

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи

Падалко Дмитрий Андреевич

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ ГЕНЕРИРОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЕ С
АСИНХРОННОЙ МАШИНОЙ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Гарганеев А.Г.

Томск – 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 ОБЗОР ПРИМЕНЯЕМЫХ САМОВОЗБУЖДАЮЩИХСЯ АВТОНОМНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ	14
1.1 Специфика применения систем генерирования электроэнергии автономных объектов	14
1.2 Обзор выполненных исследований асинхронных генераторов.....	18
1.2.1 Трактовки явления самовозбуждения асинхронных генераторов.....	21
1.2.2 Математическое описание процесса самовозбуждения АГ	27
1.2.3 Способы возбуждения асинхронных генераторов	33
1.3 Представление явления самовозбуждения АГ через понятия устойчивости	41
Выводы. Постановка задач на исследование.	44
ГЛАВА 2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ САМОВОЗБУЖДЕНИЯ И УСТОЙЧИВОСТИ РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА.....	46
2.1 Метод имитационного моделирования для описания электромеханических систем	47
2.2 Описание электромеханических систем с позиций теории автоматического управления.....	48
2.2.1 Определение условий самовозбуждения АГ	48
2.2.2 Определение условий самовозбуждения ГПТ	57
2.2.3 Оценка методов ТАУ применительно к электромеханическим системам	62
2.3 Описание электрических машин с помощью дифференциальных уравнений	63
2.3.1 Представление объекта исследования как системы дифференциальных уравнений	63
2.3.2 Дифференциальные уравнения асинхронной машины	66
2.3.3 Дифференциальные уравнения асинхронных генераторов	71
2.3.4 Математическая модель полупроводниковых преобразователей	73
2.4 Определение условий самовозбуждения частотными методами	77
2.5 Выводы по главе	87

ГЛАВА 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО РЕЗОНАНСА И МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЫ С АСИНХРОННОЙ МАШИНОЙ И ИНВЕРТОРНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ	89
3.1 Параметрический резонанс асинхронных генераторов	89
3.1.1 Моделирование параметрического резонанса	93
3.2 Определение требуемой емкости и мощности при конденсаторном возбуждении АГ	98
3.3 Реактивная мощность при инверторном возбуждении	104
3.4 Моделирование асинхронного генератора с инверторным возбуждением.....	108
3.5 Выводы по главе	125
ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЫ ГЕНЕРИРОВАНИЯ С АСИНХРОННОЙ МАШИНОЙ	127
4.1 Особенности экспериментальной установки	127
4.2 Измерительные приборы	131
4.3 Ход эксперимента. Результаты	133
4.4 Апробация работы модели мехатронной системы генерирования....	138
4.4 Выводы по главе	141
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	142
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	144
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	145
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	160
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	162
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	164
ПРИЛОЖЕНИЕ 4	165
ПРИЛОЖЕНИЕ 5	166
ПРИЛОЖЕНИЕ 6	167
ПРИЛОЖЕНИЕ 7	175
ПРИЛОЖЕНИЕ 8	177
ПРИЛОЖЕНИЕ 9	180
ПРИЛОЖЕНИЕ 10	181

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Ежегодное увеличение потребителей электроэнергии, рост производства и расширение парка автономных объектов, в частности электрифицированных транспортных средств, приводят к необходимости рассмотрения вопросов увеличения мощности автономных систем генерирования электроэнергии (СГЭЭ) и оптимизации их энергетических, массогабаритных и стоимостных показателей. Особое значение при рассмотрении вопросов генерирования электроэнергии имеет тип электромеханического преобразователя, используемый в качестве генератора. В настоящее время наибольшее распространение получили генераторы, построенные на базе синхронных машин и машин постоянного тока. Системы генерирования электроэнергии, построенные на электрических машинах этого типа, обладая рядом неоспоримых достоинств, имеют и недостатки, ограничивающие их использование в условиях повышенной пожаро- и взрывоопасности, аварийных ситуациях при коротких замыканиях, условиях вибраций, разряженной атмосферы и т.п., в том числе для автономных объектов. Наиболее распространенной и широко применяемой электрической машиной является асинхронная машина. Несмотря на простоту конструкции и технического обслуживания, наилучшую эксплуатационную надежность, отсутствие щеточно-коллекторного узла данный тип преобразователей не получил широкого применения в генераторных установках. Причиной, сдерживающей использование асинхронных машин, служили следующие факторы:

- необходимость дорогостоящего и громоздкого источника емкостной реактивной энергии;
- сложные схемы регулирования и стабилизации параметров генерируемого напряжения.

Частично вопрос удешевления и уменьшения источника реактивной энергии был решен в начале XXI века, когда в России и за рубежом были созданы высокоэффективные пленочные самовосстанавливающиеся конденсаторы серий

К78-98, СВВ 60, массогабаритные показатели которых были значительно лучше показателей предыдущих серий. Развитие элементной базы и схемотехники управления полупроводниковыми устройствами силовой электроники позволяет полностью решить вопросы, ограничивающие использование асинхронной машины в качестве генератора. Теоретический и практический интерес представляет СГЭЭ типа “асинхронная машина – автономный инвертор напряжения” (АМ – АИН), в которой автономный инвертор напряжения выступает в качестве регулируемого источника реактивного тока для асинхронной машины, работающей в генераторном режиме. Источником реактивного тока является конденсатор в цепи постоянного тока инвертора, а сам инвертор работает в режиме широтно-импульсной модуляции выходного напряжения.

Существующее разногласие в понимании теоретических трактовок явления самовозбуждения асинхронного генератора (АГ) не позволяет однозначно дать рекомендации, гарантирующие надежное возбуждение системы типа “АМ – АИН”. Работа асинхронной машины, как и прочих электромеханических преобразователей, основана на законах электродинамики, что дает возможность говорить об общности процесса генерации в машинах постоянного и переменного тока. Классические методы изучения электромеханических систем позволяют определить как различные факторы и степень влияния параметров СГЭЭ на переходный процесс самовозбуждения, так и работу СГЭЭ в динамическом и статическом режиме с целью выявления рекомендаций по выбору и оптимизации параметров системы. Таким образом, исследование электромагнитных процессов, условий работы и функционирования мехатронной системы генерирования с асинхронной машиной в переходных, статических и динамических режимах работы является актуальным, так как потенциально позволяет обеспечить стабильную работу и высокое качество генерируемого напряжения.

Степень разработанности темы исследования. Большой вклад в развитие теоретических и экспериментальных исследований АГ внесли отечественные и зарубежные ученые: И.И. Алиев, А-З.Р. Джендубаев, Ю.Д. Зубков, С.И. Кицис, М.Л. Костырев, А.В. Нетушил, Г. А. Сипайлов, А.И. Скороспешкин,

3. Гентковски и многие другие. В их работах поднимаются вопросы трактовки явления самовозбуждения [12, 13, 26, 28, 37, 49-55, 58, 64-67, 97, 99, 119]; математического описания переходного [36, 38, 61-63, 71-72] и стационарного [9-11, 66, 73-75, 116] режимов работы асинхронного генератора; определения условий и границ самовозбуждения [27, 50, 76, 97]; стабилизации амплитуды и частоты генерируемого напряжения [7, 105-109], оценки необходимого значения фазной емкости [64, 76, 81, 98], возбуждения от полупроводниковых преобразователей [2-5, 8, 43].

Цель и задачи работы. Целью диссертационной работы является комплексный анализ электромагнитных процессов в мехатронной системе генерирования (МСГ) “асинхронная машина – автономный инвертор напряжения” в части условий самовозбуждения системы и ее функционирования в рабочем и аварийном режимах.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Выполнить обзор существующих трактовок возбуждения АГ для раскрытия причины и условий возникновения явления самовозбуждения в МСГ типа “АМ – АИН”.

2. Определить условия самовозбуждения АГ с конденсаторным возбуждением и в составе МСГ.

3. Сформулировать рекомендации по проектированию МСГ электроэнергии на основе асинхронной машины в части реализации условий самовозбуждения и оптимальных режимов работы.

4. Разработать математическую и имитационную модели АГ с конденсаторным и инверторным возбуждением для изучения особенностей функционирования МСГ “АМ – АИН” в рабочем и аварийном режимах.

5. Провести экспериментальные исследования для проверки теоретических положений.

Объектом исследования является мехатронная система генерирования электроэнергии, состоящая из асинхронной машины и автономного инвертора напряжения, как источника реактивного тока.

Предметом исследования являются электромагнитные процессы мехатронной системы генерирования “АМ – АИН”, включая режим самовозбуждения системы и генерации электроэнергии в статическом и динамическом режиме работы.

Научная новизна работы:

1. С применением математического аппарата теории автоматического управления доказана физическая общность и аналогичность процессов самовозбуждения в электрических машинах различных типов.

2. Показано, что в МСГ “АМ – АИН” конструктивные особенности зубцовой зоны АМ и периодическая коммутация ключей инвертора, способствует реализации параметрического резонанса как причины самовозбуждения МСГ.

3. Получены математические условия самовозбуждения электрических машин-генераторов переменного и постоянного тока при работе на ХХ и нагрузку. Получено выражение необходимой реактивной мощности для возникновения режима самовозбуждения АГ.

4. Разработана имитационная модель регулируемой мехатронной системы генерирования на базе асинхронной машины и автономного инвертора напряжения для анализа переходных, статических, динамических и аварийных режимов работы.

Теоретическая значимость работы заключается в обосновании явления самовозбуждения асинхронного генератора как следствия параметрического резонанса в контуре «асинхронная машина – автономный инвертор – конденсатор», доказательстве общности и аналогичности процессов самовозбуждения в генераторах переменного и постоянного тока, а также в выявлении механизма регулирования параметров выходного напряжения в замкнутой мехатронной системе.

Практическая значимость работы:

1. Разработаны структурные схемы СГЭЭ на основе электрических машин различного типа, позволяющие исследовать их динамические режимы работы и процесс самовозбуждения.

2. Предложена методика определения частоты генерируемого напряжения, основанная на частотном анализе передаточной функции и полного сопротивления СГЭЭ с асинхронной машиной.

3. Получено математическое выражение для расчета реактивной мощности, необходимой для существования режима генерирования электроэнергии в системе типа «АМ – АИН».

4. Разработана модель мехатронной СГЭЭ типа «АМ – АИН», позволяющая исследовать режимы самовозбуждения, штатного функционирования, короткого замыкания и параллельной работы нескольких асинхронных генераторов.

Методология диссертационного исследования. Методологической основой диссертационного исследования послужили направления, концепции и системы научного знания отечественных и зарубежных ученых в области разработки и проектирования электромеханических систем генерирования электроэнергии.

Методы диссертационного исследования. Для решения поставленных задач по исследованию явления возбуждения и режимов МСГ типа «АМ – АИН» в диссертационной работе использовались методы теории автоматического управления, математический метод описания с помощью систем дифференциальных уравнений, метод визуального имитационного моделирования.

В проведенных исследованиях использованы следующие программные продукты: *Matlab R2016a, Simulink, Mathcad 15, Elcut 5.1.*

На защиту выносятся следующие положения и результаты:

1. Модуляция индуктивности асинхронной машины за счет пульсации индукции в воздушном зазоре и периодическая коммутация ключей автономного инвертора обеспечивают возникновение самовозбуждения в системе типа «АМ – АИН» на основе явления параметрического резонанса.

2. Математические выражения, определяющие условия существования режима самовозбуждения в генераторах постоянного и переменного тока в зависимости от их параметров и внешней нагрузки.

3. Условие возбуждения мехатронной СГЭЭ типа «АМ – АИН», определяющее необходимое количество реактивной мощности, поставляемой конденсатором звена постоянного тока автономного инвертора.

4. Результаты экспериментального исследования, подтверждающие адекватность математической и имитационной моделей регулируемой автономной СГЭЭ типа «АМ – АИН», позволяющие оценить рабочие характеристики.

Степень достоверности и апробация результатов исследования.

Достоверность полученных результатов определяется корректным использованием научно-обоснованных методов исследований, сходимостью экспериментальных и расчетных данных. Результаты, полученные при проведении экспериментальных испытаний, подтверждают справедливость научных положений и применимость предложенных методов, технических решений и выводов.

Апробация работы и публикации. Основные материалы исследования и отдельные положения докладывались и получили одобрение на следующих конференциях и научно-технических форумах: VIII Международная научно-практическая конференция “Электронные средства и системы управления” г. Томск: ТУСУР – 2012 г.; 14th *International Conference “Micro/Nanotechnologies and Electron Devices”*, г. Новосибирск: НГТУ – 2013 г.; 15th *International Conference “Micro/Nanotechnologies and Electron Devices”*, г. Новосибирск: НГТУ – 2014 г.; Международная конференция “Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит”, г. Харьков: ХПИ – 2013 г.; XX международная научно-практическая конференция “Современные техника и технологии”, г. Томск: ТПУ – 2014 г.; III российская научная школа-конференция “Энергетика, электромеханика и энергоэффективность глазами молодежи”, г. Томск: ТПУ – 2015 г.; III Международный молодежный форум “Интеллектуальные энергосистемы”, г. Томск: ТПУ – 2015 г.; VII международная научно-техническая конференция “Электромеханические преобразователи энергии”, г. Томск: ТПУ – 2015 г.;

17th International Conference “Micro/Nanotechnologies and Electron Devices”, г. Новосибирск: НГТУ – 2016 г.

По теме диссертационной работы опубликовано 14 работ, в том числе 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК при Министерстве образования и науки Российской Федерации для соискателей ученых степеней, 3 публикации, входящих в международную базу *SCOPUS*.

Внедрение результатов исследований.

Результаты диссертационной работы были использованы на предприятии ООО «Трамис-Арм», г. Новочеркасск при проектировании автономной системы генерирования электроэнергии на основе асинхронного генератора с безредукторным приводом для железнодорожных вагонов, а также в учебном процессе кафедры Электротехнических комплексов и материалов Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета при подготовке бакалавров по направлению 13.03.02 и магистров по направлению 13.04.02 (Электроэнергетика и электротехника) по профилям «Электрооборудование летательных аппаратов» и «Электротехнические комплексы автономных объектов».

Личный вклад автора. Автор диссертационной работы принимал непосредственное участие в теоретических исследованиях, разработке, планировании и проведении экспериментальных исследований; анализе и обобщении полученных данных; написании текстов статей и докладов. Пять работ написаны автором единолично. В работах, написанных в соавторстве, автору принадлежат: имитационная модель асинхронного генератора, математические выражения условий возбуждения АГ, моделирование системы регулирования напряжения, модель и метод исследования параметрического контура, результаты частотного анализа систем генерирования на базе асинхронной машины.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа содержит введение, основное содержание в четырех главах, заключение, изложена на 181 страницах машинописного текста и содержит 53 рисунка, 14 таблиц,

10 приложений и список использованных источников литературы из 141 научной работы.

Во введении указана проблематика и обоснована актуальность вопроса создания систем генерирования электроэнергии на базе асинхронной машины с возбуждением от полупроводниковой техники. Приведены имена деятелей науки, внесших наиболее существенный вклад в исследование физических принципов работы асинхронного генератора. Указана цель и задачи приведенной работы.

