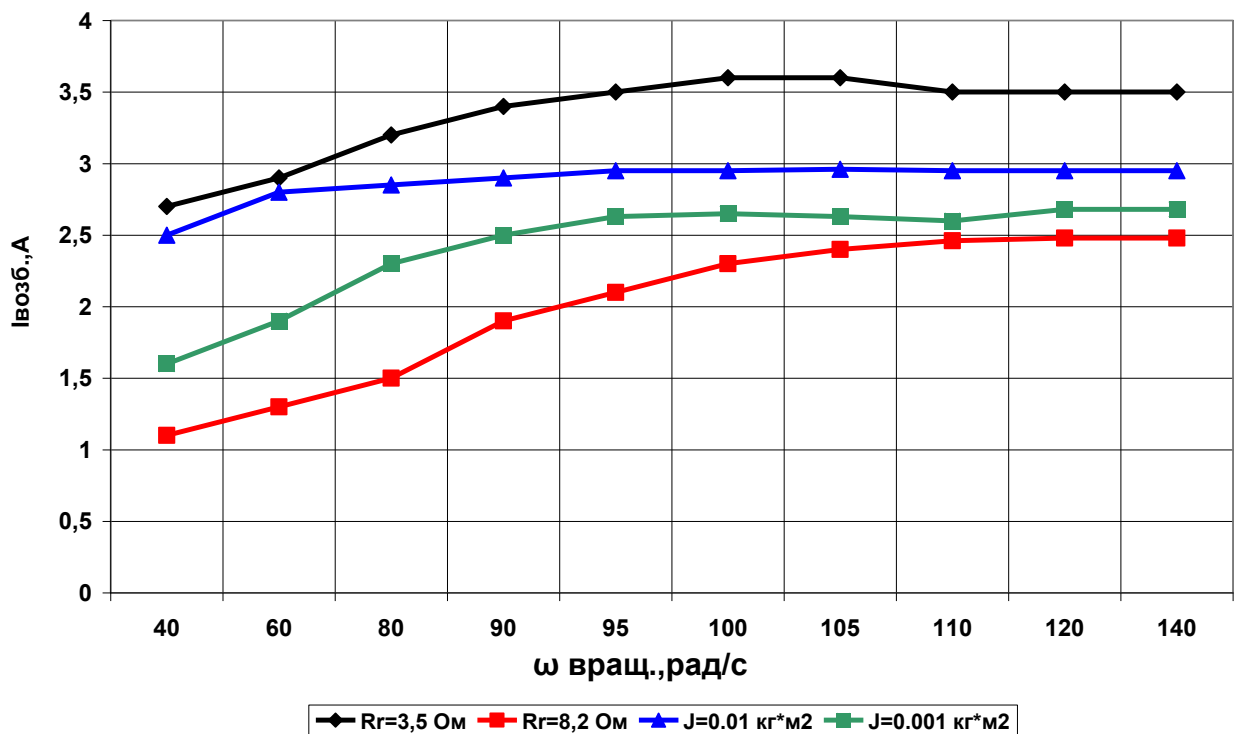


Рисунок 3.8- Зависимости тока возбуждения от скорости вращения при  $R_r = \text{var}$ ,  
 $J = \text{var}$

На рис.3.6 представлены зависимости  $i_{уд.\alpha}^r (\omega_{вращ.})$  при различных значениях сопротивления ротора и момента инерции. Анализ характеристик показывает, что момент инерции оказывает слабое влияние на величину ударного тока ротора.

Представленные на рис. 3.7 графики характеризуют зависимости тока возбуждения возбудителя от момента инерции системы при изменяющихся величинах сопротивления ротора и момента сопротивления.

На рис 3.8 представлены зависимости тока возбуждения от скорости вращения при  $R_r=var$ ,  $J=var$ . Анализ зависимостей показывает, что в электротехническом комплексе существует определенное значение скорости вращения, при которой увеличение тока возбуждения замедляется.

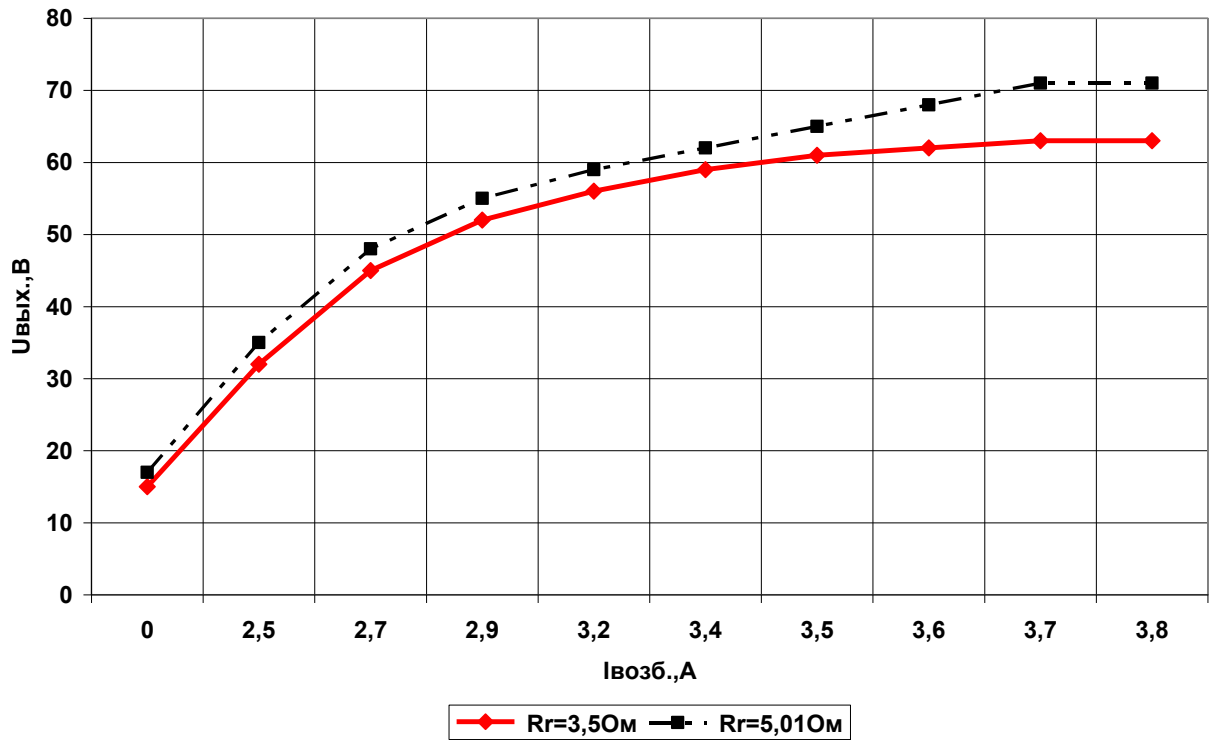


Рисунок 3.9- Зависимости выходного напряжения от тока возбуждения при  $R_r=var$

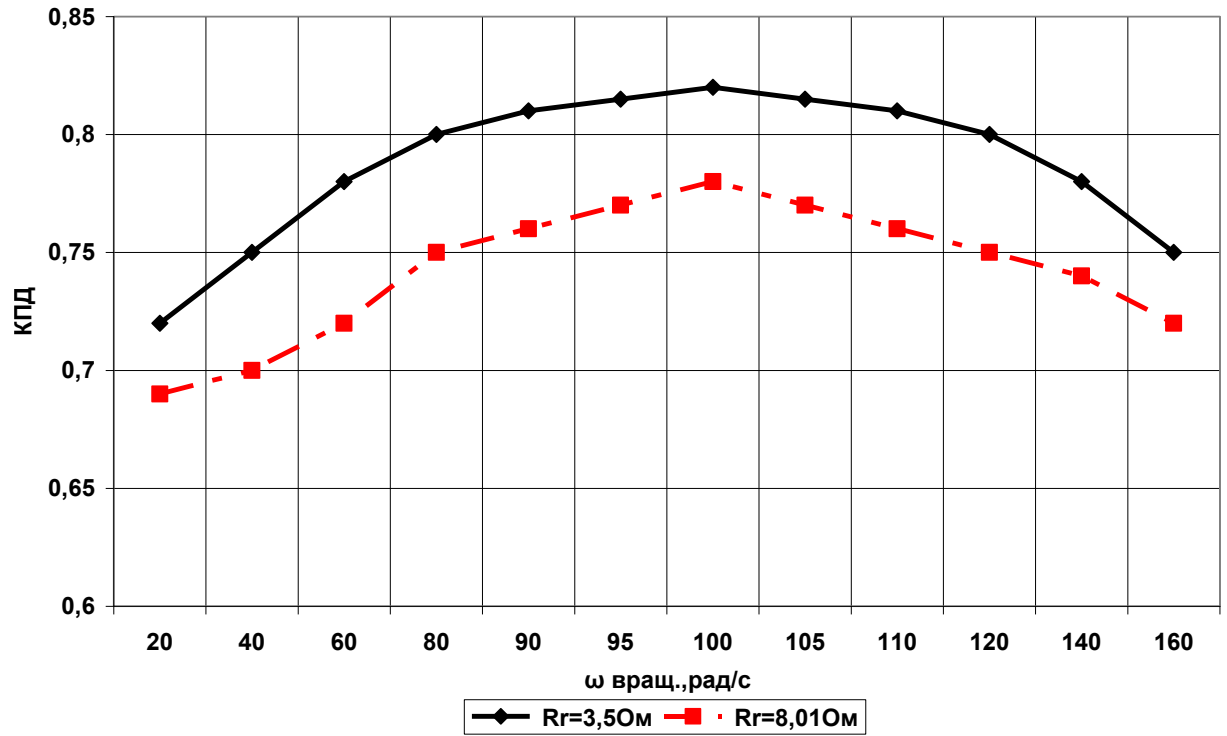
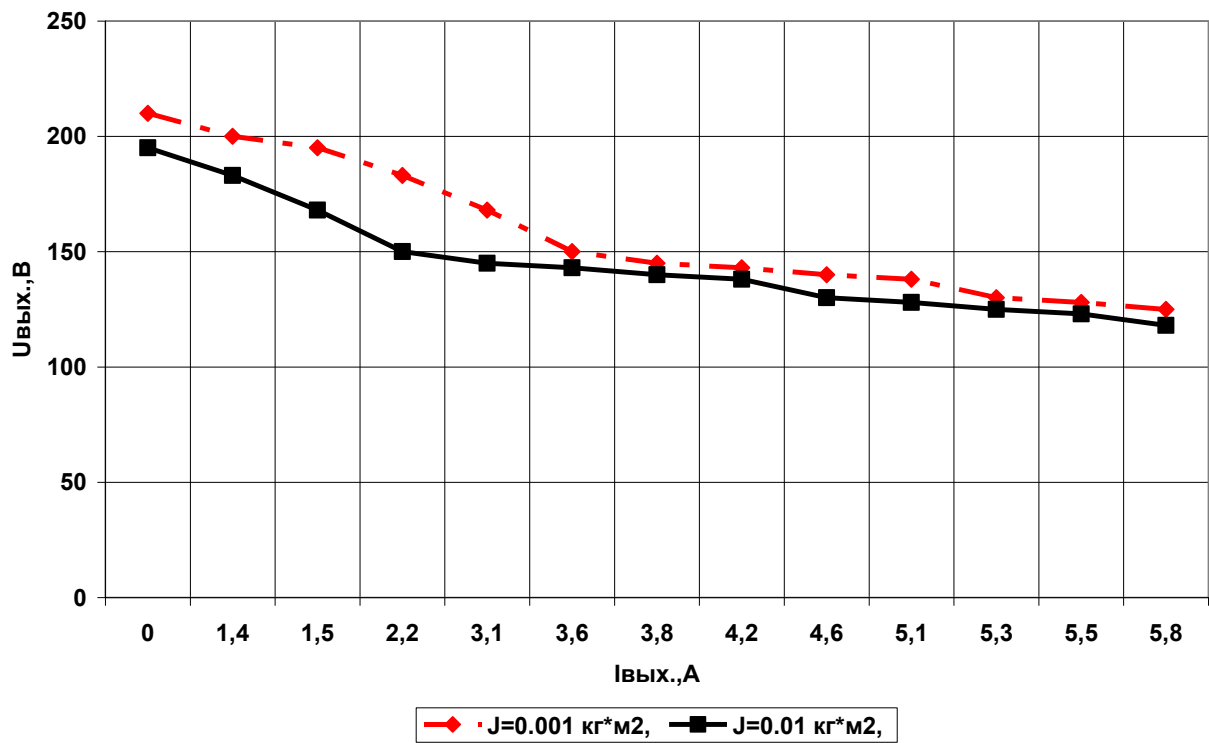
Рисунок 3.10- Зависимости КПД от скорости вращения при  $Rr=var$ ,  $J=var$ 

Рисунок 3.11- Внешняя характеристика

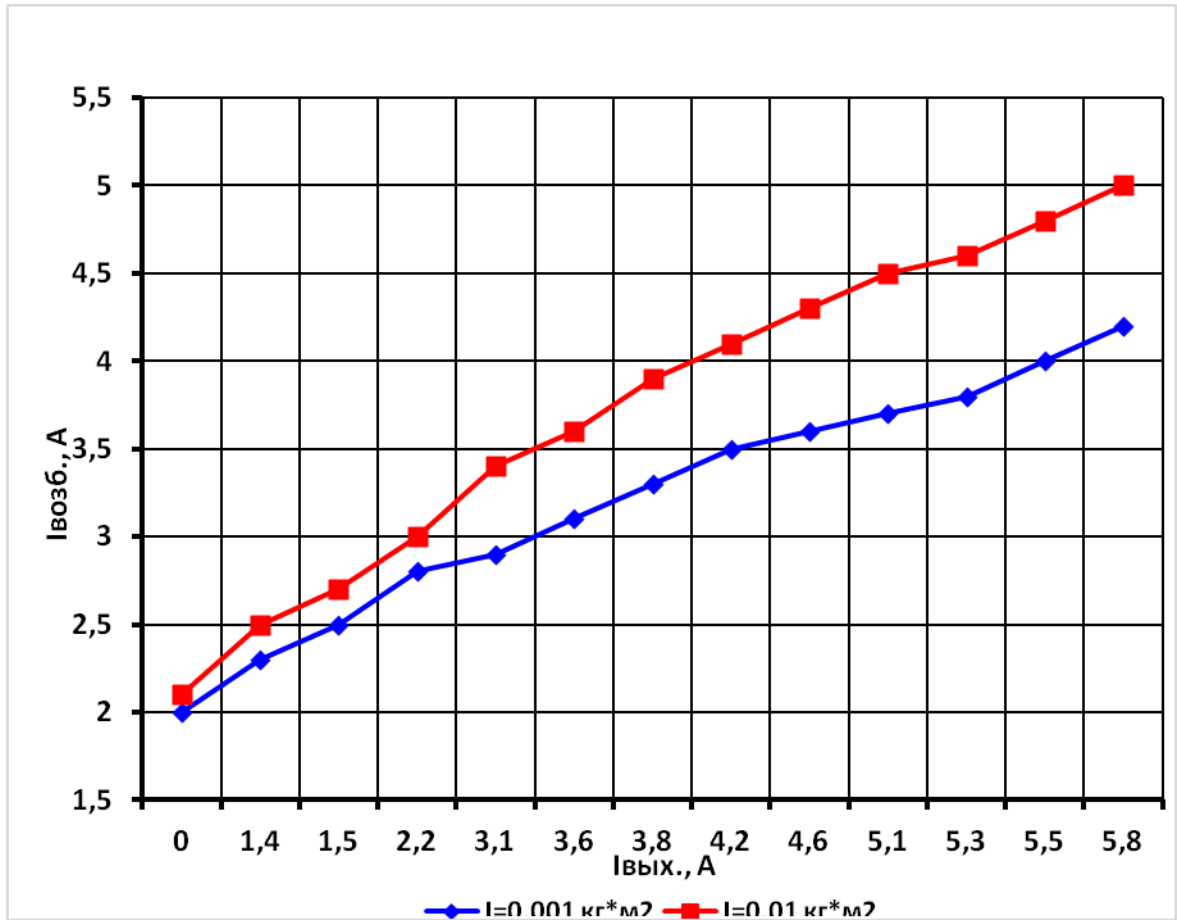


Рисунок 3.12- Регулировочная характеристика

На рис. 3.9, 3.11, 3.12 представлены, соответственно, нагрузочная, внешняя и регулировочная характеристики исследуемой системы.

На рис. 3.10 зависимость КПД машины от скорости вращения. Анализ данной характеристики показывает, что увеличение КПД машины при увеличении скорости вращения ротора происходит до определенной скорости, а за тем убывает.

### 3.4 Выводы по третьей главе

1. Построена математическая модель для расчета электромагнитных и электромеханических переходных процессов в электротехническом комплексе на основе обобщенного электромеханического преобразователя энергии, позволяющая решать вопросы синтеза электротехнических комплексов с

заданными статическими и динамическими свойствами: проводить исследование динамических характеристик переходных процессов с нелинейными коэффициентами, описывающие поведение системы электроснабжения, при различных значениях  $J$ ,  $R_r$ ,  $\omega_{\text{вращ}}$ . Модель показывает, что с ростом тока нагрузки влияние величины момента инерции ( $J$ ) установки на величину падения напряжения и, соответственно, на величину выходного напряжения снижается.

2. В ходе математического моделирования показано, что наибольшее влияние на величины ударных токов статора, на величины ударных токов ротора и на величину КПД установки оказывает величина активного сопротивления ротора  $R_r$ . Для оптимизации параметров установки целесообразно величину активного сопротивления ротора принять среднее значение в размере 5,8 Ом.

## ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

### 4.1 Общие сведения о программе и методике эксперимента и экспериментальном стенде

В целях подтверждения основных теоретических положений были изготовлен экспериментальный образец аксиального бесконтактного генератора постоянного тока мощностью 1,5 кВт и выполнен комплекс экспериментальных исследований. В экспериментальном образце обмотки якоря подвозбудителя, якоря возбудителя и якоря основного генератора выполнены в виде девятифазных обмоток.

В программу экспериментальных исследований входило:

- определение параметров машины;
- построение электромеханических характеристик;
- определение КПД.

Ставилась задача смоделировать работу системы электроснабжения в реальных условиях, оценить влияние входных параметров на выходные.

Программа эксперимента включает в себя:

- разработку рационального экспериментального стенда, позволяющего имитировать работу генератора в условиях, близких к реальным;
- определение параметров экспериментальных образцов;
- снятие зависимости  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{ипт}})$  при  $n_{\text{вращ}} = \text{const}$ ;
- снятие зависимости  $U_{\text{вых}} = f(n_{\text{вращ}})$  при  $U_{\text{ипт}} = \text{const}$ ;
- снятие зависимости  $U_{\text{вых}} = f(I_{\text{возб}})$  при  $n_{\text{вращ}} = \text{const}$  и  $U_{\text{ипт}} = \text{const}$ .

Определение мощности на входах генератора производилось методом определения мощности, потребляемой приводным асинхронным двигателем (АД) с учетом потерь в этом двигателе и электрической мощности, потребляемой якорной цепью питания машины от источника постоянного тока (ИПТ). Определение мощности на выходе проводилось также прямым методом: ваттметром в цепи нагрузки [2, 3].

Для того чтобы смоделировать работу системы в реальных условиях и обеспечить качественное измерение экспериментальных данных, предусмотренных программой эксперимента, необходимо чтобы экспериментальный стенд удовлетворял следующим требованиям:

- обеспечение независимых друг от друга и резкопеременных колебаний поступления энергии на механический и электрический входы устройства;
- обеспечение плавного и управляемого регулирования одной из входных величин при жестко зафиксированной другой;
- обеспечение проведения эксперимента по управлению (стабилизации) выходного напряжения генератора при входных параметрах мощностей.

Электрическая схема экспериментального стенда представлена на рис. 4.1.

Стенд состоит из блока имитации вращательного движения, приводящего в движение ротор исследуемой системы, и источника постоянного тока (ИПТ), питающего якорную цепь (обмотка возбуждения) электротехнического комплекса.

Блок имитации вращательного движения (рис. 4.1) состоит из преобразователя частоты (ПЧ), питающего асинхронный двигатель серии 4А, мощностью 0,75 кВт, который с помощью ремённой передачи соединён с валом электротехнического комплекса. Преобразователь частоты позволяет изменять скорость вращения ротора в широких пределах. Блок источника постоянного тока, питающего якорную цепь электротехнического комплекса, состоит из лабораторного автотрансформатора (ТР1), двухполупериодного выпрямителя и сглаживающего фильтра.

Вольтметры V1-V2 обеспечивают контроль уровня напряжения в входной (от ИПТ) и выходной цепях электротехнического комплекса, амперметры А1-А2 – тока в тех же цепях.

Во входную и выходную цепь имеется возможность включения ваттметров.

В качестве нагрузки использовался регулируемый реостат ( $R_{\text{нагр}}$ ).

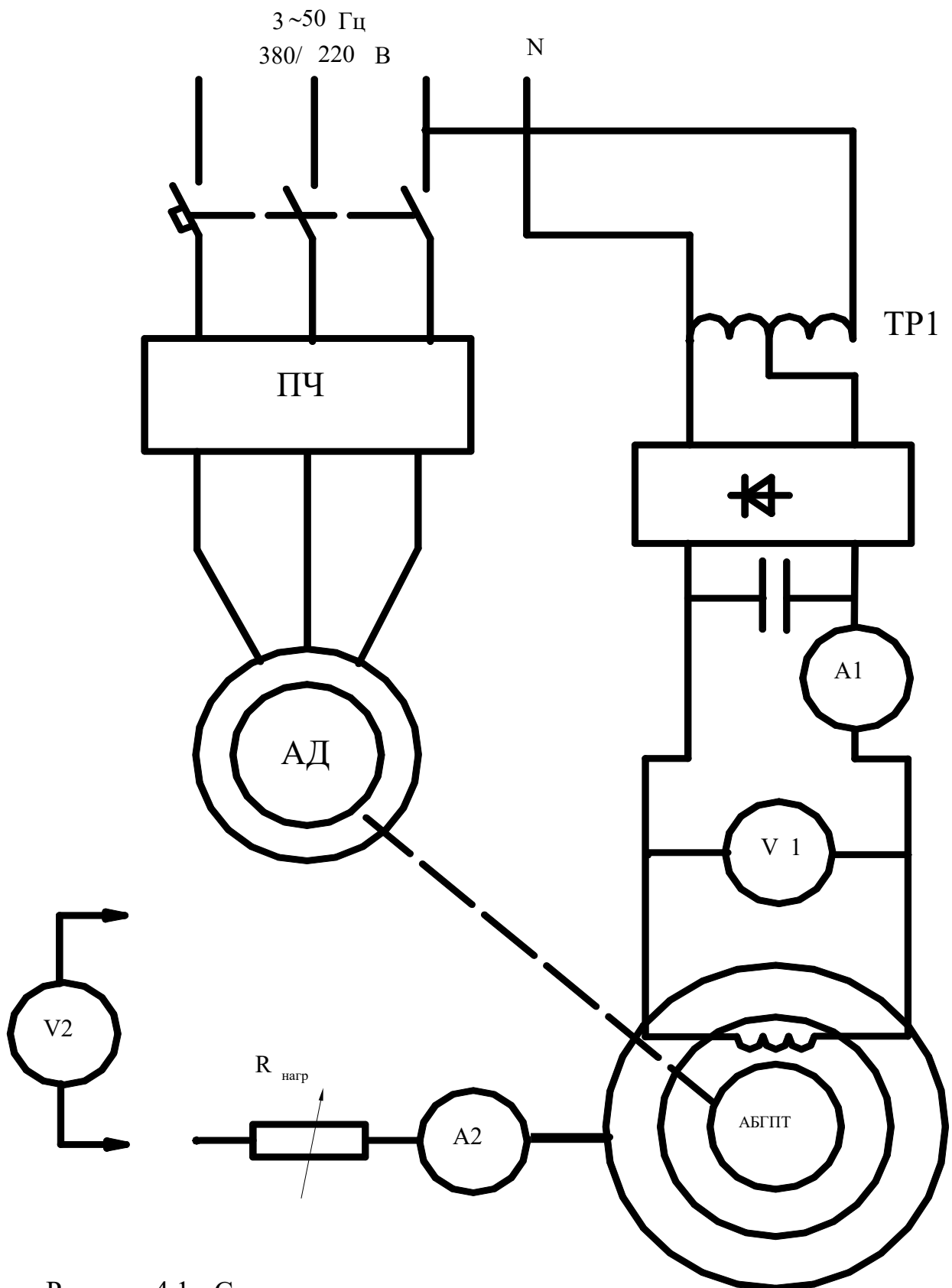


Рисунок 4.1 - Схема экспериментального стенда



## 4.2 Проведение экспериментальных исследований и их результаты

Результаты измерений параметров исследуемой системы приведены в таблице 4.1, полученные экспериментальные зависимости приведены на рисунках 4.2 – 4.4.

Таблица 4.1 - Результаты измерений параметров исследуемой системы

Якорь					Ротор				
R <sub>а</sub> , Ом	7,1	R <sub>возб</sub> , Ом	15,6	R <sub>возб.доп</sub> , Ом	11,0	R <sub>р</sub> , Ом	36,3	R <sub>р.возб.</sub> , Ом	9,2
X <sub>а</sub> , Ом	10,1	X <sub>возб</sub> , Ом	19,5	X <sub>возб.доп</sub> , Ом	16,0	X <sub>р</sub> , Ом	37,8	X <sub>р.возб.</sub> , Ом	7,1

В табл.4.1 приведены параметры частей электротехнического комплекса: R<sub>а</sub>, R<sub>возб</sub>, R<sub>возб.доп</sub>, R<sub>р</sub>, R<sub>р.возб.</sub> - активные сопротивления обмоток якоря, обмотки возбуждения якоря, дополнительной обмотки возбуждения якоря, обмотки ротора, однофазной обмотки возбуждения ротора, соответственно; X<sub>а</sub>, X<sub>возб</sub>, X<sub>возб.доп</sub>, X<sub>р</sub>, X<sub>р.возб</sub> - индуктивные сопротивления рассеяния обмоток якоря, обмотки возбуждения якоря, дополнительной обмотки возбуждения якоря, обмотки ротора, однофазной обмотки возбуждения ротора, соответственно.

Параметры измерены на изготовленном макете устройства.

Зависимости  $U_{\text{вых}} = f(n_{\text{вращ.}})$  при  $U_{\text{ипт}} = \text{const}$  и, приведенные на рис. 4.2 показывают, зависимость, типичную для генераторов постоянного тока, что подтверждает верность теоретических положений принципа работы исследуемого электротехнического комплекса.

Регулировочная характеристика  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{ипт}})$  при  $n_{\text{вращ.}} = \text{const}$  и  $R_{\Gamma} = \text{var}$  приведена на рис. 4.3. Из характеристики видно, что регулировать выходное напряжение можно путём изменения напряжения, подаваемого на обмотку возбуждения постоянного тока от ИПТ.

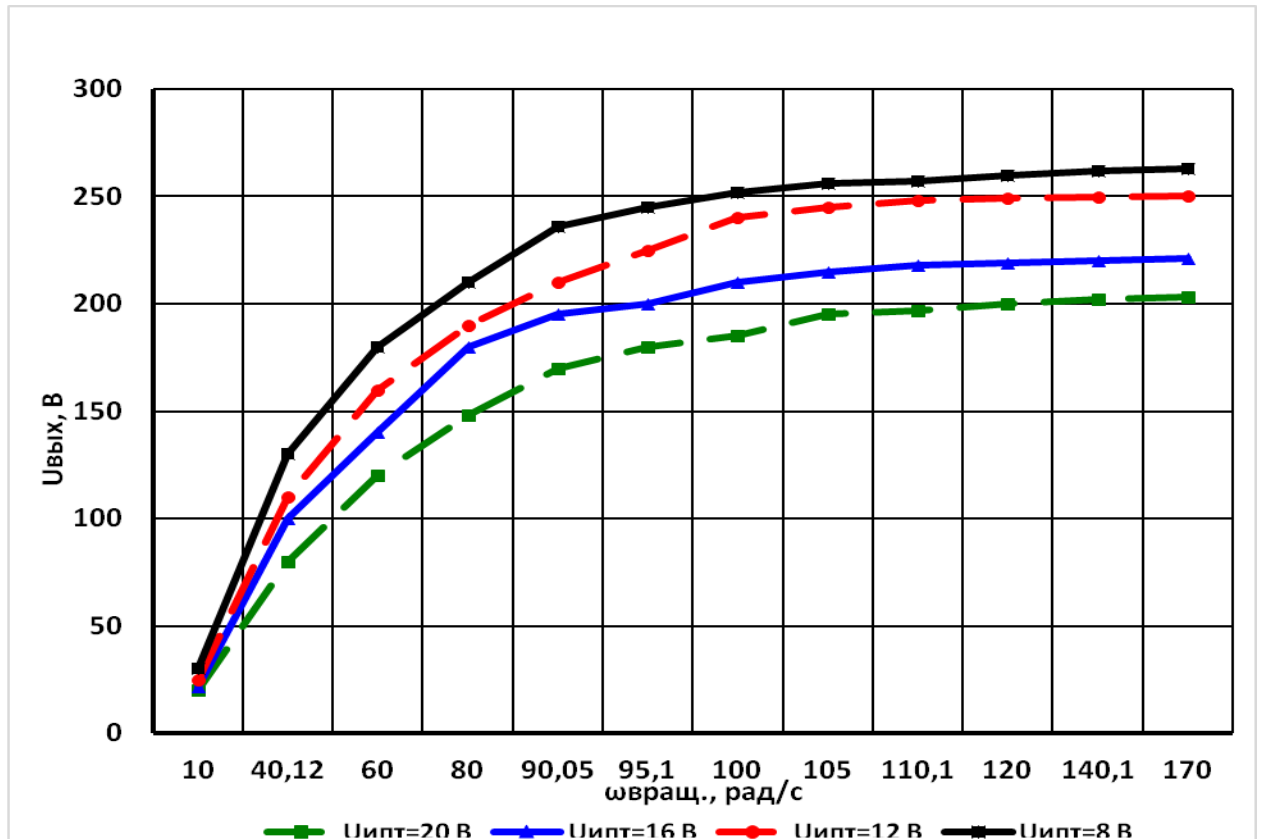


Рисунок 4.2 - Зависимость  $U_{\text{вых}}=f(n_{\text{вращ}})$  при  $U_{\text{ипт}}=\text{const}$

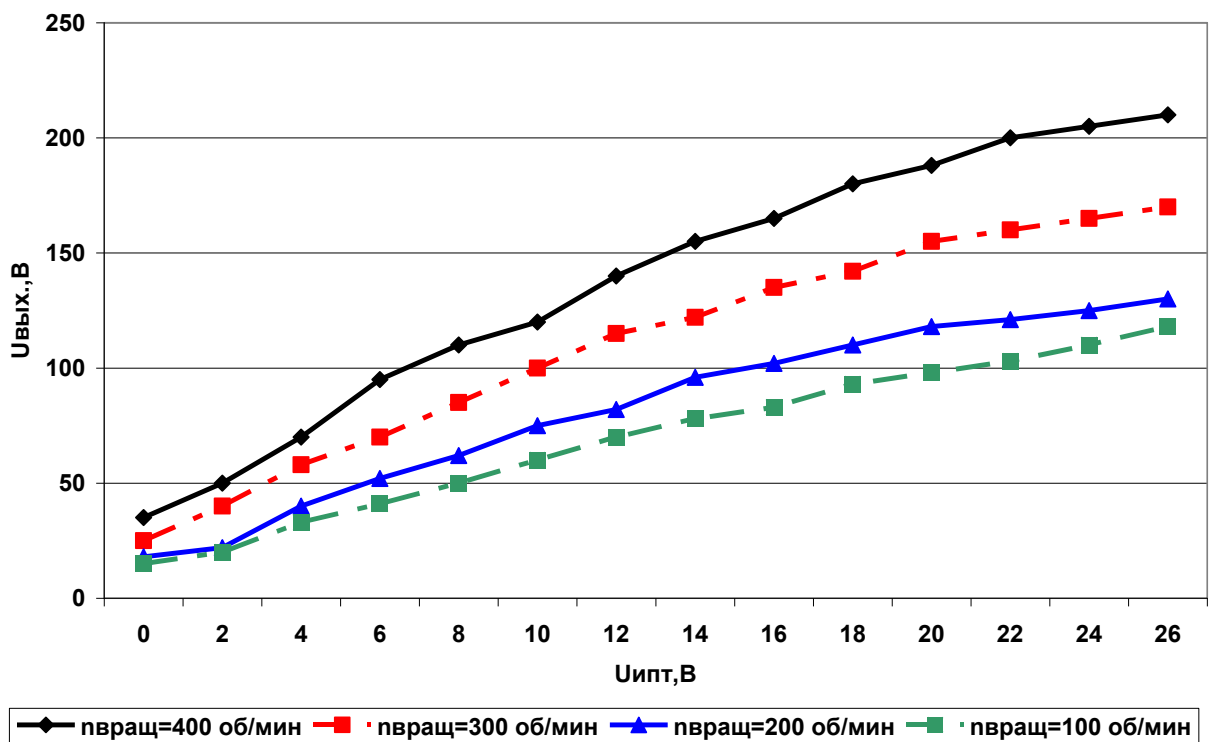


Рисунок 4.3- Регулировочная характеристика  $U_{\text{вых}}=f(U_{\text{ипт}})$  при  $n_{\text{вращ}}=\text{const}$   
 Зависимости  $U_{\text{вых}}=f(n_{\text{вращ}})$  при  $U_{\text{ипт}}=\text{const}$  приведены на рис. 4.2.

Внешняя характеристика представлена на рис. 4.4.

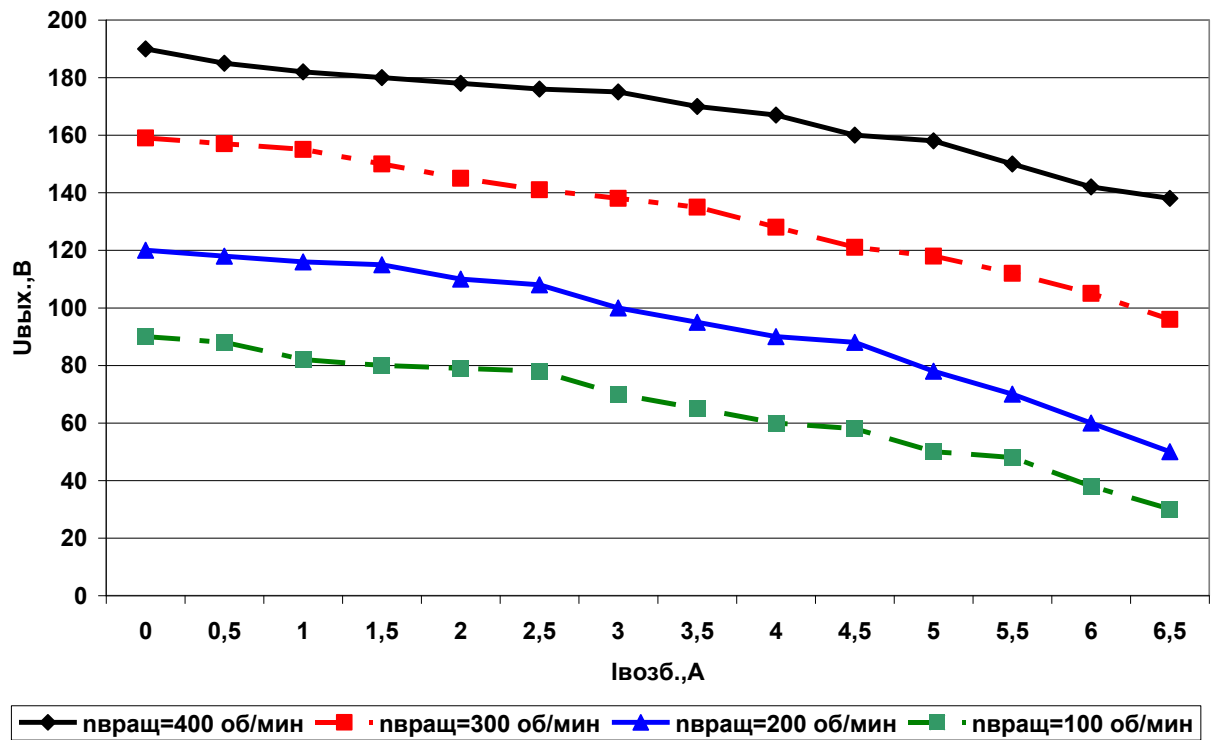


Рисунок 4.4 - Зависимость  $U_{\text{вых}}=f(I_{\text{возб}})$  при  $n_{\text{вращ}}=\text{const}$  и  $U_{\text{ипт}}=20\text{ В}$

### 4.3 Определение КПД

Как известно, для определения КПД необходимо знать уровни потребляемой мощности  $P_1$  и отдаваемой мощности  $P_2$ . Потребляемая мощность определяется как сумма полезной мощности и потерь

$$P_1 = P_2 + P_{\text{эл1}} + P_{\text{эл2}} + P_{\text{эл3}} + P_{\text{с1}} + P_{\text{с2}} + P_{\text{с3}} + P_{\text{д}} + P_{\text{мх}} \quad (4.1),$$

$$\text{где, } P_1 = P_{\text{ипт}} + P_{\text{вр}} \quad (4.2)$$

$P_{\text{ипт}}$  - электрическая мощность, поступающая от блока ИПТ;

$P_{\text{вр}}$  - механическая мощность, поступающая от блока имитации вращательного движения;

$P_{\text{эл1}}$ ,  $P_{\text{эл2}}$ ,  $P_{\text{эл3}}$  - электрические потери в статоре, роторе и обмотке возбуждения, соответственно;

$P_{C1}$ ,  $P_{C2}$ ,  $P_{C2}$  - потери в магнитопроводах статора, ротора и якоря, соответственно;

$P_D$  - добавочные потери;

$P_{MX}$  - механические потери.

Экспериментально КПД определялся как отношение измеренной электрической мощности на выходе установки к суммарной мощности, поступающей на «вход» машины.

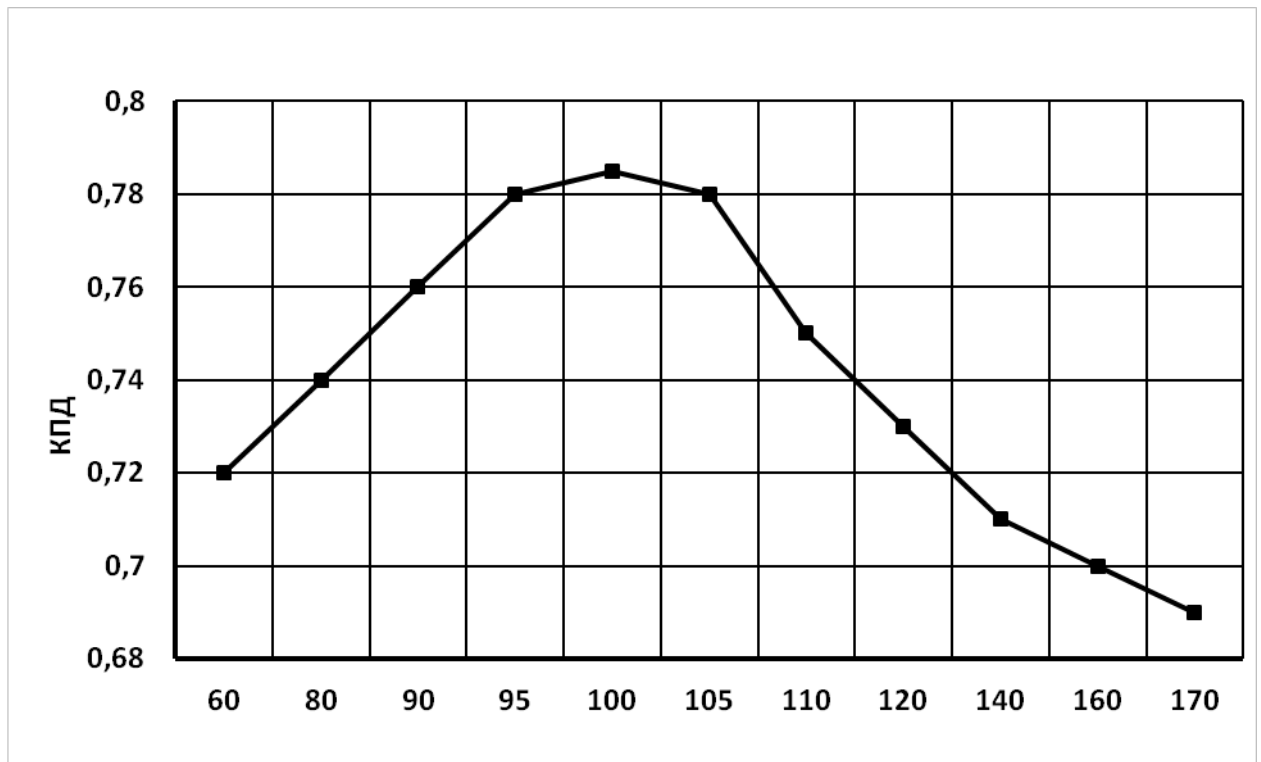


Рисунок 4.5 – Зависимость  $\eta=f(\omega)$

На рис. 4.5 показана зависимость КПД установки от скорости вращения вала машины.

Мощность, поступающая от блока ИПТ, рассчитывалась непосредственно по показаниям амперметра и вольтметра включенных в соответствующую цепь.

Мощность, поступающая от блока имитации вращательного движения рассчитывалась путем измерения мощности потребляемой приводным электродвигателем с учетом его КПД.

Основными практическими результатами экспериментальных исследований можно считать то, что экспериментально доказана работоспособность конструкции, а также возможность управления разработанной системой электроснабжения и, следовательно, возможность стабилизации её выходных параметров.

Проведенное экспериментальное исследование подтвердило работоспособность конструкции элементов системы электроснабжения, правильность теоретических положений работы, показало более высокую эффективность, поэтому её применение для обеспечения электроэнергией воздушных судов вместо серийных устройств и систем позволяет повысить эксплуатационные показатели этих систем [43].

Последнее качество разработки представляется весьма ценным для практического применения.

#### **4.4 Выводы по четвертой главе**

Экспериментально получены характеристики разработанной системы электроснабжения, которые подтверждают правильность теоретических положений работы:

- экспериментально построенные выходные характеристики позволили опытным путем определить КПД установки. КПД получен технологически, не превысил 79%. В целом полученные экспериментально характеристики близки к расчетным, погрешность в худшем случае не превышает 8%.
- установлено, что применение разработанного электротехнического комплекса в качестве источников постоянного тока в системе электроснабжения (СЭС) ВС вместо серийных позволяет существенно повысить эксплуатационные показатели СЭС ВС.
- проведенные теоретические и экспериментальные исследования подтвердили перспективность и необходимость учета всех факторов, влияющих на параметры машины, которые, в свою очередь, обуславливают характер и количественную

оценку протекания электромагнитных и электромеханических переходных процессов.

- экспериментально полученная регулировочная характеристика доказала принципиальную возможность стабилизации выходного напряжения в разработанном электротехническом комплексе.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В диссертационной работе на основе теоретических и экспериментальных исследований решена актуальная научно-техническая задача по разработке аксиального бесконтактного электротехнического комплекса постоянного тока новой конструкции для системы электроснабжения воздушного судна. В результате исследований, проведенных в работе, в результате исследований, проведенных в работе, положено начало развития теории источника электрической энергии постоянного тока для воздушных судов, включающего три электромеханических преобразователя и построенного на основе аксиального бесконтактного генератора.

Постановка проблемы объективно вытекает из необходимости по развитию исследований динамики электротехнических комплексов на базе машин аксиальной конструкции. Анализ существующих образцов систем электроснабжения показал, что они обладают недостатками, препятствующими повышению их массогабаритных показателей, предложены новые взаимосвязанные технические решения, а именно – новая конструкция системы электроснабжения, позволяющие устранить выявленные недостатки. Предложенная схема удовлетворяет всем требованиям ГОСТ Р 54073-2017.

Предложенная и теоретически обоснованная конструкция перспективной системы электроснабжения, которая удовлетворяет всем предъявленным требованиям, может быть взята за основу для создания систем электроснабжения не только для ВС, но и для других подвижных и стационарных автономных объектов.

Основные результаты и выводы по работе:

1. Проведенный анализ показал, что необходимо совершенствование существующих конструкций систем электроснабжения воздушных судов, одним из перспективных путей является разработка и исследование аксиальных электрических машин.

2. Обоснована и разработана новая конструкция электротехнического комплекса постоянного тока, состоящего из трёх электромеханических и электромагнитных преобразователей, имеющая по сравнению с известными устройствами следующие преимущества: легко реализуемая технология изготовления магнитопроводов статора и ротора, практически безотходное использование магнитных материалов, лучшие условия охлаждения, улучшение массогабаритных и энергетических показателей, существенное упрощение обмоточных работ благодаря открытой зубцовой зоне, удобство сочленения с механизмом и приводом, сравнительная простота эксплуатации и ремонта.

3. Построена математическая модель для расчета электромагнитных и электромеханических переходных процессов в электротехническом комплексе на основе обобщенного электромеханического преобразователя энергии, позволяющая решать вопросы синтеза электротехнических комплексов с заданными статическими и динамическими свойствами.

4. Исследования, проведённые на математической модели, показали, что наибольшее влияние на величину ударных токов и на величину к.п.д. оказывает величина активного сопротивления ротора  $R_r$ ;

5. Экспериментально получены характеристики разработанной системы электроснабжения, которые подтверждают правильность теоретических положений работы. Они позволили опытным путем определить КПД установки, который не превысил 79%. В целом полученные экспериментально характеристики близки к расчетным, погрешность в худшем случае не превышает 8%.

6. Установлено, что применение разработанного электротехнического комплекса в качестве источников постоянного тока в системе электроснабжения (СЭС) ВС вместо серийных позволяет существенно повысить эксплуатационные показатели СЭС ВС в части уменьшения массогабаритных показателей, улучшения качества вырабатываемой электроэнергии, упрощения технического обслуживания и ремонта, снижения стоимости производства.



7. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования подтвердили перспективность и необходимость учета всех факторов (различных значениях момента инерции ротора, его активного сопротивления и скорости вращения), влияющих на параметры машины, которые, в свою очередь, обуславливают характер и количественную оценку протекания электромагнитных и электромеханических переходных процессов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Адкинс Б.А. Общая теория электрических машин. – М.: Гос-энергоиздат, 1969. – 272 с.
2. Адлер Ю. П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1971. – 281с.
3. Адлер Ю.П. Введение в планирование эксперимента. – М.: Metallургия, 1969. – 159 с.
4. Аркадьев В.К. Теория электромагнитного поля в ферромагнитном металле // Журнал радиофизического общества. – 1913. – № 45. – С. 312–344.
5. Беспалов В.Я., Копылов И.П. Переходные процессы в асинхронных двигателях при несинусоидальном напряжении. // Электричество. – 1971. – № 8. – С. 41–44.
6. Бируля И.Н. К вопросу о характеристике приведенных сопротивлений, векторной диаграмме и схеме замещения асинхронного двигателя с массивным ротором.// Сб. науч. тр. Челяб. ин-та механиз. и электриф. с/х. Вып. III, 1948. С. 81–88.
7. Бируля И.Н. Расчет основных характеристик асинхронного двигателя с массивным гладким ротором. // Сб. науч. тр. Челяб. ин-та меха-низ. и электриф. с/х. Вып. III, 1948. – С. 53–80.
8. Бут Д. А., «Основы электромеханики», Москва, изд-во МАИ, 1996, 468с.
9. Винокуров, В.А. Авиационные электрические машины / В.А. Винокуров [и др.] – М.: МО СССР, 1969. – 304 с.
10. Возобновляемая энергетика: Сб. науч. тр. // Отв. ред. В.В. Алексеев. – М.: Изд-во МГУ, 1999. – 188 с.
11. Волшаник В.В., Зубарев В.В., Франкфурт М.О. Использование энергии ветра, океанских волн и течений. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии (Итоги науки и техники). – М.: ВИНТИ, 1983 – Т. 1. – 138 с.
12. Воронин, С.Г. Сравнительная оценка схем соединения обмоток синхронных генераторов в составе источников постоянного тока / С.Г. Воронин, Н.В. Клиначев, А.М. Давлатов, Д.В. Пауков // Журн. Вестник Южно-Уральского

Государственного Университета – 2020. - т. 20, №3, серия «Энергетика». – с. 110-119.

13. Гайтов Б.Х. Методика расчета трехмерного магнитостатического поля в аксиальных генераторах на базе ANSOFT MAXWELL / Гайтов Б.Х., Автайкин И.Н., Кашин Я.М., Пауков Д.В., Кашин А.Я. // Технические и технологические системы, материалы III международной научной конференции, Краснодар. – 2011. – с. – 42-50.

14. Гайтов Б.Х. Управляемые двигатели-машины. – М.: Машиностроение, 1981.– 183 с.

15. Гайтов Б.Х., Гайтова Т.Б., Кашин Я.М. Улучшение параметров контактной сети ГЭТ путем использования многофазного трансформатора. // Сб. междунар. конф. «Электромеханика, электротехнологии и электроматериаловедение» – МКЭЭЭ-2003. – Алушта, 2003. – С 620- 624.

16. Гайтов Б.Х., Гайтова Т.Б., Кашин Я.М., Копелевич Л.Е. Многофазный трансформатор, как эффективное средство улучшения качества выпрямленного напряжения // Сб. тр. V междунар. конф. «Электромеханика, электротехнологии и электроматериаловедение» – МКЭЭЭ-2003. Алушта, 2003 – С. 541–545.

17. Гайтов Б.Х., Копелевич Л.Е., Гайтова Т.Б. Развитие теории, методики расчета и конструкции аксиальных асинхронных двигателей // Сб. II междунар. науч.-техн. конф. «Электромеханика и электротехнологии», ICSE-96. – Крым, – 1996. – С. 181–183.

18. Гайтов Б.Х., Маслов С.И., Гайтова Т.Б., Кашин Я.М. Аксиальные магнитопроводы электромагнитных устройств в нетрадиционной энергетике. // Сб. материалов Всерос. электротехнического конгресса – ВЭЛК-2005. М.: 2005. – С. 249 -250.

19. Гайтов, Б.Х. Разработка аксиальных электромагнитных устройств для систем автономного электроснабжения и выбора метода исследования переходных процессов / Б.Х. Гайтов, Ю.П. Ясьян, Я.М. Кашин, Л.Е. Копелевич, А.Я. Кашин, Д.В. Пауков // Журн. Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2011. – вып. 6(33). – С. 169-173.

20. Гайтова Т.Б., Гайтов Б.Х., Кашин Я.М. Перспективные конструкции аксиальных многофазных трансформаторов и регуляторов с вращающимся магнитным полем. // Изв. вузов. Электромеханика. – 2005. – № 3. – С. 44–47.

21. Гайтова Т.Б., Кашин Я.М. Научные подходы к проблеме освоения и использования возобновляемых источников энергии. // Сб. IV Южно-Российской науч. конф. ЮРНК-05 «Энерго- и ресурсосберегающие технологии и установки», т. 1 – Краснодар, 2005. – С. 21–26.

22. Гайтова Т.Б., Кашин Я.М. Обоснование конструкции и принцип работы двухвходовых электрических машин для автономных военных объектов. // Материалы международной научной конференции «Технические и технологические системы», Краснодар, КубГАУ, 2009. – С. 37–40.

23. Гайтова, Т.Б. Математическое моделирование перспективных генераторных установок для систем автономного электроснабжения / Т.Б. Гайтова, Я.М. Кашин, Л.Е. Копелевич, А.Я. Кашин, А.С. Князев // Известия вузов. Электромеханика. – 2013. - №3 - С. 16-23.

24. Ганджа, С.А. Анализ электромагнитной мощности для различных конструктивных исполнений вентильных машин с аксиальным потоком // журнал Вестник ЮУрГУ. - Челябинск: издво ЮУрГУ. - 2010. - № 32. - С. 64-69.