В первой главе отмечены особенности работы систем генерирования на автономных объектах. Произведено сравнение и анализ генераторов, построенных на электрических машинах различных типов, используемых в качестве высоконадежного источника электроэнергии для автономных объектов. Выполнен обзор имеющихся теоретических и практических исследований по толкованию процесса самовозбуждения, методологии изучения электромеханических систем генерирования и фактического применения асинхронных генераторов в промышленности и сельском хозяйстве. Произведен анализ существующих методов возбуждения асинхронных машин. Выявлены основные проблемы, препятствующие распространению использования асинхронных генераторов, такие как: необходимость компактного реактивно-емкостного источника энергии, сложность стабилизации параметров выходного напряжения при вариации величины нагрузки и частоты вращения ротора. Представлено использование алгебраических и частотных методов исследования устойчивости/неустойчивости режимов работы асинхронного генератора для определения условий самовозбуждения и решения задачи о предельной нагрузке.

Вторая глава посвящена используемым в работе методам исследования. На основе принятых допущений проведена разработка математических и имитационных моделей асинхронного генератора с конденсаторным и инверторным возбуждением. Впервые представлено использование метода теории автоматического управления для анализа электромеханических систем генерирования на примере генератора постоянного тока параллельного возбуждения и асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением, на

основе чего получены известные и приведенные ранее в учебниках по “Электрическим машинам” условия возбуждения на холостом ходу, уточнены условия возбуждения при работе на активно-реактивную нагрузку. Представлены выражения критического сопротивления, приводящего к срыву генерации. Предложен метод анализа систем генерирования из частотных характеристик передаточной функции и полного сопротивления. Указана возможность повышения точности полученных результатов путем учета изменения величины скольжения при вариации нагрузки. Результатом проведенных исследований являются выражения частоты выходного напряжения асинхронного генератора. Частота генерируемого напряжения, характеризуется резонансным явлением и определяется реактивными параметрами емкости фазного конденсатора и индуктивностью намагничивающего контура асинхронной машины.

В третьей главе пояснена причина, способствующая явлению параметрического резонанса в асинхронном генераторе. Выполнено моделирование этого явления, изучено влияние кратности коммутации и величины скважности на процесс нарастания колебаний. Предложено выражение для определения величины фазной емкости и реактивной мощности, приведено сравнение расчетных и экспериментальных величин. Отклонение результатов не превышает 10% и нивелируется выбором емкости из стандартизованных рядов номинальных величин конденсаторов. Представлена имитационная модель мехатронной системы генерирования электроэнергии на базе асинхронной машины со стабильными параметрами амплитуды и частоты генерируемого напряжения. Проведена оценка характеристик СГЭЭ в стационарном и аварийном режимах работы. Показаны особенности работы предложенной МСГ, характеризующиеся использованием АИН в качестве источника активной энергии при перегрузке, и срывом генерации при межфазных коротких замыканиях.

В четвертой главе приведены принцип действия и алгоритм работы экспериментальных СГЭЭ с возбуждением от полупроводникового преобразователя частоты. Представлена апробация работы имитационной и

экспериментальной системы. Проведен анализ расчетных и экспериментальных результатов исследований.

В заключении приведены основные выводы по результатам выполненной диссертационной работы.

В приложениях представлены: программы для решения систем дифференциальных уравнений и полученные иллюстративные материалы результатов решения ДУ, выражения передаточной функции и полного сопротивления из частотного анализа, а также их действительные и мнимые части; описание подхода для определения резонансных частот из частотного метода; результаты экспериментальных исследований, акты внедрения на предприятии ООО «Трамис-Арм» и в учебный процесс кафедры Электротехнических комплексов и материалов Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Автор выражает глубокую благодарность к.т.н., доценту Бейерлейну Евгению Викторовичу, за неоценимую помощь в проведении экспериментальных исследований, и к.т.н., доценту Цукублину Анатолию Борисовичу за помощь при работе над диссертацией.

ГЛАВА 1

ОБЗОР ПРИМЕНЯЕМЫХ САМОВОЗБУЖДАЮЩИХСЯ АВТОНОМНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

1.1 Специфика применения систем генерирования электроэнергии автономных объектов

Одним из важнейших вопросов современной энергетики является создание высоконадежных и высокоэффективных систем генерирования электроэнергии (СГЭЭ). Особенно актуальны вопросы электроснабжения на объектах, где выдвигаются повышенные эксплуатационные требования надежности и безопасности: в авиационной промышленности, морских и речных судах, в автомобильных комплексах и т.д. Специфика автономных СГЭЭ, в частности для летательных аппаратов, заключается в условиях применения, которые характеризуются следующими факторами:

- широким диапазоном температур от -65° до 60° С;
- разреженностью атмосферы;
- большими механическими перегрузками;
- соизмеримостью мощности установленного генератора и потребителя;
- переменной частотой вращения авиадвигателя;
- работой при электрических перегрузках;
- обеспечением безопасности электрической машины (ЭМ) при возникновении короткого замыкания.

Кроме того источники электроэнергии, предназначенные для автономных систем, должны удовлетворять таким требованиям, как простота конструкции, удобство обслуживания, компактность при высоких массо-энергетических показателях (кВА/кг), надежность, стабильность выходных электрических параметров, соответствие мощности генератора и нагрузки для обеспечения высокого КПД. Первоочередный интерес представляют рабочие характеристики,

дающие зависимость частоты, скольжения, КПД и коэффициента мощности от полезной мощности генератора.

Относительный вес и габариты автономных электромеханических систем должны быть значительно ниже, по сравнению со стационарными системами наземных установок (таблица 1.1). Уменьшение габаритов и веса, за счет увеличения рабочей частоты напряжения, влечет за собой сокращение срока службы, применение более интенсивного охлаждения и гораздо более высококачественных изоляционных и магнитных материалов, позволяющих повысить тепловые, механические и магнитные нагрузки. В результате повышения нагрузок происходит повышение потерь, то есть снижение КПД [16, 113, 125, 141].

Таблица 1.1 – Соотношения массо-энергетических параметров электрических машин промышленного и авиационного назначения

Параметр	Типы электрических машин					
	Асинхронные		Синхронные		Постоянного тока	
	Н	А	Н	А	Н	А
Частота, Гц	50	400	50	400	66,7*	267*
Относительный полный вес**, кг/кВт	16	2	17,3	1,3	13,2	2
Соотношение веса	8		13,3		6,6	
<p>*Частота перемагничивания якоря в машине.</p> <p>**В широком диапазоне мощностей.</p> <p>Н – наземные, А – авиационные.</p>						

Сравнение массы регулируемых систем генерирования электроэнергии позволяет сделать вывод, что генераторы на основе асинхронной машины (АМ),

несмотря на использование дополнительного источника реактивной энергии, будут иметь меньшие массогабаритные показатели по сравнению с системами, построенными на синхронных машинах с обмоткой возбуждения на роторе и машинах постоянного тока. Генераторы на машинах с постоянными магнитами, могут иметь хорошие энергетические и массогабаритные показатели, однако регулирование генерируемого напряжения невозможно без использования дополнительных инверторов, что значительно увеличивает массогабаритные показатели [137, 138]. Что касается трехкаскадных генераторов то, по мнению автора, АГ с инверторным регулятором напряжения может быть конкурентоспособным по отношению к нему [20].

В таблице 1.2 представлено сравнение веса современных электрических машин средней мощности. Согласно приведенному сравнению, при соизмеримых мощностях ЭМ различного типа, наименьшей массой обладает асинхронная машина. Стоит понимать, что при выборе прочих моделей и материалов изготовления ЭМ, вес будет находиться в некотором диапазоне [113].

Таблица 1.2 – Сравнение веса электрических машин мощности 15-16кВт

Тип двигателя	Модель	Мощность, кВт	Вес, кг	Относительный вес, кг/кВт
Асинхронный	АИР160S2	15	116	7,74
Синхронный	СМС-200-16/4-У2	16	160	10
Постоянного тока	4ПНМС180МО4	15	180	12

При выставлении условиями эксплуатации жестких требований использование генераторов постоянного тока невозможно, из-за наличия ненадежного скользящего конструктивного элемента – щеточно-коллекторного узла, особенно плохо работающего в условиях разреженности атмосферы.

Наиболее востребованными и энергетически выгодными системами бортового электрооборудования на сегодняшний день являются комплексы на

основе синхронных генераторов (СГ) с постоянными магнитами. Исследованию систем на основе СГ с постоянными магнитами (СГПМ) при использовании преобразовательно-регулирующих устройств – полупроводниковых преобразователей (автономных инверторов и выпрямителей) посвящен целый ряд работ [14, 61, 84, 94, 100, 101]. Основным преимуществом таких генераторов является хорошая управляемость и жесткость внешней характеристики, неплохие массо-габаритные показатели [128, 140].

Однако при всей своей привлекательности СГЭЭ на основе СГПМ имеют ряд недостатков, основными из которых являются:

- низкая механическая прочность некоторых магнитотвердых оксидных магнитов;
- старение ферритовых и термостабильных (на основе сплава *Al-Ni-Co-Fe*) магнитов;
- возможность размагничивания при высоких температурах;
- высокая стоимость постоянных магнитов;
- сложность организации защит от короткого замыкания, прежде всего, ввиду большого запаса электромагнитной энергии во вращающемся роторе.

В аварийных ситуациях “неисчезаемый” запас электромагнитной энергии ротора потенциально опасен. Перечисленные недостатки, в некоторой мере, снижают значимость имеющихся преимуществ и возможность использования СГПМ в автономных объектах.

Альтернативой СГЭЭ с СГПМ является применение систем генерации на основе электрических машин с самовозбуждением – асинхронных и синхронно-гистерезисных генераторов (СГГ). Если системы генерации с АГ известны и описаны в литературе, то системы с СГГ рассматривались крайне мало. Преимуществом АГ является то, что работа в автономных установках в несимметричных и динамических режимах, при значительном изменении частоты вращения и/или нагрузки, гораздо устойчивее, в том числе при параллельной

работе на сеть, из-за демпфирующих свойств короткозамкнутого ротора. Возможна относительно простая параллельная работа АГ в отличие от синхронных генераторов, требующих при параллельном включении строгой синхронизации частоты вращения. Частоты вращения параллельно работающих АГ могут различаться, при этом будет создан ток такой частоты, который будет соответствовать резонансу полной эквивалентной схемы, включающей цепи нагрузки, возбуждения и обмотки электрической машины, при этом будет различаться степень нагруженности асинхронных генераторов [67, 133, 137].

Стоит отметить, что не существует специально утвержденного ГОСТ по качеству электроэнергии автономных источников электропитания. Поэтому при проектировании подобных систем энергоснабжения стоит ориентироваться на ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [45]. В указанном стандарте, применительно к автономным системам, установлены нормы отклонения частоты, согласно которым недопустимо изменение частоты за все время работы более чем на ± 5 Гц и на ± 1 Гц в течение 95 % рабочего времени. Что касается систем энергоснабжения летательных аппаратов, то следует руководствоваться специальными стандартами, например, ГОСТ 54073-2010 – «Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии».

1.2 Обзор выполненных исследований асинхронных генераторов

Системы генерирования, построенные на асинхронных машинах, могут быть перспективны. Началом их использования принято считать 1889 г., когда выдающийся ученый М.О. Доливо-Добровольский построил первую трехфазную асинхронную машину и трехфазный трансформатор, заложил базовые основы проектирования электрических машин данного типа: выбор конструкции пазов, применяемые материалы, технологию изготовления и т.д. [56].

АГ получили распространение в качестве автономного источника электроэнергии. Известно использование автономного асинхронного генератора (ААГ) в микроГЭС. В автономном режиме при работе на нагрузку с переменным коэффициентом мощности $\cos\varphi = var$ преимущества имеют микроГЭС, построенные на базе асинхронной машины с двухзвенным преобразователем частоты, активным выпрямителем и инвертором напряжения. За рубежом выпускаются различные модификации генераторов и специально разработанные асинхронные машины для работы в составе микроГЭС [85].

Асинхронные генераторы с емкостным возбуждением используют в качестве аварийных источников питания, высокоскоростных генераторов для кинетических аккумуляторов [67].

АГ применяют для питания систем телеуправления и автоматики, в системах защиты детандеров для конденсаторного торможения [49, 58, 68]. Производимая турбодетандером механическая работа преобразуется в электрическую энергию. В момент пуска АМ используется в двигательном режиме для разгона детандеров на заданную частоту вращения, в дальнейшем в генераторном режиме, используя батарею конденсаторов для самовозбуждения. Подобные системы могут использоваться также в стартер-генераторных турбинных установках автономных объектов, например, летательных аппаратов, для предварительного разгона ротора и последующего перехода в генераторный режим работы.

В 1986 г. немецкими инженерами Э. Юлке и Ю. Дасселем был предложен сварочный асинхронный генератор, причем нагрузка в виде сварочной дуги подключалась к обмотке статора через выпрямитель. Особенности такого генератора являются наличие верхней и нижней критической частоты самовозбуждения, высокая прочность и устойчивость к центробежным нагрузкам [51, 116].

Нашли также применение АГ с массивным ротором из алюминиевого сплава с медной оболочкой для работы в импульсном режиме, для питания мощных лазеров. Накопителем энергии в них обычно является батарея

конденсаторов, что делает возможным использовать асинхронную машину в качестве электромеханического преобразователя энергии. Использование емкостного накопителя для АГ играет двойную роль, в отличие от систем энергоснабжения, где присутствие конденсаторов лишь увеличивало вес и стоимость установки. Недостатком импульсного АГ является тот факт, что при большой скважности рабочих импульсов тока имеются значительные потери мощности на холостом ходу вследствие электрической несимметрии обмоток статора. Эти потери мощности, обусловленные обратно вращающимся полем, увеличиваются с повышением насыщения магнитной цепи [50, 118, 120].

Кроме этого АГ используют в качестве погружного генератора глубинных приборов, питания двигателей электровозов, источников электроэнергии в сельском и рыбном хозяйстве и т.д. Применительно к автономным энергетическим установкам наиболее оптимальным представляется использование асинхронных электрических машин с контролером реактивно-емкостной энергии и выпрямительным устройством при использовании зарядно-аккумуляторных элементов [50, 60, 81, 95, 117, 121]. Координирующий регулятор, в зависимости от параметров нагрузки и частоты вращения вала, формирует задающее воздействие, позволяющее обеспечить стабильную амплитуду и частоту генерируемого напряжения.

Работы по исследованию систем генерирования на основе асинхронных машин с полупроводниковым возбуждением выполняются как в России, так и за рубежом. Например, в Германии компаниями *Siemens AG*, *AEG*, *AKW*, в Норвегии компаниями – *ABB KraftAs* и *Corporate Research*, в Швейцарии фирмой – *Liaisons Electroniques Mecaniques* [3, 5-7]. Бурное усовершенствование, выросший интерес к полупроводниковой технике способствовали развитию систем генерирования, в которых в качестве электромеханического преобразователя используют асинхронную машину.

Исследованию асинхронных генераторов посвящено большое количество работ. Значительное внимание в исследовании АГ уделяется раскрытию природы физического процесса самовозбуждения, анализу влияния изменений параметров

машины на зоны самовозбуждения, определению рабочих диапазонов частоты вращения и емкости батареи конденсаторов, решаются различные специфичные задачи, выдвигаемые практической необходимостью.

Несмотря на широкий перечень работ, некоторый комплекс базовых вопросов аналитической теории процессов работы АГ в переходном и статическом режиме продолжительное время так и не был рассмотрен. Невозможность абсолютного учета влияния магнитного насыщения, изменение частоты генерируемого напряжения, параметров блока возбуждения, отсутствие общей аналитической теории, не позволяющей анализировать работу энергетических систем на базе АГ как в стационарных, так и в переходных режимах, препятствовало развитию и расширению сфер применения АГ.

1.2.1 Трактовки явления самовозбуждения асинхронных генераторов

Наибольшее количество работ посвящено явлению асинхронного самовозбуждения [12, 13, 26, 37, 49-55, 64-67, 97, 99, 119]. Методологические подходы решения вопросов анализа самовозбуждения, раскрытию физической природы претерпели принципиальные изменения по мере усовершенствования теории АГ. Прослеживается несколько основных трактовок: энергетическая трактовка, классическая – основанная на явлении остаточной намагниченности, классического резонанса, параметрического резонанса.

Энергетическая трактовка дает анализ процесса самовозбуждения как условия, что величина вносимой в контур энергии должна превосходить теряемую энергию [27, 97]. Это следует понимать лишь как необходимое требование для каждого физического процесса возбуждения, невыполнение которого однозначно приводит к затуханию колебаний в любой системе.

Классическая трактовка самовозбуждения АГ основывается на явлении остаточного намагничивания, сопоставляя процесс возбуждения АГ с процессом в генераторе постоянного тока параллельного возбуждения, где остаточный магнитный поток ротора является первоначальным импульсом для начала явления самовозбуждения. Вращение ротора электрической машины внешним крутящим

моментом наводит в статоре электродвижущую силу, зависящую от величины остаточного магнитного потока ротора $E = d\Phi/dt$. Подключение батареи конденсаторов к зажимам статора приведет к увеличению результирующего магнитного потока, т.к. образуемый поток статора будет сонаправлен с остаточным потоком. Это в свою очередь приведет к лавинообразному увеличению напряжения до точки пересечения характеристики холостого хода АГ с вольтамперной характеристикой (ВАХ) конденсаторной батареи (рисунок 1.1). Однако при такой трактовке остаточный поток должен создавать синхронное вращающееся магнитное поле статора, что противоречит практике и теории энергетического преобразования энергии в асинхронной машине, по которой частота вращения магнитного поля статора должна быть отлична от частоты вращения ротора, т.е. должна присутствовать величина скольжения s .

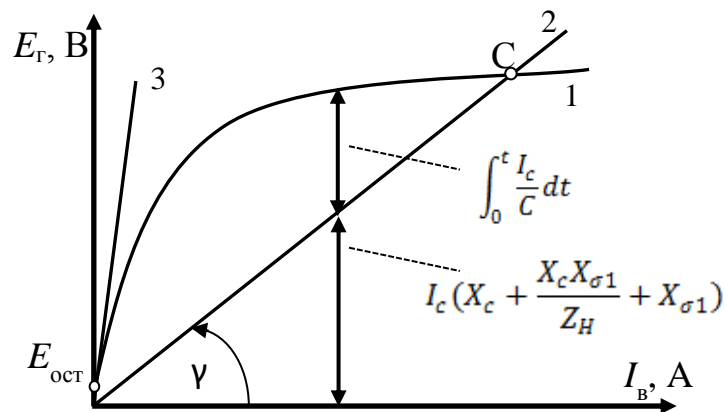


Рисунок 1.1. Характеристики асинхронного генератора: 1 – характеристика холостого хода, 2 – вольтамперная характеристика конденсаторной батареи, 3 – критическое значение сопротивления

Как подтверждение вышеуказанного противоречия, А.В. Нетушил описывает самовозбуждение АГ без остаточной намагниченности $\Phi_{ост} = 0$. В отмеченном эксперименте АГ возбуждался при гладком немагнитном роторе и не возбуждался при значительном остаточном намагничивании. Более того, асинхронные генераторы со специально намагниченным и размагниченным ротором давали одинаковые показатели самовозбуждения по частоте полученных колебаний [97, 98]. Таким образом, можно утверждать, что остаточная

намагниченность не является обязательным фактором самовозбуждения АГ. Но остаточный магнитный поток в значительной мере способствует процессу генерирования электроэнергии и позволяет существенно уменьшить время самовозбуждения и требуемую для возбуждения вносимую энергию в колебательный контур. Отказ от классической трактовки “остаточного магнитного потока” как обязательного фактора для явления самовозбуждения приводит к необходимости детального описания происходящих процессов, способствующих явлению самовозбуждения.

Следующая трактовка пыталась связать самовозбуждение с процессом обыкновенного резонанса в индуктивно-емкостном контуре линейной цепи. Понятие резонанса будем толковать как избирательный отклик колебательного контура на периодическое воздействие с частотой, близкой к частоте собственных колебаний. Резонанс характеризуется резким возрастанием амплитуды вынужденных колебаний тока и напряжения [109]. Данное явление впервые было описано итальянским учёным Г. Галилеем, а применительно к электромагнитным системам для колебательного контура, английским учёным Дж. Максвеллом.

Для возникновения такого вида резонанса требуется наличие независимой возбуждающей ЭДС на зажимах статора, работающей на частоте собственных колебаний резонансного контура:

$$f_{\text{соб}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}, \quad (1)$$

где L – индуктивность АГ;

C – фазная емкость конденсатора.

Однако, в автономных системах генерирования электроэнергии даже при отсутствии вынуждающей электродвижущей силы, наблюдался процесс самовозбуждения АГ, что определенно показывало ошибочность данного суждения [81].

Наиболее вероятна трактовка самовозбуждения, как явления параметрического резонанса – колебательного процесса, вызываемого модуляцией какого-либо из параметров контура, принимающего нарастающий

характер. Данное явление возможно лишь при незначительном превышении частоты вращения ротора над частотой магнитного поля. Параметрический резонанс проявляется наиболее сильно при скачкообразном изменении реактивных элементов, при этом возможна как вариация отдельно индуктивности или емкости, так и их совместное изменение. Одновременная вариация реактивных параметров не всегда является более эффективной относительно случаев их раздельного изменения.

Электрическая машина является системой с периодически изменяемыми параметрами. Параметрами, способствующими возникновению параметрического резонанса, являются индуктивные сопротивления ЭМ, зависящие от взаимоположения пазов статора и короткозамкнутых стержней ротора. Главная особенность данного вида резонанса проявляется в отсутствии постоянного источника возбуждающей ЭДС. Требуется лишь наличие небольшого количества первичной энергии, которая может быть представлена в виде остаточного магнитного потока машины, напряжения на конденсаторе и т.д., и периодичное варьирование величины реактивного элемента. При этом глубина модуляции реактивного параметра влияет на эффективность вложенной энергии.

Это явление кратного резонанса было впервые экспериментально обнаружено Г.С. Гореликом и Г.М. Гинцем при исследованиях суперрегенеративного приемника. Немногом позже, в 1934 – 1940 г. в достаточной мере явление параметрического резонанса было исследовано академиками Л.И. Мендельштамом и Н.Д. Папалекси. Данное явление изучено для явнополусных синхронных генераторов, в которых наблюдаются значительные пульсации магнитной индукции. В настоящее время оно находит применение в вычислительной технике для построения элементов цифровых вычислительных машин и в автоматике в качестве нуль-органов, использующих расстройку колебательного контура усилителей малых сигналов при восприятии слабых магнитных полей [90-93, 104].

Математическое описание параметрического резонанса в АГ, работающего на нагрузку, сопровождается характерными трудностями, связанными с

громоздкостью полученных выражений и сложностью их интерпретации. Дело в том, что данное явление неразрывно связано с понятием неустойчивости по Ляпунову. В работах [19-23, 97] были попытки обобщено описать данный процесс, но лишь при работе на холостом ходу, в связи с ограниченными возможностями на тот момент вычислительной техники, т.к. анализ параметрического резонанса приводит к дифференциальным уравнениям с переменными коэффициентами. Решение систем дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами затруднительно и может быть осуществлено лишь для немногих частных случаев, где возможно использование преобразования Блонделя, преобразуя систему линейных уравнений в систему дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами [28].

Устойчивость процесса генерирования электроэнергии, при данной трактовке, обусловлена энергией, накопленной реактивными элементами цепи, причем величина вносимой в контур энергии должна превосходить расходуемое значение, а поступление энергии должно происходить одновременно с ее расходом. Таким образом, формируется условие баланса амплитуд. Энергию, запасенную в контуре, можно увеличивать за счет скачкообразного изменения индуктивности или емкости. Мгновенные значения запасенной энергии в реактивных элементах конденсатор и катушка индуктивности определяются соответствующими выражениями:

$$\begin{aligned} W_C &= \frac{q^2}{2C} = \frac{C \cdot U^2}{2}, \\ W_L &= \frac{\Phi}{2L} = \frac{L \cdot I^2}{2}, \end{aligned} \quad (2)$$

где C – емкость контура;

L – индуктивность контура;

I – величина силы тока;

U – напряжение;

Φ – магнитный поток;

q – заряд между пластинами.

Баланс фаз определяется кратностью изменения параметра системы относительно частоты свободных колебаний. Однако возможны случаи параметрического резонанса при асинхронном изменении реактивных параметров. Н.Д. Бирюк в работе [24] сформулировал утверждение, что если при асинхронном изменении реактивностей контур (рисунок 1.2) устойчив, то при синхронном изменении данный контур будет более устойчив. Оценка устойчивости колебаний может быть определена любым из возможных критериев устойчивости, так и прочими методами, например, приемами энергетического подхода.

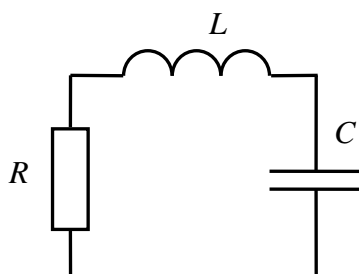


Рисунок 1.2. Последовательный резонансный контур

Увеличение энергии происходит при максимальном запасе заряда на конденсаторе или максимальном потоке индуктивности. Как известно, при работе АГ не происходит вариации значения емкости конденсатора. Как отмечалось выше, стоит полагать, что возбуждение связано с периодическим изменением индуктивности электрической машины. Это соотносится с характерными для ЭМ периодически изменяемыми параметрами за счет выраженных пазов и зубцов. Из изложенного проясняется механизм вложения энергии в контур путем изменения реактивных элементов. Для нарастания колебаний требуется, чтобы энергия, вкладываемая в контур, превосходила энергию, расходуемую на потери. Это условие будет выполняться при следующих неравенствах:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta C}{C} &> \frac{\pi}{Q}, \\ \frac{\Delta L}{L} &> \frac{\pi}{Q}, \end{aligned} \quad (3)$$

где Q – добротность контура;

ΔL , ΔC – изменение реактивного параметра индуктивности и емкости.

Из представленного выражения следует, что необходимая глубина модуляции прямо пропорциональна величине реактивного параметра и обратно пропорциональна добротности колебательного контура [22-24]. При соблюдении указанных условий амплитуда возникающего тока и напряжения имеет возрастающий характер. К таким системам применим принцип суперпозиции, что характеризует отсутствие зависимости между амплитудой воздействия и амплитудой вынужденных колебаний [100]. Стационарный режим в параметрических машинах определяется насыщением магнитной системы, это обстоятельство вносит “нелинейность” в поведение системы. В работах академика Л.И. Мандельштама [90-93] гармонично представлено пересечение математического и физического описания данного явления, анализируется параметрический резонанс в контуре с изменяемой во времени емкостью.

1.2.2 Математическое описание процесса самовозбуждения АГ

Кроме изучения физических процессов самовозбуждения АГ, многие ученые занимались вопросами моделирования работы АГ и повышения точности математического описания электромеханических процессов асинхронной машины. Наибольшее число работ, посвященных моделированию асинхронного генератора, приходится на 1960-1980 года. Основной вклад в эту область привнесли Т.П. Губенко, А.В. Новиков, А.В. Нетушил, С.Г. Кюрегян, А.-З.Р. Джендубаев, данный вопрос хорошо раскрыт в работах [53, 98, 99, 111-112, 118]. Стоит отметить, что в большинстве публикаций решение вопросов моделирования заключалось в изучении имеющихся, разработке новых схем замещения и описании процессов преобразования энергии, часть работ отведена расчету статических характеристик по графическим и графоаналитическим методам.

Для исследования АГ через анализ предложенных схем замещения необходимо знать следующие параметры (рисунок 1.3): активные сопротивления (R_1 , R_2 , R_m) и индуктивные сопротивления (X_1 , X_2 , X_m) рассеяния фаз статора,

ротора и ветви намагничивания. Данные параметры необходимы для моделирования переходных процессов, настройки и регулирования системы возбуждения. Вместе с тем, они необходимы для расчета пускового режима АГ, анализа режимов работы, определения характеристик асинхронного генератора. В некоторых работах используются усложненные схемы замещения. Параметры для этих схем могут быть установлены, если известны геометрические размеры активной зоны и обмоточные данные, которые часто не доступны разработчикам электромеханических систем. В связи с необходимостью располагать подобной информацией, имеется ряд работ по определению значений параметров схем замещения различными методами [86, 115, 127].

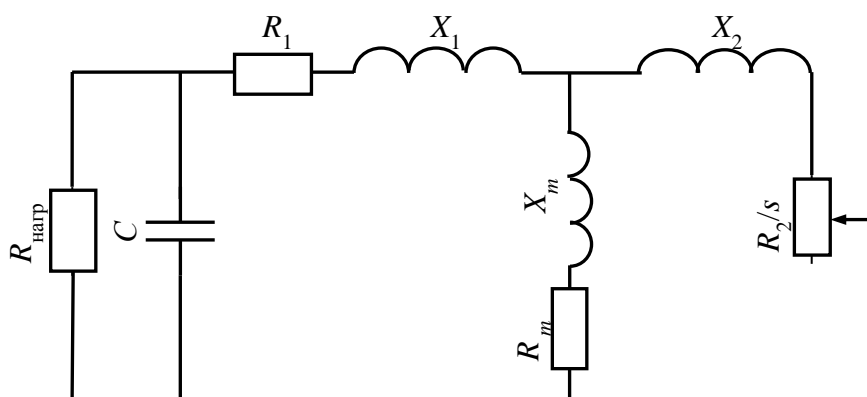


Рисунок 1.3. Т-образная схема замещения АГ с емкостным возбуждением, работающего на активную нагрузку

Подобные методы работы давали точные результаты анализа модели АГ, работающего на холостом ходу. Но описание модели при работе на статичную активно-индуктивную или динамическую нагрузку сильно усложнялось и не представлялось возможным определить условия самовозбуждения для поддержания процесса генерирования. В последние годы был опубликован ряд работ, где вновь поднимался вопрос математического моделирования работы асинхронного генератора [60, 108]. В данных работах анализ самовозбуждения выполнен из нахождения частотных характеристик асинхронного генератора с батареей конденсаторов. Прогресс информационно-вычислительной техники

позволяет в настоящее время при моделировании процессов генерирования учитывать большее число влияющих факторов, тем самым получать наиболее достоверные результаты.

Экспериментальные методы проведения испытаний асинхронной машины для определения параметров схем замещения устанавливаются государственными стандартами: ГОСТ 11828-86, ГОСТ 7217-87.