25. Ганджа, С.А. Вентильные электрические машины с аксиальным магнитным потоком. Анализ синтез внедрение в производство: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.09.01 / Ганджа Сергей Александрович. Челябинск, 2011. – 271 с.

26. Ганджа, С.А. Методика инженерного расчёта вентильных электрических машин с аксиальным магнитным потоком / С.А. Ганджа, А.С. Мартьянов // журнал Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. - Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. - 2013. – Выпуск № 2, том 13. - С. 85-87.

27. Ганджа, С.А. Определение оптимальных габаритных размеров для вентильных машин с аксиальным магнитным потоком (ВМАП) / С.А. Ганджа, А.С. Мартьянов // журнал Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. - Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. – 2013. -Выпуск № 2, том 13. - С. 88-90.

28. Ганджа, С.А. Оптимальное проектирование электроприводов на базе вентильных электрических машин с аксиальным зазором // журнал Вестник ЮУрГУ. - Челябинск: изд-во ЮУрГУ. - 2009. - № 34. - С. 68-72.

29. ГОСТ Р 54703-2017. Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. М.6 Стандартиформ, 2018. – 35 с.

30. Гуйдалаев М.Г., Кашин Я.М. Перспективные аксиальные электромагнитные устройства для систем электроснабжения летательных аппаратов. // Энергоснабжение и водоподготовка. Научно-технический журнал, изд-во ЗАО НПО «Энергоинвест». – 2008. – № 6 (56). – С. 49–52.

31. Домбровский В.В., Хуторецкий Г.М. Основы проектирования электрических машин переменного тока. – Л.: Энергия, 1974. – 504 с.

32. Зонтов, В.М. Системы электроснабжения летательных аппаратов / В.М.Зонтов, Б.В.Куприн - М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1988 г. – 396 с.

33. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.

34. Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах. – М.: Высш. школа, 1989. – 312 с.

35. Иванов-Смоленский, А.В. Универсальный метод расчёта электромагнитных процессов в электрических машинах. - М.: Энергоатомиздат. - 1986. - 216 с.

36. Иванов-Смоленский, А.В. Электрические машины: учебник для вузов. – В 2т. Т.1. - М.: изд-во МЭИ. - 2004. - 652 с.

37. Иванов-Смоленский, А.В. Электрические машины: учебник для вузов. – В 2т. Т.2. - М.: изд-во МЭИ. - 2004. - 532 с.

38. Иванов-Смоленский, А.В. Электромагнитные поля и процессы в электрических машинах и их физическое моделирование. - М.: Энергия. - 1969. - 304 с.

39. Ивоботенко Б.А., Ильинский Н.Ф., Копылов И.П. Планирование эксперимента в электромеханике. – М.: Энергия, 1975. – 185 с.

40. Исмагилов, Ф.Р. Введение в конструирование электромеханических преобразователей энергии / Ф.Р. Исмагилов, Ю.В. Афанасьев, А.В. Стыскин. - М.: Изд во МАИ. - 2006. - 132 с.

41. Исмагилов, Ф.Р. Основы проектирования высокооборотных электромеханических преобразователей энергии с высококоэрцитивными постоянными магнитами: монография / Ф.Р. Исмагилов, И.Х. Хайруллин, В.Е. Вавилов. - М.: Инновационное машиностроение. - 2016. - 223 с.

42. Забудский, Е. И. Электрические машины: учебное пособие для вузов / В 4 ч. Ч. 3. Синхронные машины / Е. И. Забудский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : ООО «Мегаполис», 2019. – 295 с.

43. Карташов А.П., Рождественский Б.Л. Обыкновенные дифференциальные уравнения и основы вариационного исчисления. - М., Наука, 1980, 288 с.

44. Кацман, М.М. Электрические машины: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / М.М.Кацман. – 12-е изд., стер. – М. : Издательский центр «Академия», 2013. – 496 с.

45. Кашин, А.Я. Программа и методика экспериментальных исследований аксиального бесконтактного генератора постоянного тока / А.Я. Кашин, Д.В. Пауков, А.С. Князев, // Технические и технологические системы, материалы VI международной научной конференции, Краснодар. – 2014. – с. 156-163.

46. Кашин Я.М. Разработка перспективных конструкций авиационных генераторов постоянного тока. // Материалы международной научной конференции «Технические и технологические системы», Краснодар, КубГАУ, 2009.– С. 45–47.

47. Кашин Я.М., Рябухин М.И., Кашин А.Я. Перспективные конструкции аксиальных двигателей-насосов. // Материалы международной научной конференции «Технические и технологические системы», Краснодар, КубГАУ, 2009.– С. 163–167.

48. Кашин, А.Я. Обоснование и разработка перспективной конструкции аксиальной двухмерной электрической машины-генератора для систем автономного электроснабжения / Кашин А.Я., Пауков Д.В., Голощапов А.В.,

Автайкин И.Н. // Научные чтения имени профессора Н.Е. Жуковского, Краснодар. – 2012. – с. 99-106.

49. Кашин, Я.М. Обоснование и разработка перспективных конструкций генераторных установок для систем автономного электроснабжения / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, Д.В. Пауков // Изв. вузов. Электромеханика. – 2012. - № 1. – С.46-53.

50. Кашин, Я.М. Авиационное оборудование самолетов. Часть 1. / Я.М. Кашин, Г.А. Кириллов, А.В. Ракло. Под общей редакцией Я.М. Кашина // – Краснодар: Краснодарское ВВАУЛ, 2006. – 198 с.

51. Кашин, Я.М. Авиационные приборы и пилотажно-навигационные комплексы. Часть 1. Электрооборудование воздушных судов. / Я.М. Кашин, Г.А. Кириллов, А.Б. Варенов. Под общей редакцией Я.М. Кашина // – Краснодар: филиал ВУНЦ ВВС ВВА, 2012. – 111 с.

52. Кашин, Я.М. Особенности выбора элементов электрического и теплового каналов преобразования энергии в системах автономного электроснабжения / Кашин Я.М., Гайтова Т.Б., Кашин А.Я., Пауков Д.В. // Научные чтения имени профессора Н.Е. Жуковского, Краснодар. – 2013. – с. 202-208.

53. Кашин, Я.М. Определение основных размеров аксиальных электрических машин / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, А.С. Князев, Б.Н. Абзалов // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). Краснодар: Издательский дом – Юг, 2016. С. 111-121.

54. Кашин, Я.М. Перспективы развития систем электроснабжения летательных аппаратов. / Наука и технологии, Краткие сообщения XXX-й Российской школы, посвященной 65-летию Победы (15-17 июня 2010 г., г. Миасс), том 1 / Я.М. Кашин, Д.В. Пауков, Ю.Н. Тонкошуров – Екатеринбург, 2010.– С.130-132.

55. Кашин, Я.М. Системы электроснабжения летательных аппаратов постоянным током: проблемы и пути решения. / Проблемы и направления информационного и летно-технического обеспечения выживаемости и живучести авиационных комплексов и систем управления ими / Материалы I Всероссийской

научно-технической школы-семинара. / Я.М. Кашин, Д.В. Пауков – Сочи. - 2010. – С. 55-6.

56. Клейменов, Г.Н. Электрооборудование летательных аппаратов / Г.Н. Клейменов, И.С. Курбатов, Н.В. Максимов – М.: 1982. – 280 с.

57. Копылов И.П. Гелиоэлектромеханика. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 116 с

58. Копылов И.П. Геоэлектромеханика. – 2-е изд. – М.: Изд-во МЭИ, 2000. – 119 с.

59. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высш. школа, 2001. – 327 с.

60. Копылов И.П. Электрические машины. – М.: Высш. школа, Логос – 2000. – 607 с.

61. Копылов И.П. Электромеханика планеты Земля. – М.: Изд-во МЭИ, 1997. – 112 с.

62. Копылов И.П., Гайтова Т.Б., Синицкий С.Д. Схема замещения специальной асинхронной машины при переменной частоте // Информ-электро, № 6 – эт; 25.02.94. // Электротехника. – 1994. – № 10.

63. Копылов И.П., Мамедов Ф.А., Беспалов В.Я. Математическое моделирование асинхронных машин. – М.: Энергия, 1969. – 95 с.

64. Копылов, И.П. Проектирование электрических машин: учебник для вузов / И.П. Копылов, Ф.А. Горяинов, Б.К. Клоков - 4е изд. перераб. и доп. - М.: Издательство Юрайт. - 2011. - 767 с.

65. Котеленец Н.Ф. Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин: Учеб. для вузов/ Котеленец Н.Ф., Акимова Н.А., Антонов М.В. - М.: издат. центр “Академия”. 2003. – 384 с.

66. Котеленец, Н.Ф. Электрические машины: учеб. пособие для студ. учреждений высш. учеб. заведений / В.Я. Беспалов, Н.Ф. Котеленец. – 3-е изд., стер. – М. : Издательский центр «Академия», 2010. – 313 с

67. Крон Г. Применение тензорного анализа в электромеханике.- М.:Госэнергоиздат, 1956.-248 с.



68. Лахтадырь, И.С. Электроснабжение летательных аппаратов / И.С. Лахтадырь [и др.] – Рига: ВВАИУ им. Я. Алкниса, 1991. – 507 с.
69. Левин, А.В. Проектирование генератора с редкоземельными магнитами в системе электроснабжения летательных аппаратов / А.В. Левин, Д.В. Левин, Э.Я. Лившиц, Б.С. Зечихин. - Электричество. - 2009. № 10. - С. 41-47.
70. Ледовский, А.Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами. - Москва: Энергоатомиздат. - 1985. - 168 с.
71. Нейман, В.Ю. Электромагнитные силы, расчет и моделирование магнитных полей : отчет о НИР / Новосиб. гос. техн. ун-т ; рук. Нейман В.Ю.; исполн.: Евреинов Д. М. [и др.]. - Новосибирск, 2009. - 81 с. - № ГР 0120.0 853891.
72. Обоснование и разработка перспективной конструкции аксиальной двухмерной электрической машины-генератора для систем автономного электроснабжения / А.Я. Кашин [и др.] // сборник статей II международной научно-практической конференции. – Краснодар. - филиал ВУНЦ ВВС «ВВА» – 2012. – 203 с.
73. Панасюк, Г.Н. Авиационные электрические машины / Г.Н. Панасюк, И.А. Попов, Г.В. Привалов – М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского 1985 г. – 500 с.
74. Пат. 2402858 РФ Аксиальный бесконтактный генератор постоянного тока / Б.Х. Гайтов, Я.М. Кашин, Т.Б. Гайтова, А.Я. Кашин – Бюл. 30. 614
75. Пат. РФ 2450411, 10.05.2012 г. Аксиальная двухвходовая бесконтактная электрическая машина - генератор // Гайтов Б.Х., Кашин Я.М., Гайтова Т.Б., Кашин А.Я., Пауков Д.В., Голощапов А.В., патентообладатель ГОУ ВПО «Кубанский государственный технологический университет», заявка 2011101117/07 от 12.01.2011 г.
76. Пат. РФ № 2465706, 27.10.2012 г. Стабилизированный аксиальный генератор постоянного тока. // Гайтов Б.Х., Кашин Я.М., Гайтова Т.Б., Кашин А.Я., Пауков Д.В., патентообладатель ГОУ ВПО «Кубанский государственный технологический университет», заявка 2011111479/07 от 25.03.2011 г.

77. Пат. РФ № 2470446, 20.12.2012 г. Стабилизированный аксиальный генератор постоянного тока. // Гайтов Б.Х., Кашин Я.М., Гайтова Т.Б., Кашин А.Я., Пауков Д.В.

78. Пат. РФ № 2475924, 20.02.2013 г. Способ изготовления магнитопроводов аксиальных электрических машин // Гайтов Б.Х., Кашин Я.М., Автайкин И.Н., Гайтова Т.Б., Кашин А.Я., Пауков Д.В.

79. Пауков, Д.В. Исследования переходных процессов в электромеханических преобразователях энергии (ЭМПЭ). Математическая модель аксиального генератора постоянного тока (АГПТ) / Пауков Д.В., Кашин Я.М. // Научный поиск, материалы девятой научной конференции аспирантов и докторантов, Челябинск. – 2017. – с. 54-62.

80. Пауков, Д.В. Критический анализ радиальных электрических машин / Пауков Д.В., Красильников С.С., Микора В.В. // Технические и технологические системы, материалы II международной научной конференции, Краснодар. – 2010. – с. 56-59.

81. Пауков, Д.В. Магнитопровод аксиальной конструкции как основа создания перспективных электромеханических преобразователей энергии / Пауков Д.В. // Технические и технологические системы, материалы IV международной научной конференции, Краснодар. – 2012. – с. – 201-204

82. Пауков, Д.В. Основы теории для разработки схем замещения / Актуальные проблемы энергетики АПК / Материалы международной научно-практической конференции // Д.В. Пауков, С.В. Божко, Ю.Н. Тонкошкурков – Саратов. – 2010. – с. 38-41.

83. Пауков, Д.В. Особенности расчета бесконтактных генераторов постоянного тока / Пауков Д.В., Божко С.В., Попов А.Ю. // Технические и технологические системы, материалы III международной научной конференции, Краснодар. – 2011. – с. 36-38.

84. Пауков, Д.В. Применение электрической аналогии при расчете полюсных наконечников индуктора аксиального многофазного генератора / Пауков Д.В.,

Раченко К.А. // Технические и технологические системы, материалы III международной научной конференции, Краснодар. – 2011. – с. – 110-114.

85. Пауков, Д.В. Математическое моделирование аксиальных генераторов постоянного тока для систем электроснабжения воздушных судов / Пауков Д.В., Пономарев Е.С., Гильманов Р.Р. // Технические и технологические системы, материалы IX международной научной конференции, Краснодар. – 2017. – с. – 52-55.

86. Пауков, Д.В. Перспективные конструкции авиационных генераторов аксиального типа / Пауков Д.В., Саканжала П.А., Бахенда Родриг // Технические и технологические системы, материалы X международной научной конференции, Краснодар. – 2019. – с. – 51-54.

87. Пауков, Д.В. Математическое моделирование аксиального генератора постоянного тока / Пауков Д.В., Руденко В.Г., Ким В.А. // Технические и технологические системы, материалы X международной научной конференции, Краснодар. – 2019. – с. – 54-56.

88. Петров, Г.Н. Электрические машины. Часть 1 / Г.Н. Петров – М.: Энергия. - 1974.-240 с.

89. Программа для расчета аксиального бесконтактного генератора постоянного тока: свидетельство № 2011614738 / Гайтов Б.Х., Кашин Я.М., Гайтова Т.Б., Рябухин М.И., Кашин А.Я. Пауков Д.В. (RU); правообладатель ГОУ ВПО «Кубанский государственный технологический университет», заявление 2011612957 от 26.04.2011 г., зарегист. 16.06.2011 г., реестр программ для ЭВМ.

90. Программа для расчета формы кривой выходного напряжения аксиального многофазного трансформатора с вращающимся магнитным полем при обрыве и пробое фаз: свидетельство № 2011614739 / Гайтов Б.Х., Кашин Я.М., Гайтова Т.Б., Рябухин М.И., Кашин А.Я. Пауков Д.В. (RU); правообладатель ГОУ ВПО «Кубанский государственный технологический университет», заявление 2011612958 от 26.04.2011 г., зарегист. 16.06.2011 г., реестр программ для ЭВМ.

91. Ракло, А.В. Особенности работы статических преобразователей постоянного тока и их недостатки / Ракло А.В., Пауков Д.В., Ершов Е.А.,

Рыжиков С.Н. // Технические и технологические системы, материалы II международной научной конференции, Краснодар. – 2010. – с. 13-17.

92. Русаков, А. М. Определение размеров полюсной системы индукторов вентильных синхронных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов / А. М. Русаков, А. М. Сугробов, Е. О. Казимиров, Н. А. Окунева, А. Н. Соломин // Вестник МЭИ. - 2016, №4. – С. 44-50.

93. Сергеев, П. С. Проектирование электрических машин / П. С. Сергеев, Н. В. Виноградов, Ф. А. Горяинов.- М. : Энергия, 1969. - 632 с.

94. Сингаевский Н.А. Теоритические и схемотехнические основы силовых полупроводниковых выпрямителей на базе многофазных трансформаторов с вращающимся магнитным полем: Дис. д-ра техн. наук. – Краснодар, 2010. – 314 с.

95. Сипайлов Г.А., Лоос А.В. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высш. школа, 1980. – 176 с.

96. Сугробов, А.М. Проектирование электрических машин автономных объектов: учебное пособие / А. М. Сугробов, А. М. Русаков. // Электрон. текстовые дан. - М. : Издательский дом МЭИ. - 2012. - 304 с.

97. Тонкошкурлов, Ю.Н. К вопросу разработки схемы замещения и расчета параметров элементов трансформаторов в вращающемся магнитным полем / Тонкошкурлов Ю.Н., Кашин Я.М., Пауков Д.В. // Актуальные проблемы энергетики АПК, материалы международной научно-практической конференции, Саратов. – 2010. – с. 45-48.

98. Усынин, Ю.С. Электроприводы и генераторы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов // Электричество. – 2007. – №3. – с. 21-26.

99. Федянин, А. Л. Программный комплекс моделирования электромеханических устройств / А. Л. Федянин, С. В. Леонов, О. П. Муравлев // Электромеханические преобразователи энергии: материалы междунар. науч.-техн. конф. / Том. политехн. ун-т. – Томск, 2005. - С.163-165.

100. Форсайт Дж. Машинные методы математических вычислений/ Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К.. -М.:Мир, 1980. -279 с.

101. Халютин, С.П. Системы электроснабжения летательных аппаратов / С.П. Халютин [и др.] – М.: Изд. ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А.Гагарина», 2010 – 428 с.
102. Хенкок Н. Матричный анализ электрических машин. – М.: Энергия , 1967. – 224 с.
103. Чинаев, П.И. Авиационное оборудование самолетов / П.И. Чинаев [и др.] - М.: МО РФ, 1976. – 352 с.
104. Щелыкалов, Ю. Я. О применении численных методов для расчета физических полей // Теория и расчеты электрических машин и аппаратов : межвуз. сб. науч. трудов / Иван. гос. ун-т Иван. энерг. ин-т . - Иваново, 1978.
105. Gandzha, S. Aminov, D. Kosimov, B. Design of Brushless Electric Machine with Axial Magnetic Flux Based on the Use of Nomograms // В сборнике: Proceedings - 2018 International Ural Conference on Green Energy, – UralCon 2018, – 2018. – С.282-287.
106. Gandzha, S. Aminov, D. Kiessh I., Kosimov, B. Application of Digital Twins Technology for Analysis of Brushless Electric Machines with Axial Magnetic Flux // В сборнике: Proceedings - 2018 Global Smart Industry Conference, GloSIC – 2018, – 2018. – С. 8570132.
107. Gandzha, S. Aminov, D. Kiessh I., Kosimov, B. Application of Digital wins Technology for Analysis of Brushless Electric Machines with Axial Magnetic Flux // В сборнике: Proceedings - 2018 Global Smart Industry Conference, GloSIC – 2018, – 2018. – С. 8570132.
108. Law, J. Magnetic Circuit Modeling of the Field Regulated Reluctance Machine, Part I: Model Development / J. Law, T. Busch, T. Lipo // IEEE Transaction on Energy Conversion. - 2000. - №1. - Vol. 11. - P. 49 - 56.
109. Law, J. Magnetic Circuit Modeling of the Field Regulated Reluctance Machine, Part II: Saturation Modeling and Results / J. Law, T. Busch, T. Lipo // IEEE Transaction on Energy Conversion - 2000. - №1. - Vol. 11. - P. 56 - 62.
110. Lipo, T. Advanced Motor Technologies: Converter Fed Machines / T. Lipo // Transactions on energy conversion - 1998. - P. 204 – 222

111. Lyshevski, S. E. Electromechanical systems and devices. - CRC Press. - 2008.– 584 p.
112. Dezhin, D., Ivanov, N., Kovalev, K., Kobzeva, I., Semenihiin, V.. System Approach of Usability of HTS Electrical Machines in Future Electric Aircraft. IEEE Transactions on Applied Superconductivity Volume 28, Issue 4, June 2018
113. Kovalev, K.L., Verzhbitsky, L.G., Kozub, S.S., Penkin, V.T., Lari-onov, A.E., Modestov, K.A., Ivanov, N.S., Tulinova, E.E., Dubensky, A.A. Brushless superconducting synchronous generator with claw-shaped poles and permanent 116 magnets. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Volume 26, Issue 3, April 2016, Article number 7405291, DOI: 10.1109/TASC.2016.2528995
114. Robertson S., Hebbar K. Torque pulsations in induction motors with inverter drives. // IEEE Trans. Appl. – 1971. – № 2. – Vol. 7.

## Приложение А

Фрагмент решения алгоритма математической модели на языке  
ФОРТРАН-4 с использованием среды «Mathcad»

Требуется найти токи  $i$  и напряжения  $u$  в электрогенераторе с дополнительной обмоткой, с помощью которой осуществляется стабилизация напряжения

1) В случае  $k_2=K_2, \dots, k_{11}=K_{11}$  заданных как целые числа – найти аналитически и представить графически при заданных параметрах.

Задаём необходимые константы:

$$\begin{array}{l}
 k_2 := 3 \quad k_3 := 3 \quad k_4 := 3 \\
 B_{205} := 1 \quad f := 50 \quad A_{200} := 1 \quad B_{200} := 1 \quad B_{201} := 0 \quad K_{2000} := 0.1 \\
 B_{202} := 0 \\
 f_{20} := 50 \quad K_{300} := 0.2 \quad K_{301} := 0.3 \quad K_{303} := 0.05 \quad A_{30} := 10 \\
 M_1 := 0.015 \quad R_2 := 1 \quad R_3 := 1 \quad R_4 := 1 \quad R_5 := 1 \quad K_{302} := K_{300} \cdot K_{303} \\
 M_2 := 0.015 \quad C_{102} := 0 \quad C_{103} := 200 \quad f_{11} := 50 \quad \varphi_{11} := 0 \\
 M_3 := 0.015 \\
 V_1 := 2 \quad V_2 := 2 \cdot \frac{V_1}{6} \quad V_3 := 2.5 \cdot V_1 \quad V_5 := \frac{V_1}{10} \quad V_4 := 3 \cdot V_1 \\
 \varphi_1 := 40 \\
 V_1 = 2 \quad V_2 = 0.667 \quad V_3 = 5 \quad V_4 = 6 \quad V_5 = 0.2 \\
 T_{103} := 2 \cdot \frac{V_1}{K_{2000}} \quad T_{103} = 40 \\
 t_{11} := \frac{T_{103}}{4} \quad t_{21} := \frac{T_{103}}{6} \quad t_{31} := \frac{T_{103}}{2} \quad t_{41} := \frac{2}{3} T_{103} \quad t_{51} := t_{11} \\
 t_{61} := \frac{|t_{11} - t_{21}|}{2} \quad t_{71} := \frac{|t_{31} - t_{21}|}{2} \quad t_{81} := \frac{|t_{41} - t_{31}|}{2} \quad t_{91} := \frac{|t_{51} - t_{41}|}{2} \\
 t_1 := t_{11} \quad t_2 := t_1 + t_{21} \quad t_3 := t_2 + t_{31} \quad t_4 := t_3 + t_{41} \quad t_5 := t_4 + t_{51} \\
 t_6 := t_5 + t_{61} \quad t_7 := t_6 + t_{71} \quad t_8 := t_7 + t_{81} \quad t_9 := t_8 + t_{91}
 \end{array}$$

Необходимо смоделировать процесс, имитирующий нестабильность вращения вала генератора, и показать это на графике. Все моделируемое время разбивается на промежутки  $(0, t_1), (t_1, t_2), (t_2, t_3), (t_3, t_4), (t_4, t_5), (t_5, t_6), (t_6, t_7), (t_7, t_8),$

$(t_8, t_9)$ . На промежутках  $(0, t_1), (t_2, t_3), (t_4, t_5), (t_6, t_7)$  и  $(t_8, t_9)$  функция должна быть константой (вал вращается с постоянной скоростью), а на промежутках  $(t_1, t_2), (t_3, t_4), (t_5, t_6)$  и  $(t_7, t_8)$  кривая, плавно соединяющая эти константы (нестабильность вращения). Имея только по два значения для каждой кривой и условие гладкости кривой в узловых точках, получаем систему уравнений:

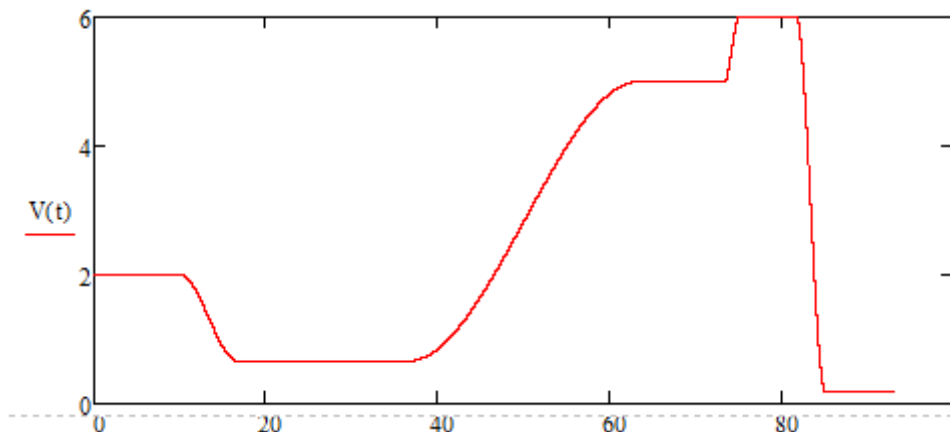
$$\begin{cases} a_0 + a_1 \cdot \alpha + a_2 \cdot (\alpha)^2 + a_3 \cdot (\alpha)^3 = \lambda \\ a_0 + a_1 \cdot \beta + a_2 \cdot (\beta)^2 + a_3 \cdot (\beta)^3 = \mu \\ a_1 + 2 \cdot a_2 \cdot \alpha + 3 \cdot a_3 \cdot (\alpha)^2 = 0 \\ a_1 + 2 \cdot a_2 \cdot \beta + 3 \cdot a_3 \cdot (\beta)^2 = 0 \end{cases}, (1)$$

где  $\alpha, \beta$  – концы временного промежутка,  $\lambda, \mu$  – значение в этих точках.

В результате получаем, решение системы – это коэффициенты для кубической параболы, которая соединяет константы. Функция, имитирующая ветер имеет вид:

$$V(t) = \begin{cases} V_1, 0 \leq t \leq t_1, \\ V_6(t), t_1 < t \leq t_2, \\ V_2, t_2 < t \leq t_3, \\ V_7(t), t_3 < t \leq t_4, \\ V_3, t_4 < t \leq t_5, \\ V_8(t), t_5 < t \leq t_6, \\ V_4, t_6 \leq t \leq t_7, \\ V_9(t), t_7 < t \leq t_8, \\ V_5, t_8 < t \leq t_9. \end{cases}$$

где  $V_i$  – значение функции на участке  $t_{i-1} < t \leq t_i$ .

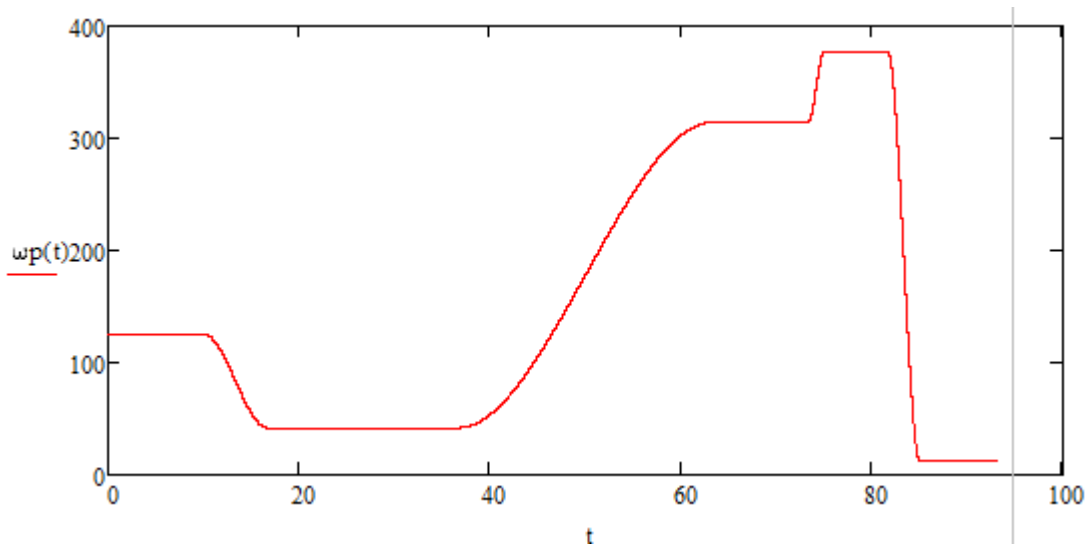




Такой вариант моделирования процесса, имитирующего нестабильность вращения, был выбран в виду того, что в дальнейших вычислениях от функции  $V(t)$  зависит частота амплитуды колебания  $e(t)$ , которая не может быть отрицательной.

Решение уравнения (1) реализовано с помощью языка программирования Fortran.

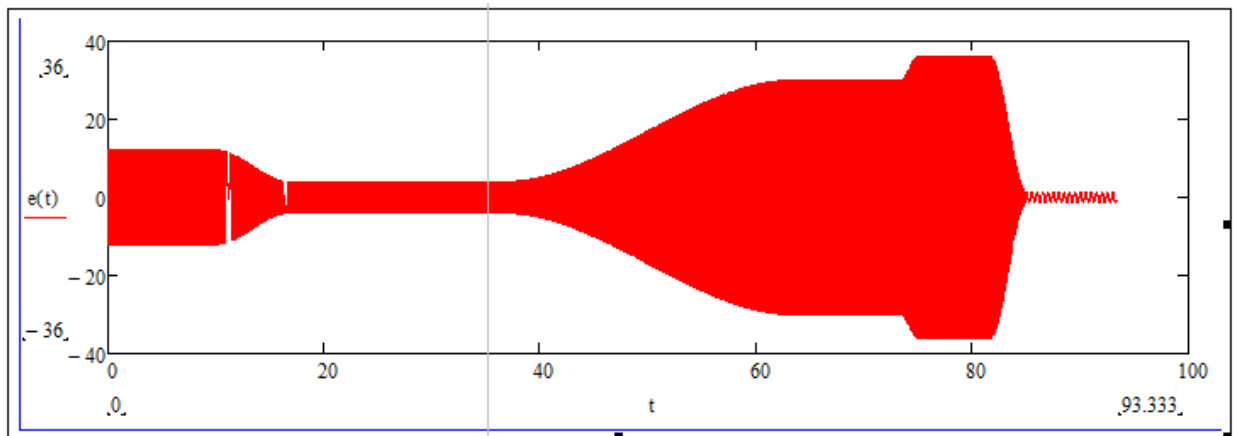
$$\omega_p(t) := V(t) \cdot 2 \frac{\pi}{K2000}$$



$$\Psi_{200}(t) := B_{205} \cos(\omega_p(t) \cdot t)$$

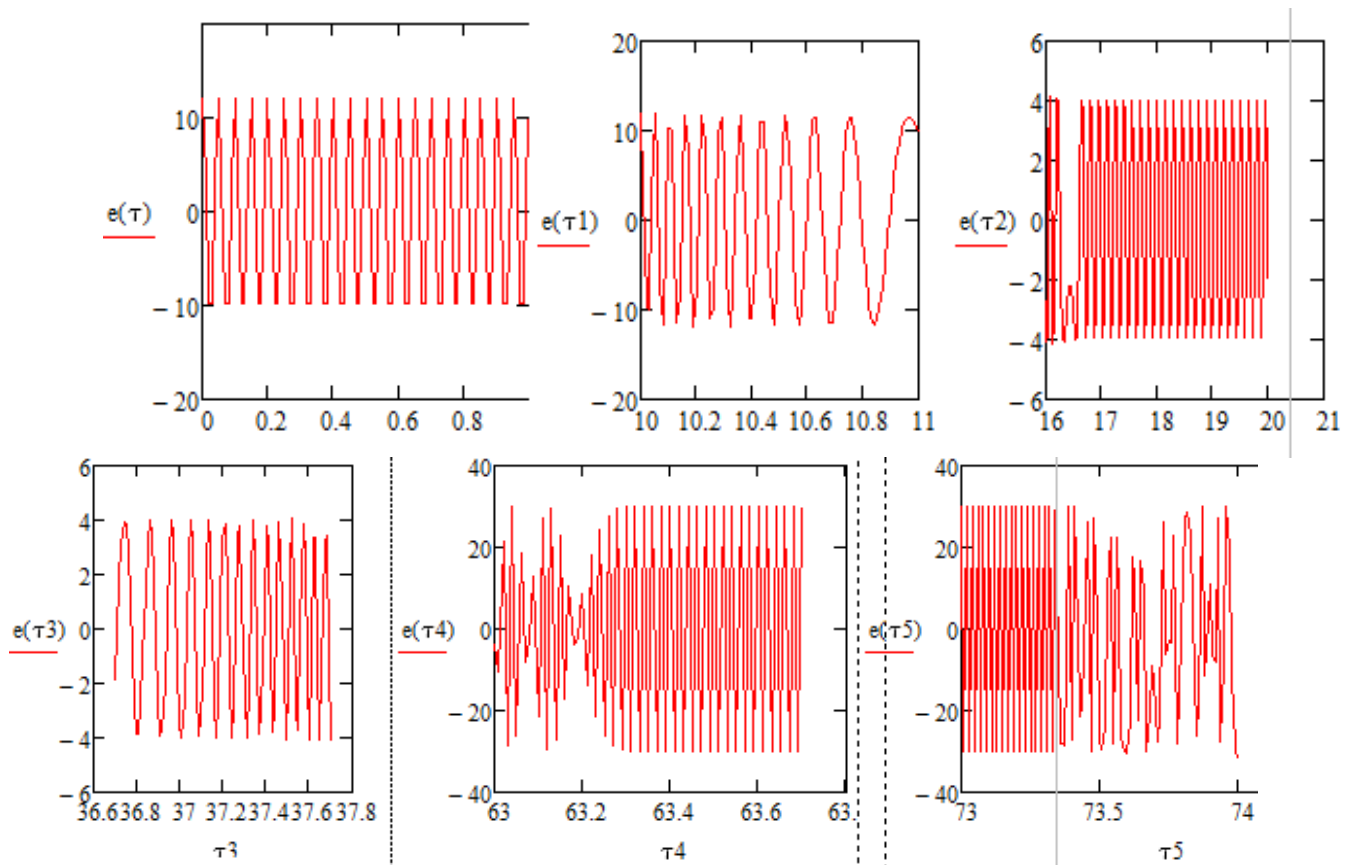
$$\Psi_1(t) := A_{200} (\Psi_{200}(t))^{B_{200}} + B_{201} \Psi_{200}(t) + B_{202}$$