Стандарт ГОСТ 11828-86 распространяется на все вращающиеся электрические машины постоянного и переменного тока без ограничения мощности, напряжения, частоты и устанавливает методы испытаний, общие для электрических машин всех видов. Специальные требования по испытаниям электрических машин отдельных видов должны устанавливаться техническими условиями на конкретные виды электрических машин. Данный стандарт не распространяет свое действие на электрические машины, применяемые в бортовых системах подвижных средств наземного, водного и воздушного транспорта, и на электрические машины, на которые установлены утвержденные в установленном порядке специальные требования. В данном стандарте отмечены способы измерения сопротивления обмоток на постоянном токе, определения вращающих моментов и пусковых токов, участвующих в расчёте параметров схем замещения [44]. Государственный стандарт 7217-87 распространяется на асинхронные трехфазные двигатели без ограничения мощности, напряжения и частоты, а также однофазные асинхронные двигатели и двигатели специального исполнения в той мере, в которой методы испытаний, предусмотренные настоящим стандартом, применимы для испытаний этих двигателей. В стандарте описано экспериментальное определение параметров схемы замещения из опыта холостого хода и короткого замыкания, определение вращающих моментов и частотных характеристик, входящих в состав расчёта значений параметров схем замещения [46].

Другой математический подход заключается в описании трехфазного асинхронного генератора с конденсаторным самовозбуждением системой дифференциальных уравнений. Классический метод описания с помощью систем

дифференциальных уравнений является наиболее обобщенным. Поскольку математические модели абстрактны, они широко используются в системных исследованиях. Математическая модель объекта является его идеализацией, поэтому при составлении уравнений и рассмотрении переходных процессов используют общепринятые ограничения и допущения, связанные с “идеализированным” объектом. В связи с упрощением объекта возникает задача настройки математической модели на реальный объект, суть которой состоит в определении таких значений параметров, которые дадут результат максимально приближенный к экспериментальным данным.

Первые работы в данном направлении под авторством Г. Крона, Р. Парка, А. А. Горева появились в 30-х годах. Математическое представление требовалось для описания, как переходных процессов, так и для установившегося состояния системы генерирования. Изучение переходных процессов было выполнено такими деятелями науки, как Е. Я. Казовский, А. И. Важнов, Р. А. Лютер, С. А. Решетов [35-36, 61-63, 85, 110-111, 113-114]. В указанных работах описание переходных процессов излагается из уравнений обобщенной электрической машины, полученных в фундаментальной работе Д. Уайта, Г. Вудсона в 1959 г. [126]. На основании этих уравнений возможен анализ любых электромеханических преобразователей. Особенность таких моделей заключается в приведении обмотки ротора любого вида к обмотке статора, упрощая и не учитывая геометрию узлов электромеханических преобразователей.

Математическое представление процессов электромеханического преобразования энергии в электрических машинах базируется на составлении и решении дифференциальных уравнений на основе обобщённых законов Ома и Кирхгофа. Задача осложнена нелинейными процессами, учитывающими эффект насыщения, вытеснения токов и т.д. Высокая степень полученных уравнений определяется числом учитываемых взаимосвязанных электромеханических контуров и нелинейными процессами. Работа асинхронного генератора на нагрузку может характеризоваться несимметрией цепей статора и ротора, поэтому целесообразно воспользоваться системой уравнений в осях α и β . Переход от

исходной трехфазной машины к идеализированной хорошо описан в общей теории электромеханического преобразования энергии. Отметим лишь, что в результате преобразований система преобразуется в пару обмоток на роторе и пару обмоток на статоре, расположенных по ортогональным осям. Наиболее распространенным допущением при таком математическом описании является идеализация электромеханического преобразователя. В идеализированной асинхронной машине в воздушном зазоре располагается круговое магнитное поле, а высшие составляющие гармонического сигнала отсутствуют. Считают, что машина ненасыщенна и фазные обмотки полностью симметричны, пренебрегают потерями в стали и т.д.

Для анализа системы генерирования в относительных единицах необходимо систему уравнений напряжений асинхронной машины дополнить уравнениями равновесия напряжений, токов внешних контуров цепи нагрузки и емкостной возбуждающей цепи генератора. Приведем уравнения токов и напряжений схемы трехфазного асинхронного генератора при емкостном возбуждении и несимметрией ротора в α , β осях:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_H = u_A - u_B, \\ u_H = i_H R_H + \frac{L_H di_H}{dt}, \\ u_\alpha = \frac{2}{3} \left(u_A - \frac{u_B + u_C}{2} \right), \\ u_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}} (u_B - u_C), \\ i_A + \frac{C_A du_A}{dt} - i_H = 0, \\ i_B - \frac{C_B du_B}{dt} - i_H = 0, \\ i_C = \frac{C_C du_C}{dt}, \\ i_A + i_B + i_C = 0, \\ i_H = \frac{u_H}{R_H}, \\ i_A = i_\alpha, \\ i_B = -\left(\frac{1}{2}\right) i_\alpha + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right) i_\beta, \\ i_C = -\left(\frac{1}{2}\right) i_\alpha - \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right) i_\beta. \end{array} \right. \quad (4)$$

Наибольшее распространение для решения систем дифференциальных уравнений получил метод Эйлера и его модифицированные варианты. Применительно к электротехническим системам наиболее часто используют методы Рунге-Кутты, в математических пакетах реализуют методы второго, четвертого и более высоких порядков.

Полная система дифференциальных уравнений, которая описывает переходный процесс трехфазного асинхронного генератора, работающего на нагрузку, включает дифференциальные уравнения потокосцеплений, выражения для токов нагрузки, потокосцепления в воздушном зазоре, мгновенных значений фазных напряжений:

$$\left\{ \begin{array}{l} p\Psi_{\alpha} = -u_{\alpha} - R_{\alpha}i_{\alpha}, \\ p\Psi_{\beta} = -u_{\beta} - R_{\beta}i_{\beta}, \\ p\Psi_{\alpha R} = w\Psi_{\beta R} - R_R i_{\alpha R}, \\ p\Psi_{\beta R} = -w\Psi_{\alpha R} - R_R i_{\beta R}, \\ i_{\alpha} = \frac{\Psi_{\delta\alpha}}{x_m} - i_{\alpha R}, \\ i_{\beta} = \frac{\Psi_{\delta\beta}}{x_m} - i_{\beta R}, \\ i_{\alpha R} = \frac{1}{x_{\delta R}} (\Psi_{\alpha R} - \Psi_{\delta\alpha}), \\ i_{\beta R} = \frac{1}{x_{\delta R}} (\Psi_{\beta R} - \Psi_{\delta\beta}), \\ \Psi_{\delta\alpha} = \Psi_{\alpha} - x_{\delta s} i_{\alpha}, \\ \Psi_{\delta\beta} = \Psi_{\beta} - x_{\delta s} i_{\beta}, \\ pu_A = x_{CA} (i_A - i_H), \\ pu_B = x_{CB} (i_B + i_H), \\ pu_C = x_C i_C. \end{array} \right. \quad (5)$$

Таким образом, полная система уравнений электромеханических переходных процессов трехфазного асинхронного генератора описывается выражениями (4), (5). В этой модели не учитывается насыщение магнитной цепи. Однако примененная форма выражений для токов позволяет осуществить как одновременный, так и отдельный учет насыщения по пути основного магнитного потока и пути потоков рассеяния статора и ротора. Для учета насыщения магнитного потока требуется в выражения токов i_{α}, i_{β} использовать зависящие от насыщения значение сопротивления взаимной индукции x_m , которое может быть

определено по кривой намагничивания машины в зависимости от результирующего потокосцепления в воздушном зазоре машины $x_m = f(\Psi_\delta)$ [77, 79].

Как было отмечено, данные модели не принимают в расчет геометрию ротора, что в некотором роде ограничивает определение электрических параметров подвижной части электрической машины. Имеются работы, например [122], в которых получены системы уравнений асинхронной машины с двухклеточным и фазным ротором, полностью учитывающие геометрию ротора. Принятые модели позволяют определить реальные значения токов в стержнях и решают задачу регулирования частоты вращения для электрической машины с фазным ротором и задачу предельной нагрузки асинхронного двигателя.

1.2.3 Способы возбуждения асинхронных генераторов

При работе АМ в генераторном режиме потребляется намагничивающий ток и требуется источник реактивной мощности, образующий поток возбуждения. При отсутствии первоначального магнитного поля в обмотке статора поток возбуждения создают с помощью конденсаторов, параллельно подключенных к фазам обмотки статора, или полупроводниковых преобразователей энергии, которые можно подключать как к статору, так и к ротору. Конденсаторное самовозбуждение асинхронной машины осуществляется подключением батареи конденсаторов к обмотке статора (рисунок 1.4).

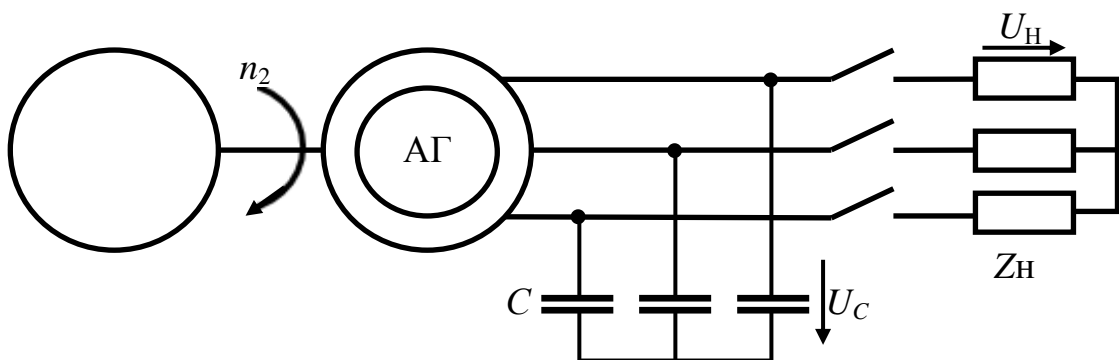


Рисунок 1.4. Принципиальная схема АГ с конденсаторным возбуждением

Изучение конденсаторного самовозбуждения во времени является сложной задачей из-за необходимости учета насыщения стали при решении дифференциальных уравнений. Необходимость конденсаторной батареи долгое время являлось основной причиной, сдерживающей применение асинхронных генераторов. Данный элемент не только увеличивает массогабаритные и стоимостные показатели, но и не дает возможности регулирования амплитуды и частоты генерируемого напряжения. Кроме этого, емкость фазного конденсатора для начала процесса самовозбуждения должна находиться в некотором диапазоне, имеющем как нижнюю, так и верхнюю границу. Выход из данной зоны приводит к срыву генерации электроэнергии, что приводит к необходимости тщательного подбора батареи конденсаторов [27, 52, 58, 119].

Использование такого типа возбуждения выдвигает несколько условий и особенностей. Во-первых, для возникновения процесса самовозбуждения требуется использование конденсатора с емкостью, превышающей некоторую критическую величину. Общая емкость батареи конденсаторов по схеме треугольника, необходимая для возбуждения, описывается соотношением: $C > 1/\omega \cdot x_1$, где x_1 и ω – соответственно индуктивное сопротивление статора асинхронной машины и частота вращения.

При работе на активно-емкостную нагрузку необходимая для процесса самовозбуждения емкость батареи возбуждения уменьшается пропорционально величине реактивной проводимости нагрузки. По сравнению с работой на холостом ходу (ХХ) активно-индуктивный характер нагрузки требует повышенного значения емкости фазных конденсаторов, необходимых для самовозбуждения АГ. Переменный характер нагрузки сказывается на параметрах выходного напряжения.

Долгое время требуемая емкость для работы на ХХ и при нагрузке определялась эмпирическим путем, что приводило к необходимости использования справочных данных. Пример справочного материала приведен в таблице 1.3.

Позже была определена зависимость фазной емкости батареи конденсаторов, необходимой для самовозбуждения АГ до заданного напряжения при номинальном числе оборотов ротора, от параметров выходного напряжения на холостом ходу. Значение фазной емкости (мкФ), необходимой для возбуждения АГ в режиме холостого хода, определяется выражением:

$$C_{\phi} = \frac{I_{xx} \cdot \sin\varphi \cdot 10^6}{\omega \cdot U_{xx}}, \quad (6)$$

где I_{xx} , U_{xx} – ток и напряжение холостого хода генератора;

ω – частота вращения ротора.

Таблица 1.3. Емкость фазных конденсаторов асинхронных генераторов с числом пар полюсов $p = 2$

Мощность генератора, кВт	Требуемая для возбуждения емкость конденсатора, мкФ		
	XX	Номинальная нагрузка	
		$\cos\varphi = 1$	$\cos\varphi = 0,8$
2	28	36	60
5	60	75	138
7	74	98	182
10	92	130	245
15	120	172	342

Другая зависимость, позволяющая рассчитать величину фазной емкости в зависимости от требуемого напряжения и частоты вращения, определяется формулой:

$$C = \frac{1-s}{\Omega} \cdot \frac{I}{U}, \quad (7)$$

где Ω – угловая частота вращения ротора;

I, U – номинальные параметры выходного тока и напряжения;

s – скольжение.

Более подробная методика определения величины емкости изложена в работах А.И. Адаменко, основана на емкостной проводимости фазы с учетом изменения индуктивного сопротивления контура намагничивания и выходного напряжения [53, 81].

Во-вторых, наличие остаточного потока в машине или начального напряжения на конденсаторах сокращает время возбуждения генератора. Зачастую при конденсаторном возбуждении АГ наблюдается заметное повышение напряжения на зажимах, из-за чего возникает необходимость оценки изменения величины сопротивления магнитопровода. Эту оценку возможно выполнить, пользуясь параметрами ветви намагничивания электрической эквивалентной Т-образной схемы.

В-третьих, нарастание напряжения связано с колебательным процессом обмена энергии между электрической машиной и электрическим полем батареи конденсаторов. Часть энергии магнитного потока участвует в заряде конденсаторной батареи. Очевидно, амплитуда результирующего вектора потока в зазоре пропорциональна максимуму запасаемой энергии. При этом увеличение тока и напряжения ограничивается нелинейностью – насыщением стали. Стационарный режим наступает тогда, когда вся энергия, соответствующая механическому моменту на валу ротора, рассеивается в электромагнитных цепях машины. Исходя из приведенных выше условий и характерных свойств, особый интерес представляет изучение устойчивости работы систем генерирования.

В-четвертых, схема соединения фаз электрической машины и батареи конденсаторов влияет на выходное напряжение системы генерирования. Например, при изменении схемы соединения фаз статора с треугольника на звезду значение фазной емкости изменяется в $\sqrt{3}$ раз, что вносит коррективы в угол наклона вольтамперной характеристики конденсатора к оси тока, изменяя положение точки пересечения ВАХ с кривой намагничивания и величину наводимой ЭДС. При таком переключении напряжение увеличится не в величину

$\sqrt{3}$, как это происходит в синхронных генераторах, а пропорционально значению $K\sqrt{3}$, определяемому параметрами схемы замещения и угловой частотой вращения ротора электрической машины.

Получение стабильной частоты напряжения при переменной частоте вращения генератора и изменении нагрузки является одной из важных задач. Часто данная задача усложняется необходимостью обеспечения параллельной работы генераторов или параллельной работой с сетью. Изменение нагрузки при постоянной частоте вращения приводит к отклонению частоты и амплитуды синусоидального напряжения. Компенсировать отклонение частоты возможно регулированием вращения ротора или величиной скольжения. Эти способы реализуются использованием автобалластной нагрузки, приводящей к изменению величины скольжения. Получение стабильной частоты при изменяющемся частоте вращения ротора возможно с помощью устройства поддержания постоянной частоты вращения вала электрической машины – приводом постоянной скорости или путем последующего преобразования энергии переменного тока в постоянную и обратно. Предложенные варианты значительно увеличивают стоимость, уменьшают надежность и усложняют систему генерирования электроэнергии.

Стабилизация амплитуды напряжения АГ с батареей конденсаторов является не менее сложной задачей, требующей изменения возбуждающей реактивной мощности путем вариации емкости конденсаторов. Довольно простые и эффективные способы стабилизации напряжения и частоты АГ были предложены коллективами: В.И. Березиным, Н.М. Перельмутер, Т.И. Ардашниковым и В.А. Симатовым, М.П. Галкиным [65, 105]. В предложенной схеме (рисунок 1.5) вместе с основной батареей конденсаторов используют дополнительные конденсаторы, соединенные параллельно или последовательно к нагрузке, что приводит к поступлению дополнительной реактивной мощности. Емкость основной батареи конденсаторов рассчитывается из требуемой энергии на холостом ходу, дополнительная емкость позволяет самовозбуждение АГ при нагрузке, близкой к номинальной величине.

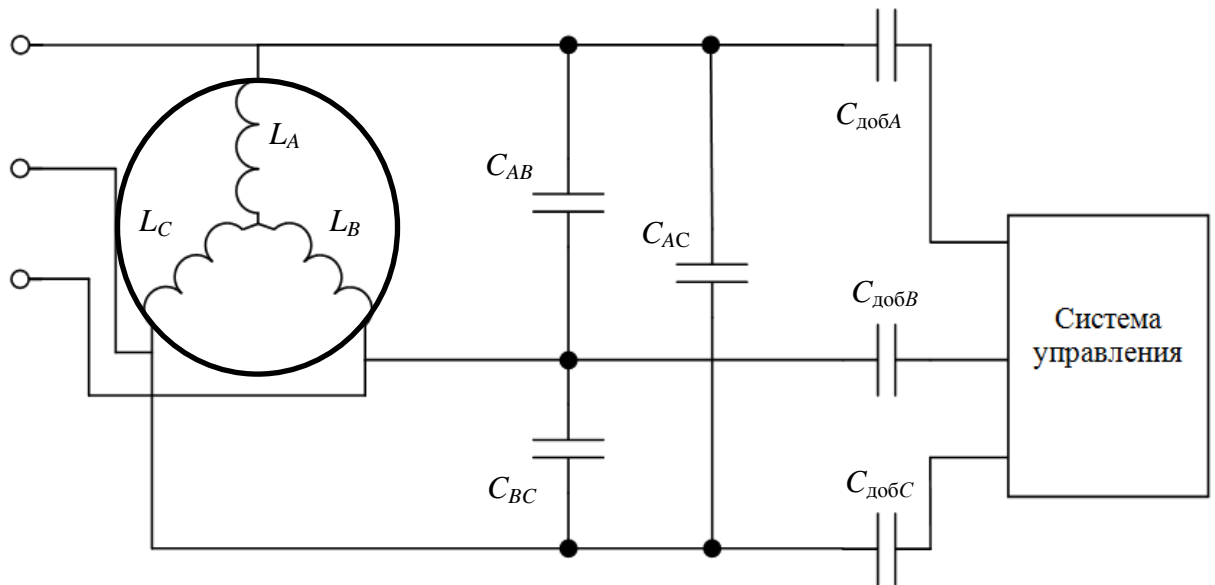


Рисунок 1.5. Схема стабилизации напряжения и частоты АГ

Схема обеспечивает устойчивое самовозбуждение во всем номинальном диапазоне нагрузки и высокую степень стабилизации генерируемого напряжения по амплитуде и частоте.

Кроме емкостных схем стабилизации, существуют устройства, регулирующие значение реактивного тока за счет сочетания конденсаторов и дросселей насыщения, компенсирующих реактивную мощность батареи конденсаторов АГ. В таком случае, выбор основной батареи конденсаторов производится из необходимой энергии при максимально возможной нагрузке АГ. Недостатком такой схемы является наличие нелинейных элементов, усложняющих настройку, и большой вес схемы стабилизации из-за компенсаторов избыточной реактивной энергии – дросселей.

Подводя итог, можем отметить, что конденсаторное возбуждение АГ создает характерные трудности регулирования электрических параметров выходного напряжения, решение которых нивелирует преимущества АГ. В качестве источника реактивной мощности может быть использован автономный инвертор напряжения, который также может выполнять функцию компенсатора индуктивно-реактивной мощности для работы асинхронного генератора (рисунок 1.6), а при некотором коэффициенте мощности служить в качестве выпрямителя [25, 43, 87]. Для регулирования требуемых параметров необходимы

обратные связи, которые будут влиять на систему управления, изменяя фазовый сдвиг и амплитуду тока возбуждения.

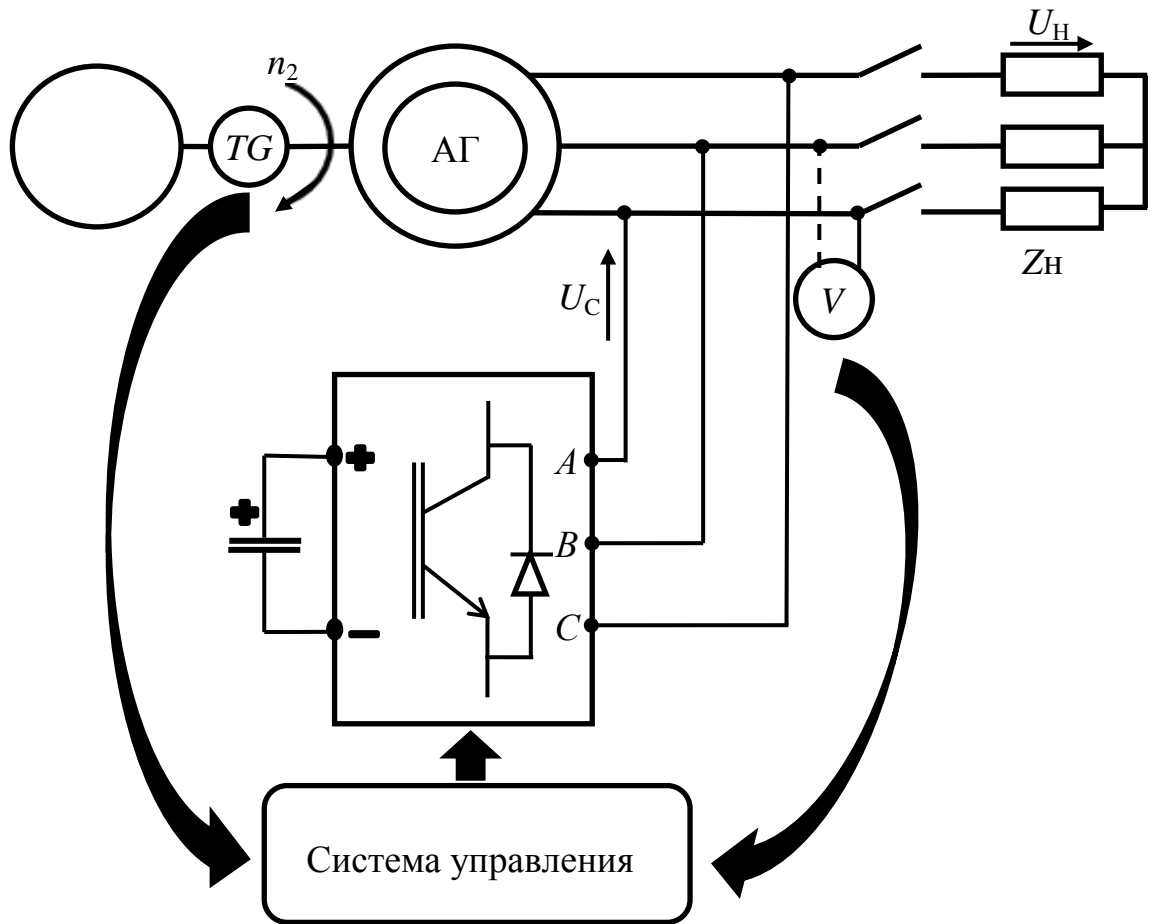


Рисунок 1.6. Принципиальная схема АГ с инверторным возбуждением и контролем частоты вращения ротора, выходного напряжения

Первый генератор, возбуждаемый от полупроводникового тиристорного преобразователя частоты, был выпущен фирмой *Siemens AG* в 1969 г., использовался для питания двигателей электровоза. А уже в 1972 г. фирмой *Westinghouse Electric Corporation* был разработан АГ, в котором роль источника реактивной энергии выполнял непосредственный преобразователь частоты, подключаемый к статору электрической машины [2-5]. Появление современных полупроводниковых элементов способствовало дальнейшему развитию АГ. Генераторы, возбуждаемые от полупроводникового преобразователя – инвертора напряжения, продолжительное время применялись исключительно для

асинхронных машин с короткозамкнутым ротором. Дальнейшая разработка усовершенствованных алгоритмов управления способствовала применению непосредственных преобразователей частоты в генераторах с фазным ротором, что обеспечивало получение постоянной частоты напряжения в широком диапазоне частоты вращения ротора. Данный тип генераторов с подключением возбуждения к фазному ротору не получил распространения по причине сложной организации системы управления. Кроме этого, использование асинхронной машины с фазным ротором вытесняет основное достоинство АГ – бесконтактность.

Использование полупроводниковой техники для АГ с короткозамкнутым ротором дало возможность регулирования параметров генерируемой электроэнергии при нестабильной частоте вращения и изменении нагрузки. Стабилизация частоты и напряжения при инверторном возбуждении возможна путем изменения фазового сдвига тока относительно напряжения, вариацией частоты и амплитуды возбуждающего тока. Кроме этого, использование частотных преобразователей, выпрямителя и инвертора, как комплексного *AC-DC-AC* преобразователя полностью решает задачу поддержания неизменных параметров амплитуды и частоты генерируемой электроэнергии, определяя амплитуду и частоту выходного напряжения инвертора только системой управления. Получение кривой выходного напряжения, формой максимально близкой к синусоидальной, не представляет больших трудностей при использовании режима широтно-импульсной модуляции. Возникающие в данном случае высшие гармоники могут быть устранены простейшими фильтрами, доводя коэффициент искажений до долей процента. Высокое качество и стабильность выходного сигнала обеспечивает возможность параллельной работы генераторов или параллельную работу на сеть.

Достоинством такой схемы возбуждения является возможность использования генератора с нестабильной частотой и напряжением. Недостатком является двойное преобразование электрической энергии, снижая КПД всей

системы. Однако в настоящее время имеются преобразователи, КПД которых приближается к значению 99,5 %.

Кроме представленных типов возбуждения, источником реактивной энергии может служить электрическая сеть с подключенными синхронно-реактивными машинами или синхронными компенсаторами. Подобные системы возбуждения не имеют отношения к автономным объектам, из-за чего не рассматриваются в данной работе.

1.3 Представление явления самовозбуждения АГ через понятия устойчивости

Под устойчивостью АГ будем понимать способность возвращаться в установившийся режим работы после некоторого воздействия, например, изменение нагрузки или частоты вращения ротора электрической машины. Устойчивость является важнейшей качественной характеристикой, характеризующей надежность работы системы. Наиболее распространённым видом исследования устойчивости является анализ характеристического уравнения. Понятие характеристического уравнения вводится через систему дифференциальных уравнений, в которой источник внешних сил обнулен.

Определение корней и анализ устойчивости производится алгебраическими и частотными методами. К алгебраическим методам относятся критерии Гурвица, Рауса. Критерий Гурвица заключается в определении знака определителей квадратичной матрицы, коэффициенты которой устанавливаются из характеристических уравнений. Критерий Рауса заключается в построении специальной таблицы, определяя значения элементов таблицы через коэффициенты характеристического уравнения и их соотношения.

К частотным методам определения устойчивости относятся критерии Найквиста и Михайлова. Для определения устойчивости требуется построить годограф на комплексной плоскости, как функцию частоты. Исходя из направления годографа, пройденных квадрантов, охватываемых точек, числа пересечений с мнимой осью делают вывод об устойчивости системы.

Кроме перечисленных критериев, в нелинейных системах для исследования устойчивости в малом, в большом, в целом используют функции Ляпунова в классической теореме об устойчивости по первому приближению, теореме Барбашина-Красовского, применяя матрицу Якоби [18-20].

Увеличение амплитуды колебаний до момента насыщения асинхронной машины следует понимать как динамическую неустойчивость. Устойчивость системы в классическом понимании гарантирует затухание колебательного процесса. Понятие неустойчивости вводится для дальнейшего оценивания самовозбуждения АГ. Неустойчивость системы, то есть нарастание колебаний, является необходимым условием для процесса генерирования электроэнергии. Таким образом, самовозбуждение будет возможно, если хотя бы один из корней характеристического уравнения будет содержать положительную действительную часть (рисунок 1.7, а). На границе устойчивости система будет находиться, если выполняется одно из условий: наличие нулевого корня, бесконечного корня, пары чисто мнимых корней (рисунок 1.7, б) [122].

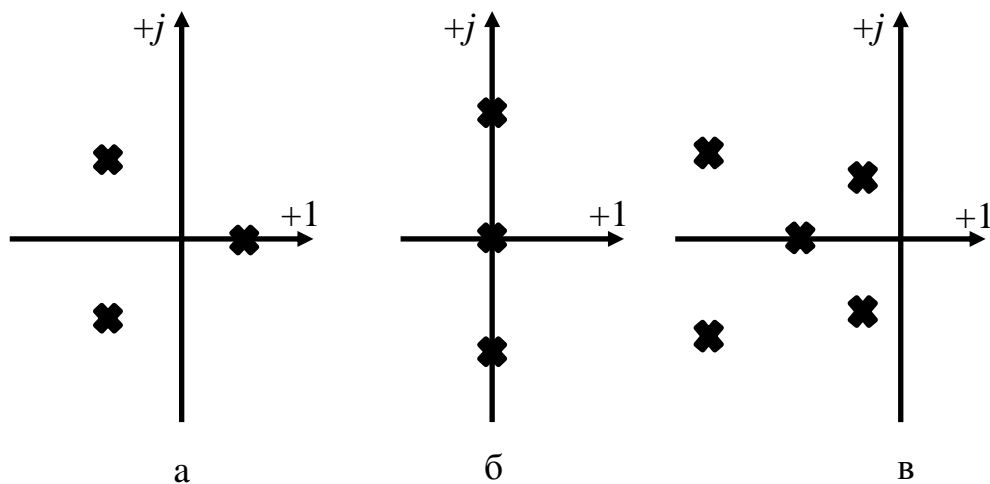


Рисунок 1.7. Комплексная плоскость с корнями характеристического уравнения: а – неустойчивая система, б – система на границе устойчивости, в – устойчивая система

Восстановление установившегося режима работы после бесконечно малого внешнего возмущения называют статической устойчивостью. Данное понятие

соответствует асимптотической устойчивости при исследовании дифференциальных уравнений. В статическом режиме для затухания переходного процесса и устойчивости линейной системы необходимо и достаточно, чтобы вещественные части корней были отрицательными, то есть располагались слева от мнимой оси плоскости корней (рисунок 1.7 в). Данный вид устойчивости можно рассматривать для исследования работы асинхронного генератора под нагрузкой и решения задачи о предельной нагрузке, при которой происходит срыв генерации. Для практики эксплуатации асинхронных генераторов характерна ситуация, в которой резко происходит изменение характеристик работы. Такая ситуация происходит не только при достижении некоторого предельного значения нагрузки, но и при различных аварийных ситуациях, например, коротком замыкании фаз электрической машины. Изучение устойчивости системы для анализа работы под нагрузкой позволяет не только оценить полученные изменения, но и дает информацию о требуемом быстродействии системы возбуждения для компенсации влияния нагрузки.