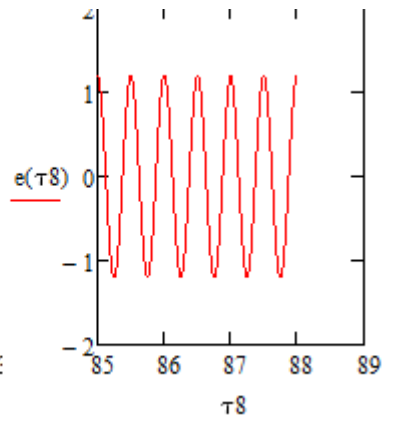
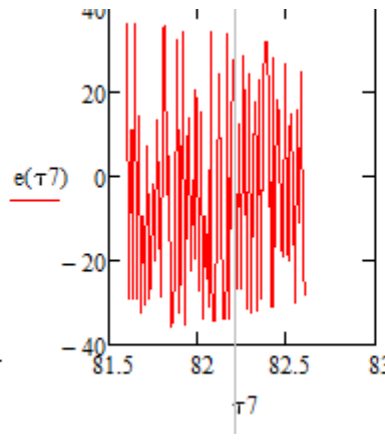
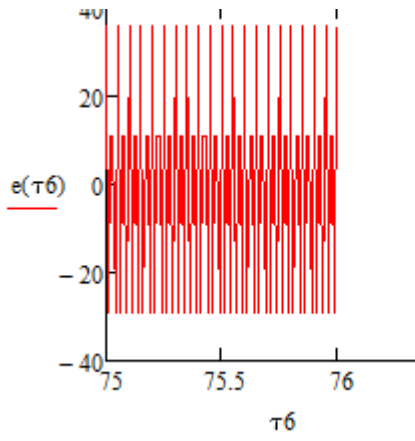
$$e(t) := \Psi_1(t) V(t) \cdot \frac{K_{301} K_{300}}{K_{302}}$$



Разобьем время на более мелкие участки и посмотрим на  $e(t)$  под лупой, аналогично будем поступать и с остальными графиками:

$\tau := 0, 0.01, 1$   
 $\tau_1 := 10, 10.01, 11$   
 $\tau_2 := 16, 16.01, 20$   
 $\tau_3 := 36.7, 36.71, 37.7$   
 $\tau_4 := 63, 63.01, 63.7$   
 $\tau_5 := 73, 73.01, 74$   
 $\tau_6 := 75, 75.01, 76$   
 $\tau_7 := 81.6, 81.61, 82.6$   
 $\tau_8 := 85, 85.01, 88$



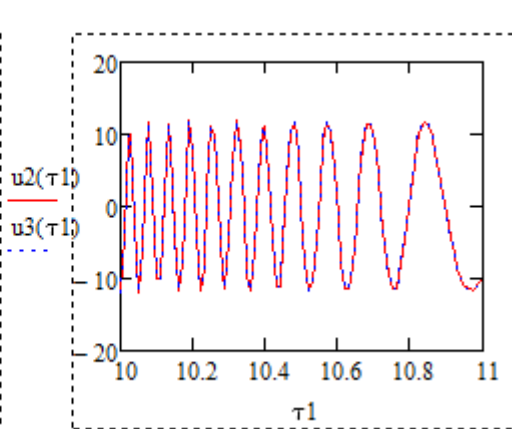
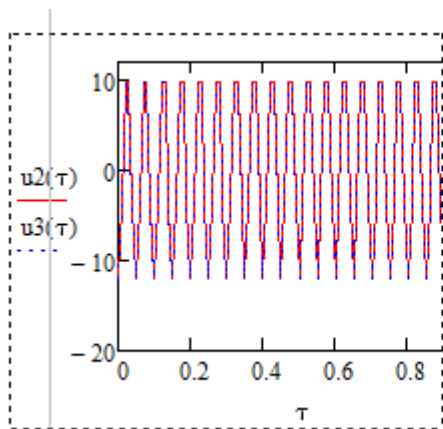
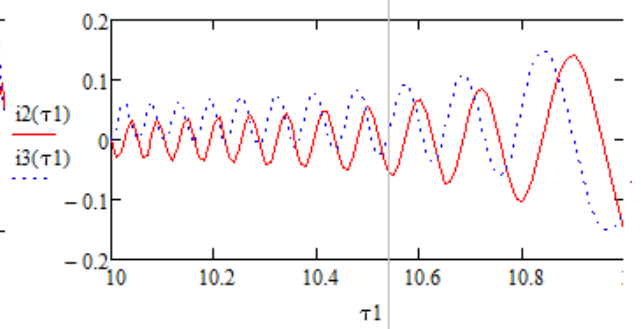
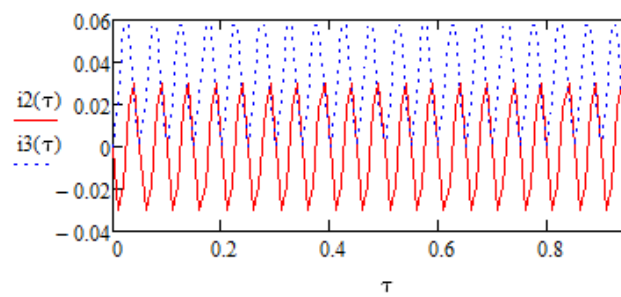


$$L2 := k2 + M1$$

$$L3 := k3 + M1$$

$$i2(t) := \frac{-1}{L2} \cdot \int_0^t e(t) dt$$

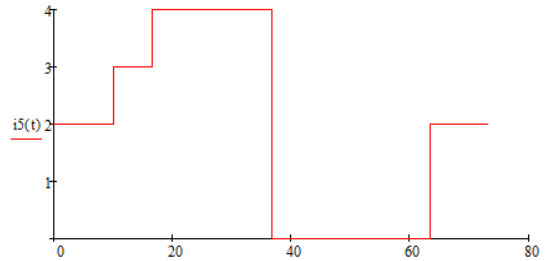
$$i3(t) := \frac{-1}{L3} \cdot \int_0^t e1(t) dt$$



$$i5(t) := \frac{u5(t)}{R5}$$

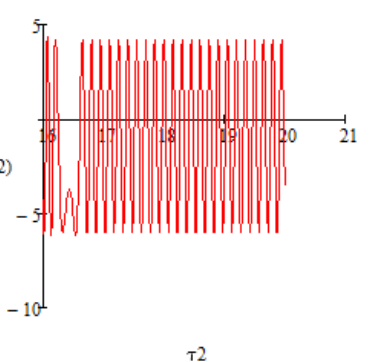
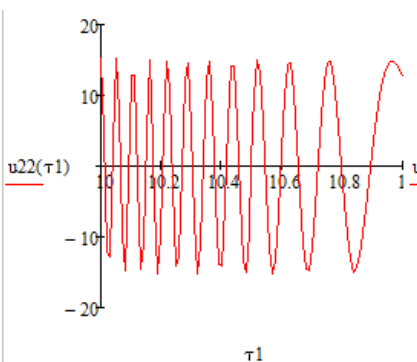
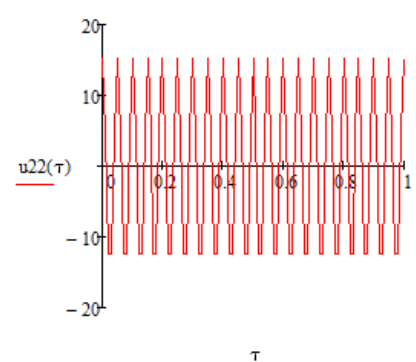
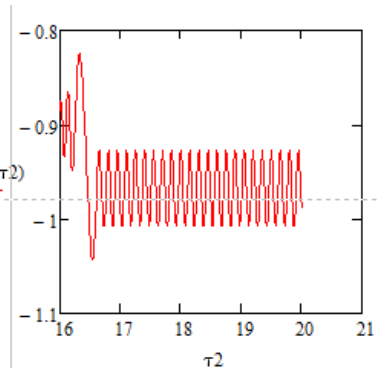
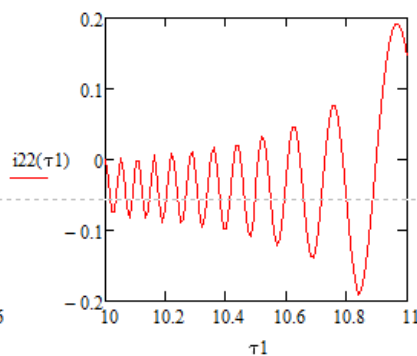
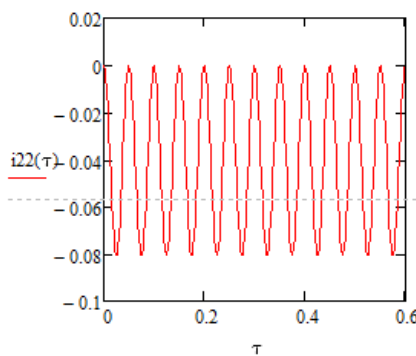
$$C103(t) := \begin{cases} c1 & \text{if } 0 \leq t \leq t1 \\ c2 & \text{if } t1 < t \leq t2 \\ c3 & \text{if } t2 < t \leq t3 \\ c4 & \text{if } t3 < t \leq t4 \\ c5 & \text{if } t4 < t \leq t5 \end{cases} \quad u5(t) := C102 \sin(2\pi \cdot f11t + \phi11) + C103(t)$$

Итак,  $i5$  – вычисляется как функция  $t$



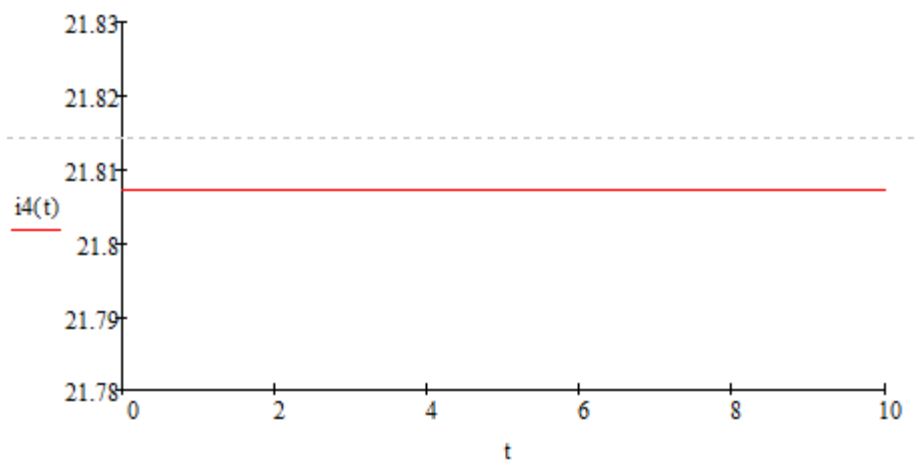
$$i2\lambda(t) := \frac{i3(t)}{\cos\left(\phi1 + \frac{\pi}{18}\right)}$$

$$u22(t) := R2 \cdot i2\lambda(t) - \frac{L2}{L3 \cdot \cos\left(\phi1 + \frac{\pi}{18}\right)} \cdot e(t)$$



$$u122 := \sqrt{\frac{1}{T1} \int_0^{T1} u2(t)^2 dt} \quad u4 := K500 u122 \quad K500 := 2.57$$

$$i_4(t) := \frac{u_4}{R_4}, R_4 \text{ принимаем за константу равную } 1.$$



$$K_{310} := 0.3$$

$$K_{313} := 0.2$$

$$K_{311} := 0.050.3$$

$$K_7 := 3$$

$$K_8 := 3$$

$$B_{500} := 1$$

$$R_7 := 1$$

$$R_8 := 1$$

$$K_{501} := 2.57$$

$$\Psi_7(t) := (M_2 \cdot i_5(t) + M_2 \cdot i_4(t)) \cdot B_{500} \Psi_{200}(t)$$

$$\Psi_8(t) := (M_2 \cdot i_5(t) + M_2 \cdot i_4(t)) \cdot B_{500} \Psi_{200}(t)$$

$$L_7 := K_7 + M_2$$

$$L_8 := K_8 + M_2$$

$$i_7(t) := \frac{-1}{L_7} \int_0^t e_7(t) dt$$

$$i_8(t) := \frac{-1}{L_8} \int_0^t e_8(t) dt$$

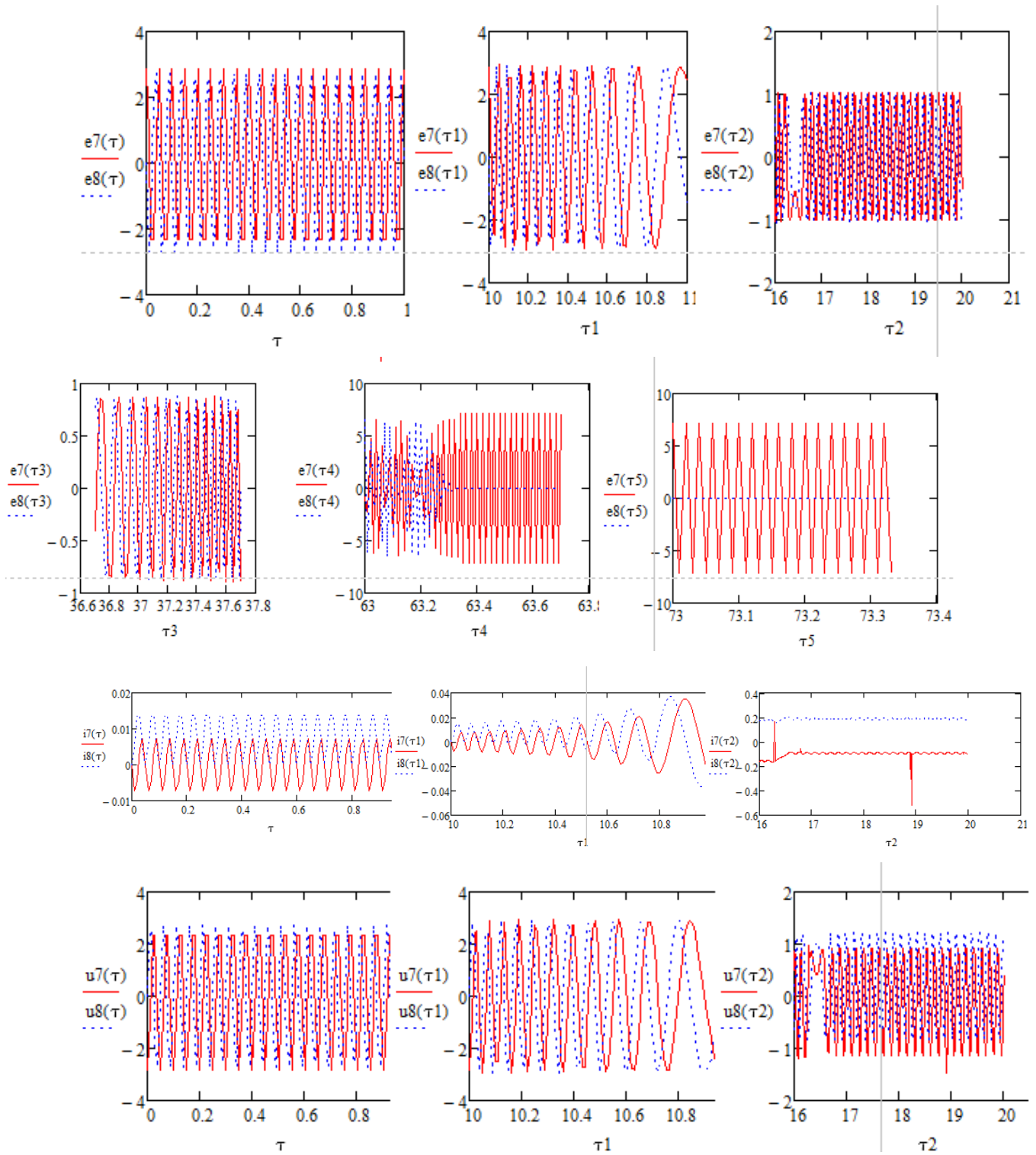
$$u_7(t) := R_7 \cdot i_7(t) - e_7(t)$$

$$u_8(t) := R_8 \cdot i_8(t) - e_8(t)$$

$$e_7(t) := \Psi_7(t) \cdot V(t) \cdot \frac{K_{310} K_{313}}{K_{311}}$$

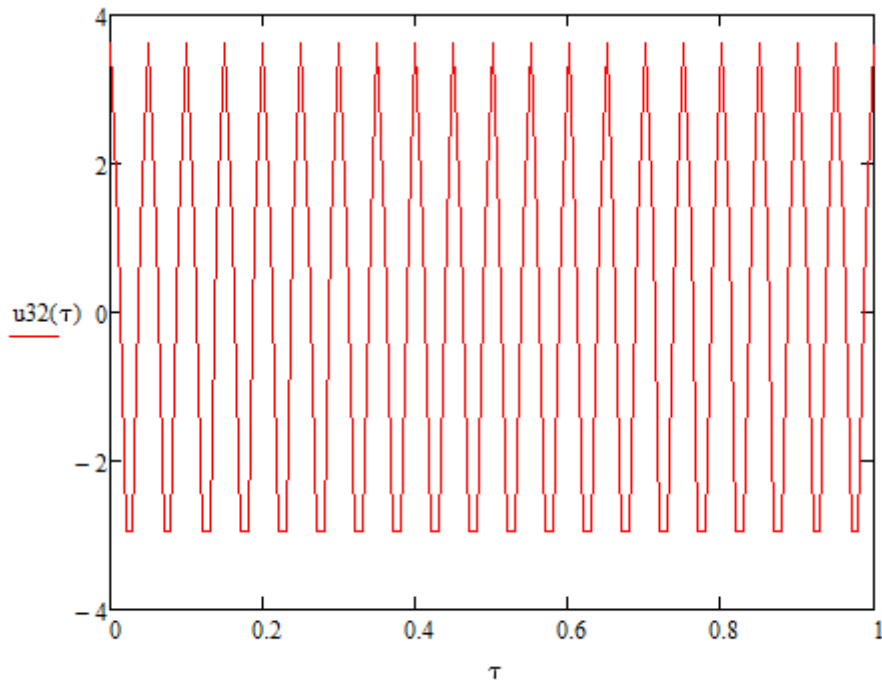
Итак,  $u_7$ ,  $u_8$  – вычисляются как функция  $t$ .