Выводы. Постановка задач на исследование.

Обзор литературы, посвященной вопросам изучения асинхронных генераторов и их применения в автономных системах генерирования, позволяет определить ключевые вопросы и сделать следующие выводы:

1. В системах генерирования автономных объектов, по причине существенных достоинств, представляет интерес использование асинхронных машин с короткозамкнутым ротором, как электромеханических преобразователей энергии. Основными достоинствами АМ является: высокая надежность, хорошие массо-энергетические показатели, способность к самовозбуждению, простота организации параллельной работы асинхронных генераторов и работы на сеть.
2. Анализ теоретических исследований выявил противоречие в трактовке процесса самовозбуждения, что показывает недостаточное исследование физических принципов работы асинхронного генератора. Возникновение и рост колебаний выходного напряжения асинхронного генератора следует трактовать как параметрический резонанс. Такой вид резонанса возможен в силу того, что электрическая машина является системой с периодически изменяемыми параметрами индуктивности, зависящими от положения ротора относительно статора.
3. Принятие параметрического резонанса, как причины перехода электрической машины в генераторный режим работы подводит к необходимости детального изучения данного явления. Применение полупроводниковых преобразователей энергии позволяет регулировать выходное напряжение, изменяя амплитуду и частоту тока инвертора. Отсутствие работ по анализу параметрического резонанса для асинхронного генератора с инверторным возбуждением, формирует задачу описания процесса и условий самовозбуждения АГ при различном характере нагрузки.
4. Процесс самовозбуждения является следствием динамической неустойчивости системы. Ограничение нарастания колебаний связано с

нелинейностью – насыщением магнитной системы. Исследование самовозбуждения целесообразно рассматривать из анализа систем дифференциальных уравнений, учитывающих насыщение стали, или из частотного анализа, путем построения годографа на комплексной плоскости и его анализа.

5. Несмотря на известные примеры использования полупроводниковых преобразователей для возбуждения АГ [43, 100], в настоящее время отсутствуют какие-либо четкие рекомендации по исполнению схемы возбуждения и выбору режимов работы, поддерживающих неизменными выходные параметры напряжения.

Анализ дифференциальных уравнений и частотных характеристик позволяет определить необходимые условия для возбуждения АГ, комплексно исследовать электромагнитные процессы и решить задачу о критической нагрузке. Для решения вопросов обеспечения гарантированного возбуждения и оптимального регулирования параметров генерируемого возбуждения необходимо исследовать процесс самовозбуждения, определить граничные условия и значимость факторов на данный процесс.

Достижения поставленной цели связано с решением следующих задач:

1. Исследовать явление параметрического резонанса в АГ при различном характере нагрузки, выявить причину явления самовозбуждения.
2. Определить граничные условия самовозбуждения АГ при возбуждении от батареи конденсаторов и в составе МСГ. Выделить обязательные и значимые факторы, влияющие на скорость и характер нарастания колебаний. Сформулировать рекомендации по проектированию МСГ электроэнергии на основе асинхронной машины.
3. Изложить особенности функционирования мехатронной системы генерирования “АМ – АИН”. Изучить возможность регулирования выходного напряжения. Разработать математическую и имитационную модель АГ с различными типами возбуждения.
4. Подтвердить адекватность полученных результатов теоретических исследований на экспериментальной установке.

ГЛАВА 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ САМОВОЗБУЖДЕНИЯ И УСТОЙЧИВОСТИ РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Теория электромеханических систем возникла как обобщение постулатов и закономерностей, позволяющих применение классических методов к электротехническим объектам для изучения свойств и параметров сложных систем. В настоящее время методология выбора научно-технических решений состоит из широкого спектра способов проектирования электромеханических систем [124]. Зачастую решение о способе проектирования принимается из расчета простоты получения результата, соответствующего первоначально выдвинутым требованиям. Основными способами получения необходимых характеристик являются описание и решение систем дифференциальных уравнений, визуальное - имитационное моделирование структурных схем в пакетах прикладных программ.

Определение условий и режимов самовозбуждения генераторов, асинхронных и постоянного тока, приводятся во многих статьях, учебниках, монографиях по электрическим машинам, например, в работах [59, 63, 74, 76, 96, 123]. Однако вывод этих условий очень схож между собой и выполнен на основе эвристических методов. Фактически, электромеханические системы генерирования электроэнергии, способные к самовозбуждению, основаны на принципах устойчивости, связанных с условиями баланса фаз и амплитуд, присутствии контуров положительной обратной связи с коэффициентом петлевого усиления больше единицы, что характерно и для систем иной физической природы.

Глава посвящена вопросам математического описания и моделирования АГ, в соответствии со схемой замещения, представленной на рисунке 1.3. Параметры схемы замещения были найдены по алгоритму, предложенному в работе [86] для электрических машин средней мощности с учетом рекомендаций [40, 47, 80, 116].

2.1 Метод имитационного моделирования для описания электромеханических систем

Современный этап развития электротехнической промышленности характеризуется усложнением электромеханических систем, взаимодействий и связей между узлами. Наиболее простым в освоении и применении является метод визуального моделирования. Суть метода заключается в пошаговом воспроизведении преобразований из структурных блоков с конкретным функциональным назначением. Преимуществом таких моделей является высокая скорость работы программы относительно событий исследуемой системы в реальном масштабе времени. Существуют специальные языки визуального моделирования, которые значительно упрощают процесс создания программы, описывающей модель объекта по сравнению с универсальными языками программирования. В настоящее время на практике наиболее популярны такие языки визуального моделирования, как *BPMN* и *UML*. Существуют и более редкие языки для моделирования телекоммуникационных систем, для моделирования бизнес-процессов, такие как *SADT/IDEF0*, *IDEF1x*, *SDL*, *MSC*, и другие. Применительно к электромеханическим системам наибольшую популярность получил *Simulink* – визуальная среда моделирования, дающая возможность при помощи стандартных блок-диаграмм строить модели динамических, в том числе дискретных, непрерывных и нелинейных систем. Данная программная среда отличается своей простотой и широкими возможностями выбора объектов моделирования, используя стандартные библиотеки, для решения задач механических, электросиловых и гидравлических систем, а также осуществлять развитый модельно-ориентированный подход при разработке систем управления. В настоящее время в арсенале исследователя присутствуют дополнительные пакеты расширений, позволяющие решать весь спектр задач разработки моделей от создания до тестирования и генерации кода для программной реализации нижнего уровня [102].

2.2 Описание электромеханических систем с позиций теории автоматического управления

Достаточно обобщенным методом изучения научно-технических систем с точки зрения моделирования являются методы теории автоматического управления (ТАУ). Они позволяют описывать динамические системы с помощью моделей в непрерывном и дискретном времени. Для реализации модель – алгоритма, воспроизводящего процесс функционирования системы во времени, необходимо построить функциональную схему системы или объекта, составленную по функциональному назначению элемента через типовые звенья ТАУ: безынерционное звено, апериодические звенья первого и второго порядка, дифференцирующее звено и т.д. Причем процесс преобразования имитируется элементарными явлениями, составляющими логическую структуру и последовательно протекающие во времени. Это дает возможность получить сведения о состоянии системы или процесса в конкретный момент времени и оценить характеристики системы на разных этапах преобразования. Реализация данного метода требует серьезного понимания происходящих физических процессов и их математического описания, знания преобразований физических величин в работе объекта или системы. Стоит отметить, что для моделирования сложных систем необходимо использование системного подхода, дифференцируя сложную систему на гораздо более простые узлы, что позволяет производить точную настройку модели и полный анализ на каждом этапе преобразования, после применения структурного элемента.

2.2.1 Определение условий самовозбуждения АГ

Определение условий генерирования электроэнергии не обязательно должно сопровождаться решением сложных систем дифференциальных уравнений. Наиболее простым со стороны представления модели является метод ТАУ. Для построения структурной схемы требуется понимание процессов преобразования энергии и взаимодействия структурных контуров объекта исследования. Он

позволяет максимально обобщенно описать работу системы, с минимальным числом учитываемых факторов. Использование ТАУ дает возможность составить структурную схему предмета исследования для определения всех интересующих характеристик объекта.

Как известно, схема классического АГ включает батарею конденсаторов, выступающую источником реактивной энергии. Асинхронный генератор, как электромеханическая система, состоит из электрического и магнитного контуров, связывая механическое перемещение ротора с увеличением амплитуды колебаний.

Для составления структурной схемы АГ целесообразно воспользоваться уравнениями токов и напряжений в операторной форме. Электромагнитные процессы в симметричном АГ с конденсаторным возбуждением выражается системой уравнения (8) при следующих допущениях:

- приводной двигатель имеет “бесконечно большую” мощность и постоянную частоту вращения;
- на процесс возбуждения оказывают влияние реактивные элементы схемы – индуктивные сопротивления цепи намагничивания, рассеяния статора $X_{\sigma 1}$ и полное сопротивление нагрузки Z_H , емкостное сопротивление возбуждающих конденсаторов X_C ;
- нагрузка генератора не превышает критического значения приводящего к срыву генерации $\{[R_2(s)](Z_H)\} \ll Z_H^*$.

$$\begin{aligned} i_C &= C \frac{du_C}{dt}, \\ i_{\text{ст}} &= i_C + i_H, \\ u_H &= u_C = \frac{d\psi_{\text{ст}}}{dt} - i_{\text{ст}} R_{\text{ст}} - L_{\sigma 1} \frac{di_{\text{ст}}}{dt}, \end{aligned} \quad (8)$$

где u_C, u_H (i_C, i_H) – напряжения (токи) на конденсаторе и нагрузке;

$R_{\text{ст}}, L_{\sigma 1}$ – активное сопротивление и индуктивность обмотки статора;

Z_H^* - критическая величина сопротивления.

Приведенная система соответствует структурной схеме “на фазу”, представленной на рисунке 1.3. Наличие энергии в системе, например, в качестве

остаточного магнитного потока $\Phi_{\text{ост}}$ приводит при вращении ротора к возникновению ЭДС E_r на выходе генератора, что по принципу генерирования электроэнергии в машинах переменного тока обуславливается скоростью изменения магнитного потока, напрямую связано с частотой вращения ротора:

$$E_r = -\frac{d\Phi_{\text{ост}}}{dt} = C_{\text{АГ}} \omega_{\text{рот}} \Phi_{\text{ост}}, \quad (9)$$

где $C_{\text{АГ}}$ – конструктивный коэффициент, характеризующий АГ.

Процесс самовозбуждения характеризуется балансом фаз и амплитуд. Наличие батареи конденсаторов, представленной звеном $-k_c \cdot p$, способствует созданию контура положительной обратной связи по магнитному потоку. Возникающий емкостной ток возбуждения, пройдя по статорной обмотке с числом витков $\omega_{\text{ст}}$, создает магнитодвижущую силу F и соответствующий магнитный поток Φ в приведенной схеме (см. рисунок 2.1). Амплитуда потока и ЭДС ограничиваются за счет нелинейности характеристики намагничивания генератора $\Phi(F)$. Условие баланса амплитуд в таком случае характеризуется коэффициентом петлевого усиления больше единицы, чему способствует емкостной ток, который в цепи ротора “поддерживает” развитие магнитного потока. Таким образом, получаем структурную схему АГ [41, 42]. В представленных схемах $p = d/dt$ – оператор дифференцирования по времени.

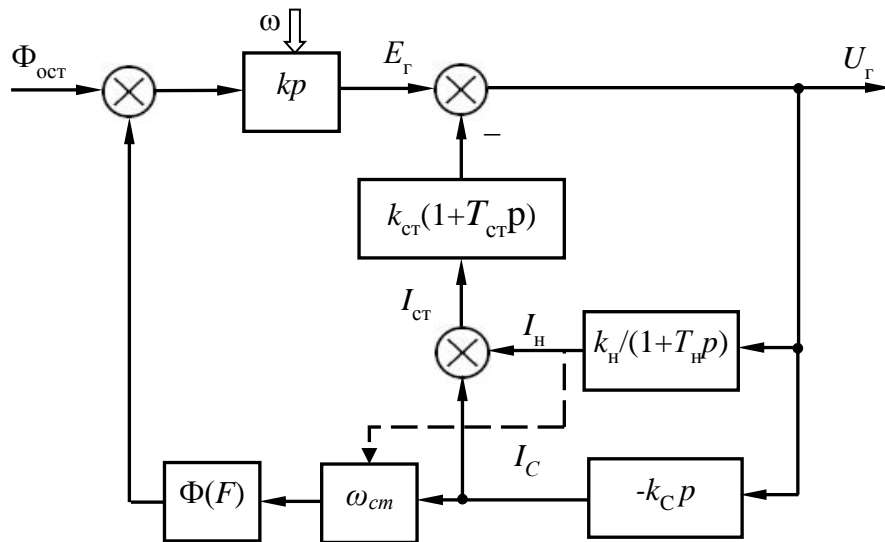


Рисунок 2.1. Структурная схема АГ с позиции ТАУ

Определение коэффициента петлевого усиления выполним из передаточной функции структурной схемы АГ. Для удобства преобразования применим условное обозначение для представленных звеньев структурной схемы АГ. В таблице 2.1. приведены обозначения и назначение элементов, используемых в структурной схеме и математических выражениях.

Таблица 2.1 – Условные обозначения звеньев структурной схемы АГ

Исходное звено	kp	$k_{ст}(1+T_{ст}p)$	$k_{н}/(1+T_{н}p)$	$-k_{ср}$	$\Phi(F) \cdot \omega_{ст}$
Условное обозначение	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5
Физическое значение	$C_{АГ} \cdot \omega$	$r_{ст} + L_{ст} \cdot p$	$R_{н} + L_{н} \cdot p$	$C \cdot p$	$n_{ст} \cdot L_{ГН}$
Выполняемое преобразование или назначение	ЭДС вращения от $\Phi_{ост}$	Падение напряжения на сопротивлении статора	Падение напряжения на активно-индуктивной нагрузке	Фазный конденсатор возбуждения	Функция намагничивания

Использование условных обозначений сокращает математические выкладки, позволяет быстро и обобщённо описать исследуемый объект. Это в дальнейшем дает возможность без лишних усилий модернизировать предмет исследования вводом дополнительных или заменой используемых функциональных звеньев на любом этапе преобразования энергии.

На рисунке 2.2 приведена схема АГ с позиции теории автоматического управления в условных обозначениях. Учитывая направление токов и знаков обратных связей, данную схему можно преобразовать в вид, представленный на рисунке 2.3.

будет иметь при знаменателе стремящимся в ноль. Данная формулировка в символьном виде отображается следующим выражением:

$$W_1 \cdot W_4 \cdot W_5 \geq 1 + W_2(W_3 + W_4). \quad (12)$$

Первый анализ полученного неравенства показывает, что условие самовозбуждения обеспечивается тремя основными блоками, гарантирующими достаточный коэффициент петлевого усиления: требуемой частотой вращения ротора, величиной возбуждающей емкости фазного конденсатора, видом кривой намагничивания. Полученный результат хорошо соотносится с результатами практических экспериментов, где основополагающими требованиями к возбуждению являются значение возбуждающей емкости конденсатора и частота вращения ротора, которые должны находиться в определенном диапазоне.

Выполнив обратный переход выражения (12) от условных обозначений к исходным (таблица 2.1), получим следующее выражение:

$$w_{\text{рот}} \cdot C_{\text{АГ}} \cdot Cp \cdot \frac{\omega_{\text{ст}}}{R_m} \geq 1 + r_{\text{ст}} \left(1 + \frac{L_{\text{ст}}}{r_{\text{ст}}} p \right) \left(\frac{1}{R_{\text{Н}} \left(1 + \frac{L_{\text{Н}}}{R_{\text{Н}}} p \right)} - Cp \right), \quad (13)$$

где $r_{\text{ст}}$, $L_{\text{ст}}$ – активное и индуктивное сопротивление статора электрической машины;

$R_{\text{Н}}$, $L_{\text{Н}}$ – активное и индуктивное сопротивление нагрузки;

$C_{\text{АГ}}$ – постоянный коэффициент, характеризующий данный генератор;

C – емкость фазного конденсатора.

Оценим данное условие при работе АГ на холостом ходу. Для этого примем следующие значения параметров: $R_{\text{Н}} \rightarrow \infty$, $r_{\text{ст}} \rightarrow 0$. При таких значениях сопротивления нагрузки и активного сопротивления статора правая часть неравенства модифицируется в следующий вид (выражение 14).

$$1 + r_{\text{ст}} \left(1 + \frac{L_{\text{ст}}}{r_{\text{ст}}} p \right) \left(\frac{1}{R_{\text{H}} \left(1 + \frac{L_{\text{H}}}{R_{\text{H}}} p \right)} - Cp \right) = 1 - L_{\text{ст}} p \cdot Cp \quad (14)$$

Левую часть неравенства (13) стоит понимать как:

$$w_{\text{рот}} \cdot C_{\text{АГ}} \cdot Cp \frac{\omega_{\text{ст}}}{R_m} = X_{\text{АГ}} \cdot Cp, \quad (15)$$

где $X_{\text{АГ}} = w_{\text{рот}} \cdot C_{\text{АГ}} \frac{\omega_{\text{ст}}}{R_m}$ – индуктивное сопротивление АГ, отражающее характеристику холостого хода генератора $E_{\Gamma} = f(i_c)$;

$w_{\text{рот}}$ – частота вращения ротора;

$\omega_{\text{ст}}$ – число витков статорной обмотки;

R_m – магнитное сопротивление ветви “индуктор – воздушный зазор – якорь”.

Окончательно получим, что процесс самовозбуждения возможен при выполнении условия:

$$X_{\text{АГ}} \cdot Cp \geq 1 - L_{\text{ст}} p \cdot Cp. \quad (16)$$

Разделив обе части неравенства на величину Cp , получим известное в классической теории электрических машин выражение условия самовозбуждения АГ на ХХ, приведенное ранее, например, в книге А.И. Вольдека [40]:

$$X_{\text{АГ}} + X_{\sigma} \geq X_C. \quad (17)$$

где X_{σ} – реактивное сопротивление статора асинхронной машины;

X_C – реактивное сопротивление возбуждающего конденсатора.

Аналогичным образом выводится неравенство при наличии активно-индуктивной нагрузки:

$$\frac{X_{\text{АГ}} + X_{\sigma}}{X_C} \geq 1 + \frac{X_{\sigma}}{Z_{\text{H}}}, \quad (18)$$

где Z_{H} – полное сопротивление нагрузки.

Из полученного условия самовозбуждения, очевидно, что возбуждение становится невозможным, когда в результате увлечения насыщения сопротивление

X_{AG} уменьшается настолько, что наступает равенство правой и левой части выражения. Подтверждается наличие верхнего граничного значения возбуждающей емкости. Таким образом, выбор батареи конденсаторов должен исходить из условия (17) и требуемой частоты выходного напряжения.

Из выражения (18), учитывающего нагрузку, получено представление критического сопротивления, при котором происходит срыв генерации:

$$Z_H \geq \frac{X_\sigma \cdot X_C}{X_{AG}(Z_H) + X_\sigma - X_C} \quad (19)$$

Составляющая $X_{AG}(Z_H)$ отражает дополнительную зависимость индуктивного сопротивления АГ, обусловленного размагничивающим действием реакции ротора (пунктирная линия на рисунке 2.1). Изменение индуктивного сопротивления АГ приводит к отклонению частоты генерируемого тока, что фактически проявляется в вариации скольжения при росте нагрузки.

Представляя АГ как резонансную систему, генерирующую энергию на частоте соответствующей свободным колебаниям, можно сделать вывод: частота данных колебаний зависит не только от реактивных параметров электрической машины и батареи конденсаторов, но и от нагрузки и может изменяться относительно работы на холостом ходу, даже при постоянной скорости вращения [43, 81].

Нестрогое неравенство (19) можно представить в графической форме (рисунок 2.4), считая сопротивления возбуждающего конденсатора и статора асинхронной машины постоянным.

На выходе структурной схемы АГ (рисунок 2.1) снимается значение генерируемого синусоидального напряжения (рисунок. 2.5). Для получения характеристик были использованы параметры асинхронного двигателя мощностью 7,5 кВт АИР132S4 параметры которого приведены в таблице 2.2, в качестве источника возбуждения учитывалась батарея конденсаторов с фазной емкостью в 120 мкФ, при работе на индуктивно-активную нагрузку мощность порядка 2 кВт. Для обеспечения номинальной частоты генерируемого напряжения ротор

асинхронной машины должен вращаться с частотой немного выше номинальной, для обеспечения небольшой величины скольжения с отрицательным знаком.

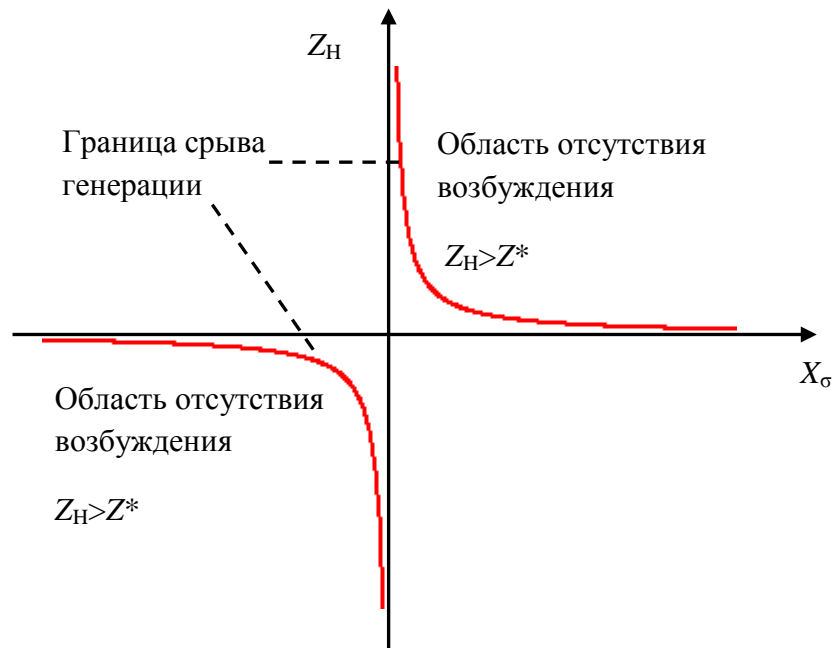


Рисунок 2.4. Графическая интерпретация самовозбуждения

В данной модели учтено насыщение магнитной цепи по пути основного магнитного потока, через функцию намагничивания. Ограничение нарастания колебаний обусловлено именно насыщением магнитной цепи. В реальных генераторных установках на базе асинхронной машины в процессе возбуждения, кроме нелинейного характера нарастания амплитуды колебаний, наблюдается изменение частоты генерируемого напряжения. Рассмотренная модель, основанная на принципах ТАУ, не учитывает этот факт.

Таблица 2.2 – Параметры АГ на базе асинхронной машины АИР132S4

Параметр	C_{AG} , о.е.	ω , об/мин	$r_{ст}$, Ом	$X_{ст}$, Гн	C , мкФ	Z_H , Ом	L_H , Гн	$n_{экв}$, о.е.
Значение	1,3	1500	0,6837	0,004152	120	24	0,007	10

Как результат, текущая модель может быть использована для определения условия баланса амплитуд – величина вносимой энергии за период должна

превышать расходуемую энергию, на потери различного рода. При этом не рассмотрено обязательное для генераторов переменного тока, условие баланса фаз. Определение данного условия будет найдено из анализа частотных характеристик и устойчивости передаточной функции путем замены оператора дифференцирования оператором Фурье с разложением на мнимую и действительную части, аналогично переходу в α - β – систему координат.

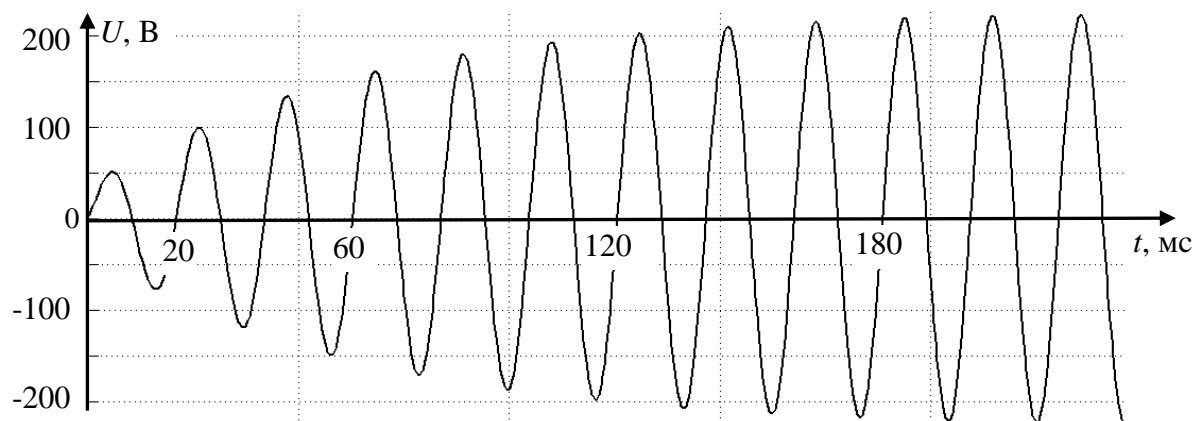


Рисунок 2.5. График выходного напряжения из схемы АГ

Изображенная на рисунке 2.1 структурная схема не дает возможности масштабного изучения всех возможных характеристик и величин асинхронного генератора. Представление усложнённой структурной схемы асинхронного генератора позволит проводить более весомый анализ, но в таком случае утрачивается главное достоинство данного метода – простота демонстрации работы объекта, из-за чего прочие методы становятся наиболее выигрышными. Разработанная модель АГ предоставляет возможность обобщенного описания объекта, исследования временных характеристик и электромагнитных процессов.

2.2.2 Определение условий самовозбуждения ГПТ

Подобный алгоритм можно использовать и для прочих систем генерирования. Применим его для генератора постоянного тока (ГПТ) параллельного возбуждения. Баланс амплитуд, так же как и в схеме АГ, выполняется при петлевом коэффициенте усиления больше единицы, который также может быть получен из

выражений общей передаточной функции системы. Баланс фаз в ГПТ фактически отсутствует, так как коллектор, выполняющий функцию “модулятора – демодулятора”, превращает переменный в якоре магнитный поток в постоянный. Электромагнитные процессы при постоянной скорости вращения якоря выражаются системой уравнений:

$$\begin{aligned} u_B &= R_B i_B + L_B \frac{di_B}{dt}, \\ u_{\text{я}} &= C_e \Phi \omega_{\text{я}} - R_{\text{я}} i_{\text{я}} - L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt}, \\ \Phi &= i_B w_B / R_m, \end{aligned} \quad (20)$$

где $R_{\text{я}}$ – активное сопротивление якоря электрической машины;

R_{H} – активное сопротивление нагрузки;

C_e – постоянный конструктивный коэффициент, характеризующий данный генератор постоянного тока;

R_B, L_B – активное и индуктивное сопротивление ветви возбуждения.

При такой схеме возбуждения напряжения обмотки возбуждения и якоря равны между собой $u_{\text{я}} = u_B = i_{\text{Г}} R_{\text{H}}$, ЭДС обуславливается частотой вращения ротора $E_{\text{Г}} = C_e \Phi \omega_{\text{вр}}$. Системе уравнений (20) соответствует структурная схема, представленная на рисунке 2.6.

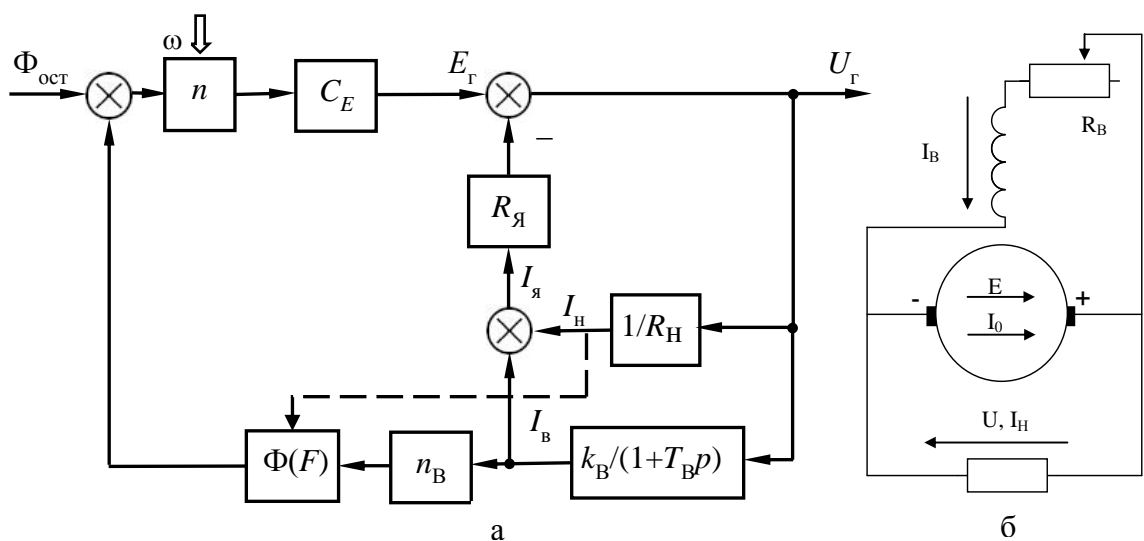


Рисунок 2.6. ГПТ: а – структурная схема ГПТ параллельного возбуждения с позиции ТАУ; б – принципиальная схема ГПТ параллельного возбуждения

Согласно структурной схеме и принципам работы ГПТ наличие остаточного магнитного потока $\Phi_{\text{ост}}$ приводит при вращении якоря к возникновению ЭДС – вращения E_r на выходе генератора (9). В обмотке возбуждения с числом витков n_B , представленной апериодическим звеном $k_B/(1+T_B p)$, возникает ток возбуждения, который создает МДС F и соответствующий магнитный поток. Таким образом, образуется контур положительной обратной связи по магнитному потоку, способствующий процессу самовозбуждения. Амплитуда потока и ЭДС ограничивается за счет нелинейности характеристики намагничивания $\Phi(F)$.