$$e_8(t) := \Psi_8(t) \cdot V(t) \cdot \frac{K_{310} K_{313}}{K_{311}}$$



$$i3\lambda(t) := \frac{i8(t)}{\cos\left(\varphi1 + \frac{\pi}{18}\right)}$$

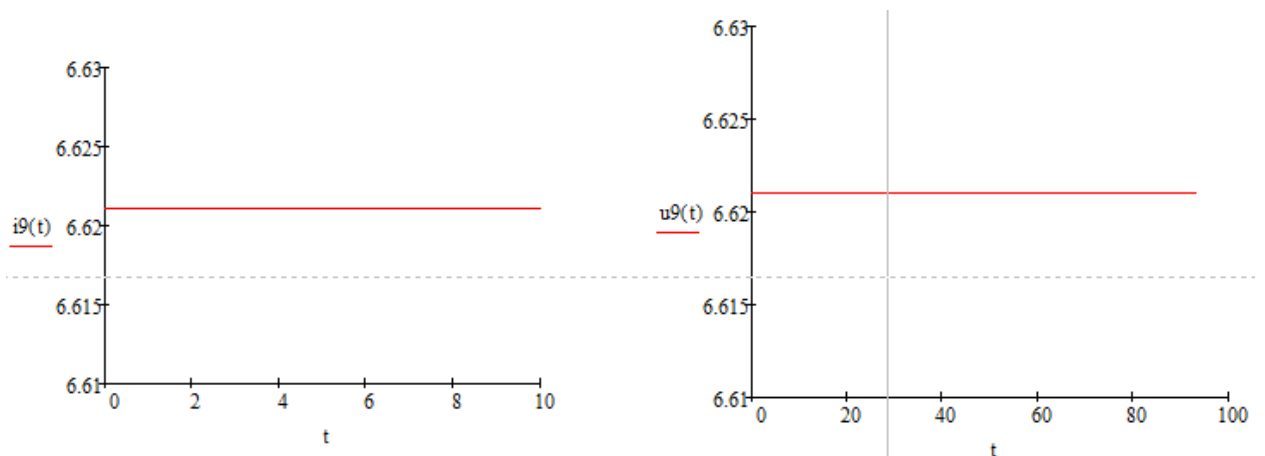
$$u32(t) := R7 \cdot i3\lambda(t) - \frac{L7}{L8 \cdot \cos\left(\varphi1 + \frac{\pi}{18}\right)} \cdot e7(t)$$



Как видно из графика  $u_{32}(t)$ , период равен  $T_2=0.05$

$$u_{132} := \sqrt{\frac{1}{T_2} \int_0^{T_2} u_{32}(t)^2 dt} \quad \begin{aligned} u_9(t) &:= K_{501} \cdot u_{132} \\ i_9 &:= \text{Odesolve}(t, t_2) \\ i_9(t) &:= \frac{u_9(t)}{R_9} \end{aligned}$$

Для простоты вычислений, на первом этапе, возьмем в качестве  $R_9$  константу:



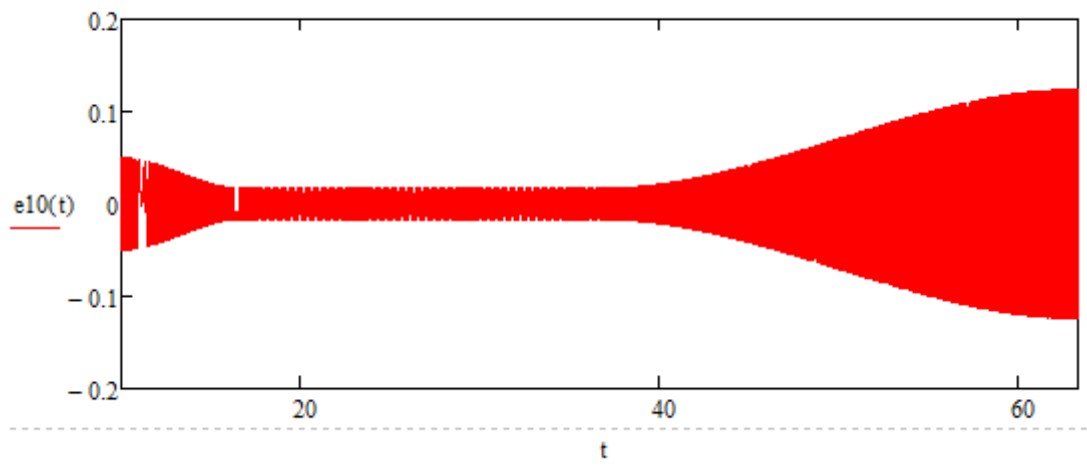
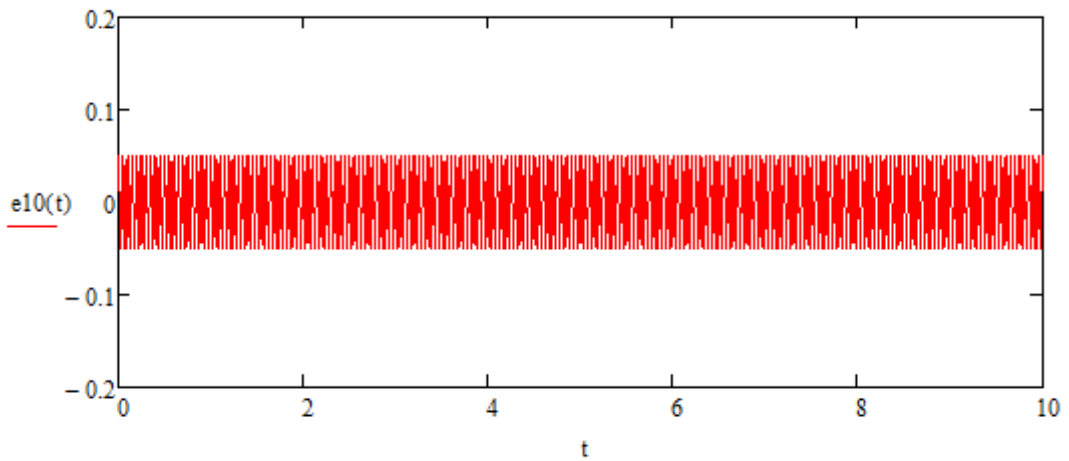
$$\Psi_{10}(t) := M_3 \cdot i_9(t) \cdot B_{501} \cdot \Psi_{200}(t) \quad \Psi_{11}(t) := M_3 \cdot i_9(t) \cdot B_{501} \cdot \Psi_{200}(t)$$

$$e_{10}(t) := \Psi_{10}(t) \cdot V(t) \cdot \frac{K_{321} K_{322}}{K_{320}} \quad e_{11}(t) := \Psi_{11}(t) \cdot V(t) \cdot \frac{K_{321} K_{322}}{K_{320}}$$

$$L_{10} := K_{10} + M_3$$

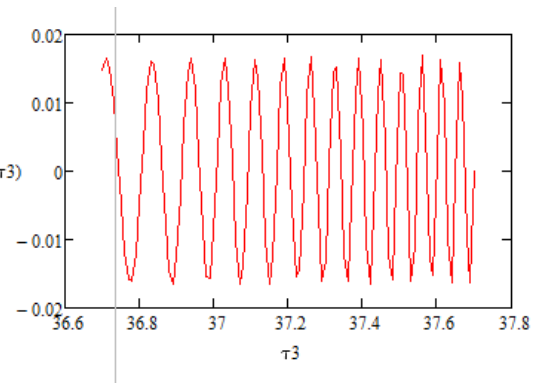
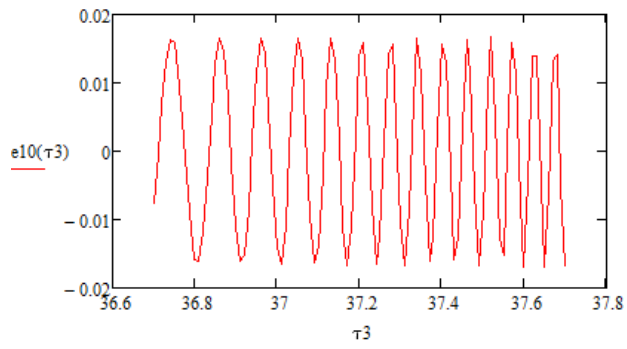
$$L_{11} := K_{11} + M_3$$

$$i_{10}(t) := \frac{-1}{L_{10}} \int_0^t e_{10}(t) dt \quad i_{11}(t) := \frac{-1}{L_{11}} \int_0^t e_{11}(t) dt$$



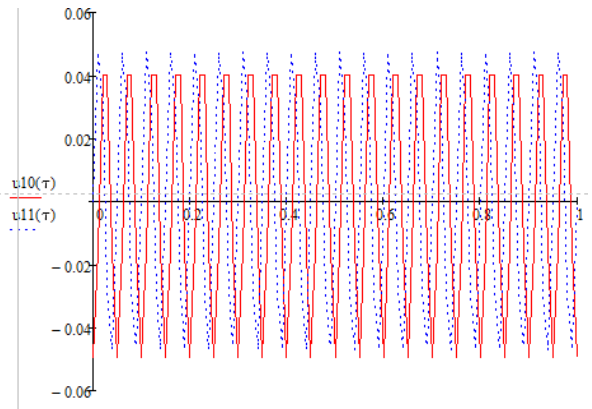
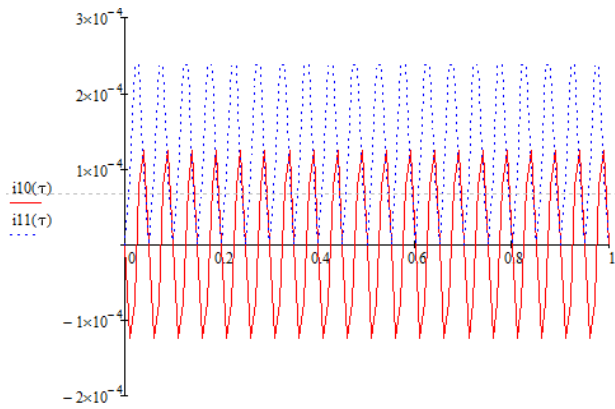
Рассмотрим  $e(t)$  на более мелком участке:





$$u_{10}(t) := R_{10} \cdot i_{10}(t) - e_{10}(t)$$

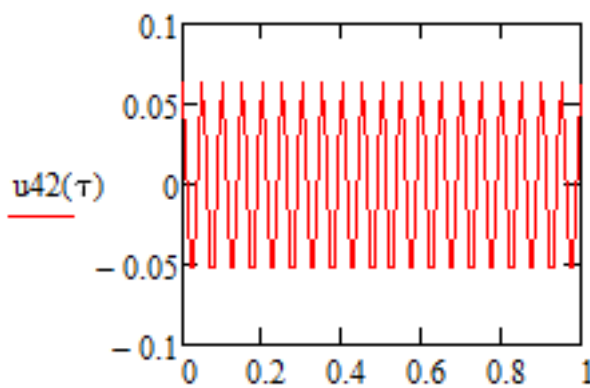
$$u_{11}(t) := R_{11} \cdot i_{11}(t) - e_{11}(t)$$



$$\underline{R10} := 1$$

$$i41(t) := \frac{i11(t)}{\cos\left(\varphi1 + \frac{\pi}{18}\right)}$$

$$u42(t) := R10 \cdot i41(t) - \frac{L10}{L11 \cdot \cos\left(\varphi1 + \frac{\pi}{18}\right)} \cdot e10(t)$$

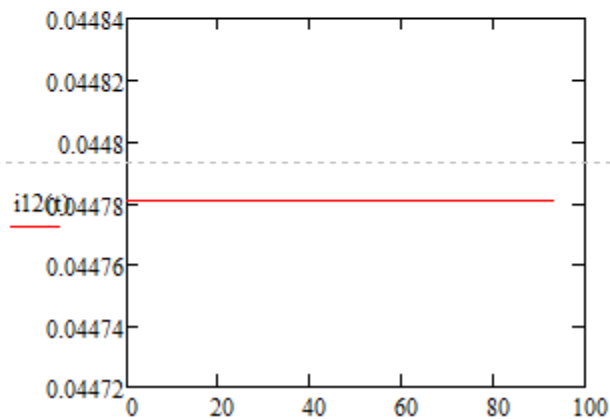


Как видно из графика  $u42(t)$ , период равен:

$$u142 := \sqrt{\frac{1}{T2} \int_0^{T2} u42(t)^2 dt} \quad K512 := 1$$

$$u12(t) := K512 \cdot u142$$

$$i12(t) := \frac{u12(t)}{R10}$$



### Проверка равенства моментов:

$$\begin{aligned}
 A_{31} &:= 1 & K_{40} &:= 1 & A_{20} &:= 1 & B_{20} &:= 1 & A_{21} &:= 0 \\
 A_{10} &:= 20 & B_{10} &:= 0 & A_{11} &:= 0 & A_{12} &:= 0 & A_{22} &:= 0 \\
 & & & & & & & & K_{50} &:= 1 \\
 & & & & & & K_{20} &:= -1 & K_{23} &:= 1
 \end{aligned}$$

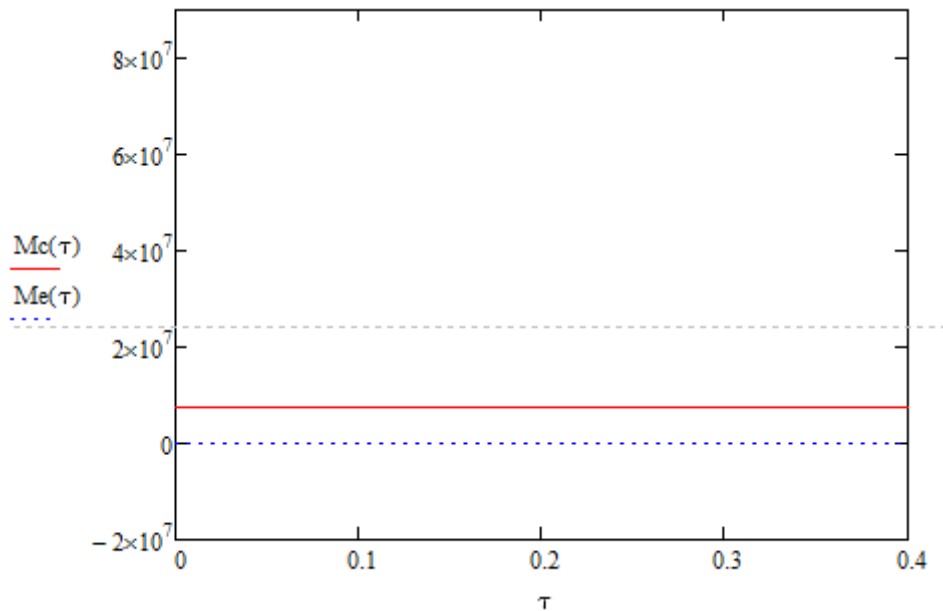
$$J(t) := A_{31} \cdot \sin(2\pi f_{10} \cdot t - K_{40})$$

$$J_c(t) := A_{20} \cdot (J(t))^{B_{20}} + A_{21} \cdot J(t) + A_{22} \quad \Psi_2(t) := M_2 \cdot i_2(t)$$

$$\begin{aligned}
 B_{10} &:= 1 & C_{101} &:= 1 & C_{100} &:= 59974 & A_{10} &:= C_{100} \cdot C_{101}
 \end{aligned}$$

$$M_c(t) := A_{10} \cdot (\omega_p(t))^{B_{10}} \quad +$$

$$M_e(t) := \Psi_1(t) \cdot \Psi_2(t) \cdot K_{50} + M_2 \cdot K_{20} \cdot (i_4(t) \cdot i_8(t) + i_5(t) \cdot i_8(t)) + M_3 \cdot K_{23} \cdot (i_9(t) \cdot i_{11}(t))$$



## Приложение Б

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** <sup>(11)</sup> **2 470 446** <sup>(13)</sup> **C1**

(51) МПК  
*H02K 29/00* (2006.01)  
*H02K 19/38* (2006.01)  
*H02K 19/36* (2006.01)  
*H02K 1/06* (2006.01)

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2011121592/07, 27.05.2011

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
27.05.2011

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 27.05.2011

(45) Опубликовано: 20.12.2012 Бюл. № 35

(56) Список документов, цитированных в отчете о  
поиске: RU 2402858 C1, 27.10.2010. RU 2351055  
C1, 27.03.2009. RU 2316877 C1, 10.02.2008. RU  
50059 U1, 10.12.2005. RU 2095923 C1,  
10.11.1994. RU 2147155 C1, 27.03.2000. GB  
2443032 A, 23.04.2008. JP 43-50147 B2,  
21.10.2009. US 4982123 A, 01.01.1991.  
КАШИН Я.М., КИРИЛЛОВ Г.А.,  
РАКЛО А.В. Авиационное  
электрооборудование самолетов. Часть 1.  
Министерство обороны (см. прод.)

Адрес для переписки:

350072, г.Краснодар, ул. Московская, 2, ГОУ  
ВПО "КубГТУ", отдел интеллектуальной  
собственности, проректору по НИИИД,  
проф. В.С. Симанкову

(72) Автор(ы):

Гайтов Багаудин Хамидович (RU),  
Кашин Яков Михайлович (RU),  
Гайтова Тамара Борисовна (RU),  
Кашин Александр Яковлевич (RU),  
Пауков Дмитрий Викторович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Государственное образовательное  
учреждение высшего профессионального  
образования "Кубанский государственный  
технологический университет" (ГОУ ВПО  
"КубГТУ") (RU)

RU 2 4 7 0 4 4 6 C 1

RU 2 4 7 0 4 4 6 C 1

## (54) СТАБИЛИЗИРОВАННЫЙ АКСИАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР ПОСТОЯННОГО ТОКА

(57) Реферат:

Изобретение относится к электротехнике, в частности к электрическим машинам постоянного тока. Технический результат, достигаемый настоящим изобретением, состоит в расширении области применения генератора за счет стабилизации выходного напряжения. Предлагаемый стабилизированный аксиальный генератор постоянного тока содержит корпус, подвозбудитель, возбудитель и основной генератор, у которого внутренний магнитопровод, боковой магнитопровод с одной активной торцевой поверхностью и боковой магнитопровод с двумя активными торцевыми поверхностями выполнены аксиальными. При этом, согласно данному

изобретению, в пазы бокового аксиального магнитопровода с двумя активными торцевыми поверхностями со стороны внутреннего аксиального магнитопровода уложена дополнительная обмотка возбуждения возбудителя, а в нижней части корпуса генератора установлен регулятор напряжения, состоящий из измерителя отклонений напряжения, предварительного усилителя, блока усиления мощности и силовой части. Измеритель отклонений напряжения включен на выходное напряжение генератора, а дополнительная обмотка возбуждения возбудителя подключена к силовой части регулятора напряжения. 2 ил.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** <sup>(11)</sup> **2 450 411** <sup>(13)</sup> **C1**

(51) МПК  
*H02K 19/38* (2006.01)  
*H02K 21/12* (2006.01)

**(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ**

(21)(22) Заявка: 2011101117/07, 12.01.2011

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
12.01.2011

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 12.01.2011

(45) Опубликовано: 10.05.2012 Бюл. № 13

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 2349014 C1, 10.03.2009. RU 2091967 C1, 27.09.1997. RU 97117436 A, 20.08.1999. DE 10002092, 13.06.2001. DE 1931946 U, 03.02.1966. FR 533379 A, 01.03.1922. DE 2810645 A1, 20.09.1979.

Адрес для переписки:

350072, г.Краснодар, ул. Московская, 2, ГОУ ВПО "КубГТУ", Отдел интеллектуальной и промышленной собственности, проректору по НИИД, проф. В.С. Симанкову

(72) Автор(ы):

Гайтов Багаудин Хамидович (RU),  
Кашин Яков Михайлович (RU),  
Гайтова Тамара Борисовна (RU),  
Кашин Александр Яковлевич (RU),  
Пауков Дмитрий Викторович (RU),  
Голощанов Андрей Владимирович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Кубанский государственный технологический университет" (ГОУ ВПО "КубГТУ") (RU)

**(54) АКСИАЛЬНАЯ ДВУХВХОДОВАЯ БЕСКОНТАКТНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МАШИНА-ГЕНЕРАТОР**

(57) Реферат:

Изобретение относится к области электротехники, в частности к электромеханическим преобразователям энергии, и может быть использовано в качестве преобразователя механической энергии вращения, подаваемой на механический вход машины, и электрической энергии постоянного тока, одновременно подаваемой на ее электрический вход, в суммарную электрическую энергию переменного тока. Аксиальная двухвходовая бесконтактная электрическая машина-генератор содержит корпус, постоянный многополюсный магнит индуктора подвозбудителя, боковой аксиальный магнитопровод с многофазной обмоткой якоря подвозбудителя, однофазной обмоткой возбуждения возбудителя и дополнительной обмоткой возбуждения возбудителя, которая подключается к источнику постоянного тока через контакты,

внутренний аксиальный магнитопровод с многофазной обмоткой якоря возбудителя и однофазной обмоткой возбуждения основного генератора, боковой аксиальный магнитопровод с многофазной обмоткой якоря основного генератора, вал, закрепленный в подшипниковых узлах и жестко связанный с постоянным многополюсным магнитом индуктора подвозбудителя и с внутренним аксиальным магнитопроводом посредством соответствующих дисков. Однофазная обмотка возбуждения возбудителя подключается к многофазной обмотке якоря подвозбудителя через многофазный двухполупериодный выпрямитель. Однофазная обмотка возбуждения основного генератора подключается к многофазной обмотке якоря возбудителя через многофазный двухполупериодный выпрямитель. Технический результат, достигаемый при использовании настоящего изобретения,



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(51) МПК

*H02K 11/00* (2006.01)*H02K 29/00* (2006.01)**(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ**

(21)(22) Заявка: 2011111479/07, 25.03.2011

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
25.03.2011

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 25.03.2011

(45) Опубликовано: 27.10.2012 Бюл. № 30

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 2402858 C1, 27.10.2010. RU 2145461 C1, 10.02.2000. RU 2095923 C1, 10.11.1997. RU 2332773 C1, 27.08.2008. SU 1368946 A1, 23.01.1988. SU 1814188 A1, 07.05.1993. SU 886157 A, 30.11.1981. US 4496897 A, 29.01.1985. DE 2062654 A1, 24.06.1971. КАШИН Я.М., КИРИЛЛОВ Г.А., РАКЛО А.В. Авиационное оборудование самолетов. Часть 1, Министерство обороны (см. прод.)

Адрес для переписки:

350072, г.Краснодар, ул. Московская, 2, ГОУ ВПО "КубГТУ", отдел интеллектуальной и промышленной собственности, проректору по НИИД, проф. В.С. Симанкову

(72) Автор(ы):

Гайтов Багаудин Хамидович (RU),  
Кашин Яков Михайлович (RU),  
Гайтова Тамара Борисовна (RU),  
Кашин Александр Яковлевич (RU),  
Пауков Дмитрий Викторович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Кубанский государственный технологический университет" (ГОУ ВПО "КубГТУ") (RU)

**(54) СТАБИЛИЗИРОВАННЫЙ АКСИАЛЬНЫЙ БЕСКОНТАКТНЫЙ ГЕНЕРАТОР ПОСТОЯННОГО ТОКА**

(57) Реферат:

Изобретение относится к области электротехники, в частности к бесконтактным электрическим машинам постоянного тока. Предлагаемый стабилизированный аксиальный бесконтактный генератор постоянного тока содержит корпус, подвозбудитель, возбудитель, основной генератор и регулятор напряжения. Согласно настоящему изобретению, регулятор напряжения установлен в нижней части корпуса генератора и состоит из электромагнита, к якорю которого жестко прикреплена пружина, и угольного столба,

набранного из ряда наложенных друг на друга угольных шайб, сжимаемых пружиной. При этом рабочая обмотка электромагнита регулятора напряжения подключена к выходу генератора, а угольный столб включен в цепь обмотки возбуждения возбудителя, при этом сопротивление угольного столба зависит от силы сжатия угольных шайб указанной пружиной. Технический результат, достигаемый при использовании настоящего изобретения, состоит в расширении области применения генератора за счет обеспечения стабилизации выпрямленного напряжения. 3 ил.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** (11) **2 475 924** (13) **C1**

(51) МПК  
*H02K 15/02* (2006.01)  
*H01F 41/02* (2006.01)

**(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ**

(21)(22) Заявка: 2011134971/07, 19.08.2011

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
19.08.2011

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 19.08.2011

(45) Опубликовано: 20.02.2013 Бюл. № 5

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 2316877 C1, 10.02.2008. RU 2074480 C1, 27.02.1997. SU 1742946 A1, 23.06.1992. RU 2171534 C1, 27.07.2001. DE 2150313 A1, 13.04.1972. US 4116033 A, 26.09.1978.  
ПАЛАСТИН Л.М. Электрические машины автономных источников питания. - М.: Энергия, 1972, §7-4, с.122-131.

Адрес для переписки:

350072, г.Краснодар, ул. Московская, 2, ГОУ ВПО КубГТУ, отдел интеллектуальной и промышленной собственности, проректору по НИИД, проф. М.Ю. Тамовой

(72) Автор(ы):

Гайтов Багаудин Хамидович (RU),  
Кашин Яков Михайлович (RU),  
Автайкин Илья Николаевич (RU),  
Гайтова Тамара Борисовна (RU),  
Кашин Александр Яковлевич (RU),  
Пауков Дмитрий Викторович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Кубанский государственный технологический университет" (ГОУ ВПО "КубГТУ") (RU)

**(54) СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МАГНИТОПРОВОДОВ АКСИАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН**

(57) Реферат:

Изобретение относится к области электротехники, а именно к технологии изготовления электрических машин, и может быть использовано при изготовлении магнитопроводов пакетов статора и ротора для аксиальных электрических машин, например, пакетов статора и ротора аксиальных синхронных и асинхронных машин, пакетов якоря аксиальных электродвигателей и генераторов постоянного тока, магнитопроводов аксиальных трансформаторов и др. Технический результат, достигаемый настоящим изобретением, состоит в обеспечении равномерного магнитного насыщения магнитопроводов, более эффективном использовании магнитного материала, повышении энергетических (коэффициента мощности  $\cos \varphi$  и КПД  $\eta$ ), а

также в улучшении массогабаритных показателей аксиальных электрических машин. При осуществлении предлагаемого способа изготовления магнитопроводов аксиальных электродвигателей ролонную холоднокатаную электротехническую сталь в движении протяжкой разрезают одновременно на расчетное количество полос расчетной ширины и количества, до сборки осуществляют в полосах вырубку пазов и отжиг, затем наматывают каждую полосу на свое внутреннее ферромагнитное кольцо расчетного диаметра с последующей напрессовкой соответствующего количества наружных ферромагнитных колец соответствующих диаметров на стальной пакет расчетного наружного диаметра. При этом, согласно настоящему изобретению, на расчетных расстояниях от начала полосы

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2011614738

«Программа для расчета аксиального  
бесконтактного генератора постоянного тока»

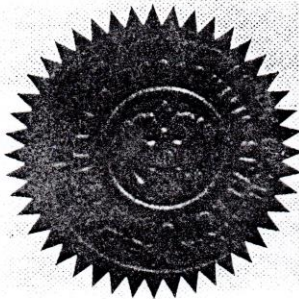
Правообладатель(ли): *Государственное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Кубанский государственный технологический университет»  
(ГОУВПО КубГТУ) (RU)*

Автор(ы): *Гайтов Багаудин Хамидович, Кашин Яков Михайлович,  
Гайтова Тамара Борисовна, Рябухин Михаил Иванович, Кашин  
Александр Яковлевич, Пауков Дмитрий Викторович (RU)*

Заявка № 2011612957

Дата поступления 26 апреля 2011 г.

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ  
16 июня 2011 г.



Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной  
собственности, патентам и товарным знакам

Б.П. Симонов



## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2011614739

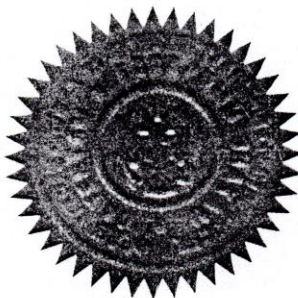
«Программа для расчета формы кривой выходного напряжения аксиального многофазного трансформатора с вращающимся магнитным полем при обрыве и пробое фаз»

Правообладатель(ли): *Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кубанский государственный технологический университет» (ГОУВПО КубГТУ) (RU)*

Автор(ы): *Гайтов Багаудин Хамидович, Кашин Яков Михайлович, Гайтова Тамара Борисовна, Рябухин Михаил Иванович, Кашин Александр Яковлевич, Пауков Дмитрий Викторович (RU)*

Заявка № 2011612958

Дата поступления 26 апреля 2011 г.

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ  
16 июня 2011 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам

Б.П. Симонов

## Приложение В

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
КУБАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



ИНСТИТУТ НЕФТИ, ГАЗА И ЭНЕРГЕТИКИ

350058 г. Краснодар, ул. Старокубанская, 88/4  
Тел./факс 8 (861) 233-18-45

www.kubstu.ru, E-mail: [antoniadi@kubstu.ru](mailto:antoniadi@kubstu.ru)



26.09.2017 г., № 210-ИНГЭ  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ  
Директор института нефти, газа и  
энергетики КубГТУ  
д.т.н., проф.

Антониади Д.Г.  
26 сентября 2017 г.

### А К Т

о реализации в учебном процессе кафедры электротехники и электрических машин  
Института нефти, газа и энергетики ФГБОУ ВО «Кубанский государственный  
технологический университет» результатов диссертационной работы соискателя  
Паукова Дмитрия Викторовича  
на тему «Совершенствование системы электроснабжения воздушных судов на  
основе аксиального бесконтактного генератора постоянного тока»

Комиссия в составе председателя д.т.н., проф. Гайтова Б.Х. и членов: к.т.н.,  
доц. Копелевича Л.Е., к.т.н., доц. Самородова А.В., к.т.н., доц. Квона А.М.  
установила, что на кафедре электротехники и электрических машин ИНГЭ  
КубГТУ реализованы:

1) разработанные Пауковым Д.В. на уровне изобретений аксиальные  
бесконтактные генераторы постоянного тока (патенты РФ № 2450411, 2465706,  
2470446) использованы при разработке лекции «Синхронные электрические  
машины» по дисциплине «Электрические машины» для студентов направления  
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

2) разработанная Пауковым Д.В. математическая модель аксиального  
бесконтактного генератора постоянного тока использована при подготовке  
выпускных квалификационных работ студентами направления 13.04.02  
«Электроэнергетика и электротехника».


**Председатель комиссии:**  
д.т.н., проф.

  
Гайтов Б.Х.

**Члены комиссии:**  
к.т.н., доц.

  
Копелевич Л.Е.

к.т.н., доц.

  
Самородов А.В.

к.т.н., доц.

  
Квон А.М.

УТВЕРЖДАЮ

Директор завода

«ДСТ-Урал»

Горохов К.Н.



**Акт**

о реализации результатов диссертационной работы соискателя

Паукова Дмитрия Викторовича

на заводе «ДСТ-Урал»

Результаты кандидатской диссертационной работы Паукова Дмитрия Викторовича на тему «Совершенствование системы электроснабжения воздушных судов на основе аксиального бесконтактного генератора постоянного тока» использованы при проектировании генераторной установки на тракторе-путьекладчике ТМ-10 для нужд Министерства обороны.

Главный конструктор  
завода «ДСТ-Урал»

А.А.Танин-Шахов

18.01.2018

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель главного конструктора

АО «НПО «Электромашина»



2017г.

**Акт**

о реализации результатов диссертационной работы соискателя

Паукова Дмитрия Викторовича

на АО «НПО «Электромашина»

Результаты кандидатской диссертационной работы Паукова Дмитрия Викторовича на тему «Совершенствование системы электроснабжения воздушных судов на основе аксиального бесконтактного генератора постоянного тока» (патент на изобретение № 2470446 от 20.12.2012 г.) использованы в исследовании источников постоянного тока, улучшающих эксплуатационные показатели перспективных систем электроснабжения.

Данные результаты будут учтены при дальнейшей модернизации систем электроснабжения в продукции военного назначения.

Начальник отдела

A handwritten signature in black ink, written over a horizontal line.

УТВЕРЖДАЮ  
Заместитель начальника ВУНЦ ВВС  
«ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»  
(г. Воронеж)  
по учебной и научной работе

генерал-майор  В. Казаков

« 20 »  2017 г.

### А К Т

реализации результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук Паукова Дмитрия Викторовича на специальную тему, в учебном процессе ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

Комиссия в составе:  
председателя комиссии:  
начальника учебно-методического центра ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж) полковника Шуклина И.К.  
(должность, в/зв., ФИО)

членов комиссии:  
начальника 9 факультета полковника Демчука В.А.  
(должность, в/зв., ФИО)

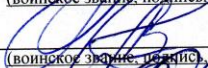
начальника кафедры №91 полковника Онуфриенко В.В.  
(должность, в/зв., ФИО)

начальника кафедры №92 полковника Лущика А.В.  
(должность, в/зв., ФИО)



составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук на специальную тему, выполненной Пауковым Д.В., использованы при разработке учебно-методических материалов при организации учебного процесса на 9 факультете Авиационного оборудования, а именно:

- на 91 кафедре Электрооборудования (и оптико-электронных систем) 9 факультета Авиационного оборудования при подготовке учебно-методических материалов для проведения занятий по дисциплине «Авиационные электрические машины» Раздел №3, Тема №8, Лекция №21 «Авиационные генераторы постоянного тока», Практическое занятие №6 «Конструкция и эксплуатация машин постоянного тока».

Председатель комиссии: полковник  И. Шуклин  
(военское звание, подпись, фамилия)

Члены комиссии: полковник  В. Демчук  
(военское звание, подпись, фамилия)

полковник  В. Онуфриенко  
(военское звание, подпись, фамилия)

« 17 »  2017 г. полковник  А. Лущик  
(военское звание, подпись, фамилия)