Для удобства преобразования были использованы условные обозначения для представленных звеньев структурной схемы ГПТ (рисунок 2.6). В таблице 2.3. приведены обозначения и назначение элементов, используемых в структурной схеме и математических выражениях.

Таблица 2.3 – Условные обозначения звеньев структурной схемы ГПТ

Исходное звено	kp	$R_{\text{я}}$	$1/R_{\text{H}}$	$k_B/(1+T_B p)$	$\Phi(F) \cdot n_B$
Условное обозначение	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5
Физическое значение	$C_E W_{\text{вр}}$	$R_{\text{я}}$	R_{H}	$R_B + L_B$	$n_B L_{\text{ГН}}$
Выполняемое преобразование или назначение	Получение ЭДС вращения из магнитного потока	Падение напряжения на сопротивлении якоря	Падение напряжения на активной нагрузке	Создание дополнительного магнитного потока возбуждения	Функция намагничивания

Как и в схеме АГ с емкостным возбуждением процесс нарастания напряжения характеризуется некоторым условием, гарантирующим явление самовозбуждения. После подстановки и преобразований получим условие

самовозбуждения ГПТ. В общем виде данное условие полностью повторяет выражение (12).

Колебательный процесс ГПТ будет иметь нарастающий характер, если будет выполняться следующее условие:

$$w_{\text{вр}} \cdot C_e \cdot L_{\text{ген}} \cdot n_{\text{е}} \geq (R_{\text{В}} + L_{\text{В}}p) \left(1 + \frac{R_{\text{Я}}}{R_{\text{Н}}}\right) + R_{\text{Я}}. \quad (21)$$

Оценим данное выражение в установившемся режиме работы при следующем значении параметра оператора дифференцирования $p \rightarrow 0$ ($t \rightarrow \infty$). При таких значениях правая часть неравенства преобразится в следующее выражение:

$$(R_{\text{В}} + L_{\text{В}}p) \left(1 + \frac{R_{\text{Я}}}{R_{\text{Н}}}\right) + R_{\text{Я}} = R_{\text{В}} \cdot \left(1 + \frac{R_{\text{Я}}}{R_{\text{Н}}}\right) + R_{\text{Я}}. \quad (22)$$

Левую часть неравенства (21) примем как величину сопротивления генератора:

$$X_{\text{ГПТ}} = w_{\text{вр}} C_e L_{\text{ген}} n_{\text{е}}, \quad (23)$$

где $X_{\text{ГПТ}}$ – полное индуктивное сопротивление ГПТ, отражающее характеристику холостого хода.

С учетом вышеизложенных преобразований выражение (21) примет следующий вид:

$$\frac{|X_{\text{ГПТ}}| - R_{\text{Я}}}{R_{\text{В}}} \geq 1 + \frac{R_{\text{Я}}}{R_{\text{Н}}}. \quad (24)$$

Полученное условие самовозбуждения ГПТ повторяет выражения, представленные в учебниках по электрическим машинам. Анализируя полученное неравенство можно сделать следующий вывод: существует некоторое критическое значение сопротивления обмотки возбуждения, при котором невозможен процесс самовозбуждения. Из выражения также следует, что самовозбуждение ГПТ, так же как и в АГ, становится невозможным при некоторой величине нагрузки, когда приведенное условие баланса амплитуд не выполняется:

$$R_{\text{Н}} \geq \frac{R_{\text{В}} \cdot R_{\text{Я}}}{|X_{\text{ГПТ}}(R_{\text{Н}})| - R_{\text{В}} - R_{\text{Я}}}. \quad (25)$$

Составляющая $X_{ГПТ}(Z_H)$ отражает дополнительную зависимость индуктивного сопротивления ГПТ, обусловленного размагничивающим действием реакции ротора (пунктирная линия на рисунке 2.6 а). Данное выражение является решением задачи о предельной нагрузке и соответствует характеристикам возбуждения ГПТ при различных сопротивлениях нагрузки, представленными на рисунке 2.7.

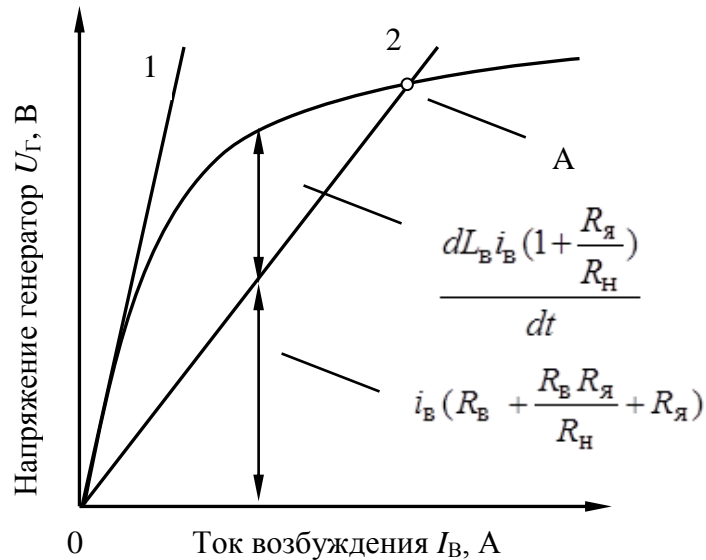


Рисунок 2.7. Самовозбуждение ГПТ при различных “внешних” сопротивлениях относительно ЭДС: 1– критическое значение сопротивления; 2 – вольтамперная характеристика обмотки возбуждения; А – рабочая точка ГПТ

Для получения характеристик используем параметры двигателя 2ПН100ЛУХЛ4 на 110 В мощностью 2,2 кВт, при работе на индуктивно-активную нагрузку мощность, ориентировочно, 1 кВт и номинальной частоте вращения якоря. Параметры приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Параметры ГПТ на базе машины 4ПН100ЛУХЛ4

Параметр	C_e , о.е.	ω , об/мин	$R_я$, Ом	$L_я$, мГн	R_B , Гн	L_B , мГн	Z_H , Ом	n_B , о.е.
Значение	1,03	3000	0,16	5,7	295/81	12	12	24

На выходе представленной схемы (рисунок 2.8) получим график роста напряжения во времени.

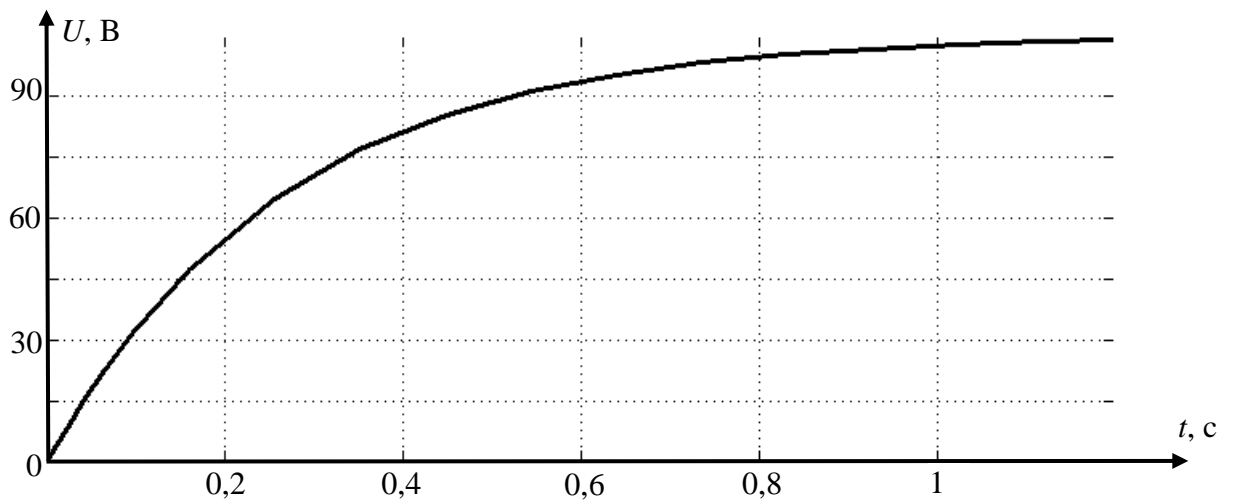


Рисунок 2.8. График выходного напряжения из схемы ГПТ с позиции ТАУ

2.2.3 Оценка методов ТАУ применительно к электромеханическим системам

Аналогичные по форме выражения (18), (24) показывают, что для ГПТ и АГ существуют критические значения параметров цепи возбуждения и нагрузки, достижение которых приводит к невыполнению условий самовозбуждения, а фактически становится причиной срыва генерации, что согласуется с видом соответствующих внешних характеристик. Процессы самовозбуждения электрических машин различной конструкции с позиций теории автоматического управления едины и подчиняются принципам организации положительной обратной связи при условии выполнения баланса фаз и амплитуд. Анализ процесса самовозбуждения электрических машин с позиций теории автоматического управления и с позиций классической теории электромеханических систем приводит к идентичным формам математических выражений, а также к аналогичным физическим условиям самовозбуждения, что говорит об общности явления генерирования электроэнергии в различных типах электрических машин. В данной работе впервые получены условия самовозбуждения электрических машин различного типа с позиции теории автоматического управления и уточнены

известные ранее условия по определению величины критической нагрузки, приводящей к срыву генерации.

Применённый метод ТАУ позволяет определить условия самовозбуждения для электрических машин различной конструкции, но не решает задачи регулирования выходного напряжения АГ при изменении скорости вращения ротора и нагрузки, как по величине, так и по ее характеру. Это приводит к необходимости применения регулируемого поставщика реактивного тока, которым может выступать полупроводниковый преобразователь (ППП). Дополнительно ППП может быть применен в качестве устройства импульсного подмагничивания ротора, как это используется у синхронно-гистерезисных двигателей. Увеличение значения остаточной намагниченности позволит улучшить быстродействие процесса нарастания колебаний и уменьшить требуемую для возбуждения энергию.

2.3 Описание электрических машин с помощью дифференциальных уравнений

2.3.1 Представление объекта исследования как системы дифференциальных уравнений

Классический метод описания с помощью систем дифференциальных уравнений является наиболее обобщенным. Математическая модель объекта является его идеализацией, поэтому при составлении уравнений и рассмотрении переходных процессов используют общепринятые ограничения и допущения, связанные с “идеализированным” объектом. Так при составлении уравнений для электрических машин считают, что фазные обмотки симметричны, пренебрегают потерями в стали и т.п. В связи с упрощением объекта возникает задача настройки математической модели на реальный объект, суть которой состоит в определении таких значений параметров, которые дадут результат, максимально приближенный к экспериментальным данным. В случае необходимости может быть учтено большее число факторов, однако это значительно усложняет решение системы

дифференциальных уравнений, увеличивая время нахождения решения. В связи с этим поиск переключают на специализированные программы.

При работе генератора возможны следующие режимы: конденсаторное возбуждение на холостом ходу, включение и работа на нагрузку, возбуждение под нагрузкой. Анализ этих режимов возможен из системы уравнений асинхронной машины.

Наиболее общим методом получения формы уравнений является применение законов Кирхгофа, Ампера к электрическим цепям и преобразование полученных уравнений к некоторой системе координат. Для записи закона равновесия на валу используют второй закон Ньютона учитывающий инерционность самой машины, угловую скорость ротора, действующий момент на ротор. В результате полученная система дифференциальных уравнений позволяет осуществить комплексный анализ всех контуров исследуемой системы. Однако решение полученной системы дифференциальных уравнений возможно только с помощью вычислительной техники. Описание объекта с большим числом контуров значительно усложняет анализ происходящих процессов, увеличивая время нахождения решения и требования по вычислительной мощности. Кроме того, для высокой точности проектирования АГ необходимо располагать полной магнитной характеристикой электрической машины, невозможно принять характеристику прямолинейной. Требуется располагать действительной криволинейной характеристикой в координатах тока намагничивания I_0 и ЭДС E_{AG} .

В настоящее время используется методика, которая исходит из предположения, что индукция в зубцах пропорциональна индукции воздушного зазора, но это справедливо лишь для малых значений магнитной индукции, при которой весь магнитный поток проходит через зубцы. При насыщении зубцов данное допущение не уместно, т.к. часть магнитного потока будет проходить через пазы [70, 73].

Известны различные формы записи уравнений асинхронной машины с возбуждением от батареи конденсаторов, целесообразность использования той или иной формы записи определяется условиями поставленной задачи. Весьма удобной

формой записи работы электрических машин являются уравнения в $d, q, 0$ системе координат, вращающейся со скоростью движения ротора. Такая система уравнений лишена периодических и комплексных коэффициентов, решения при этом описываются квазигармоническими или гармоническими функциями [71-72, 118]. АГ с емкостным возбуждением в комплексной форме записи в $d-q$ системе координат описывается уравнением:

$$\left\{ \begin{array}{l} (p + i\Omega)^2 x_m \bar{i}_0 + (p + i\Omega)^2 x_{1\sigma} \bar{i}_1 + (p + i\Omega) r_1 \bar{i}_1 + x_C \bar{i}_C = 0, \\ -x_C \bar{i}_C + (p + i\Omega)^2 x_{LH} \bar{i}_H + (p + i\Omega) r_H \bar{i}_H + x_{CH} \bar{i}_H = 0, \\ px_{2\sigma} \bar{i}_2 + r_2 \bar{i}_2 + px_m \bar{i}_0 = 0, \\ \bar{i}_1 + \bar{i}_2 = \bar{i}_0, \\ \bar{i}_H + \bar{i}_C = \bar{i}_1, \end{array} \right. \quad (26)$$

где p – оператор дифференцирования;

i_1, i_2, i_H, i_C, i_0 – соответственно токи статора, ротора, нагрузки генератора, возбуждающей емкости, намагничивания;

r_1, r_2 – активное сопротивление фаз статора и ротора;

$x_{1\sigma}, x_{2\sigma}$ – индуктивное сопротивление рассеяния фаз статора и ротора;

x_m – сопротивление взаимоиндукции;

x_C, x_{LH}, x_{CH} – реактивные сопротивления.

Но при использовании данной формы записи возникают характерные трудности для описания переходных процессов систем генерирования, т.к. преобразованиям подвергаются переменные статорных цепей. Работа асинхронного генератора на нагрузку зачастую характеризуется несимметрией цепей статора, из-за чего целесообразно использовать систему уравнений в $\alpha, \beta, 0$ осях, позволяющую определять мгновенное состояние электрической машины и снижать требования к вычислительным ресурсам.

Для анализа самовозбуждения АГ, исходную систему дифференциальных уравнений (ДУ) требуется дополнить уравнениями равновесия напряжений и токов

контуров возбуждения и нагрузки. Токи статора и ротора можно определить, считая, что потокосцепления известны. Однако необходимость учета насыщения магнитной цепи не позволяет воспользоваться известными уравнениями потокосцеплений. Описание динамических процессов асинхронной машины, учитывающих эффект насыщения цепи намагничивания, выполняются двумя широко используемыми методами: методом статических индуктивностей и методом динамических индуктивностей. В первом методе индуктивность намагничивания задается своей статической зависимостью. Второй метод применяется гораздо реже, т.к. является гораздо более сложным, а полученные результаты схожи с первым методом. Наиболее подходящим методом учета насыщения асинхронного генератора является метод учета по пути основного магнитного потока, связанный с определением по кривой намагничивания машины в зависимости от результирующего потока в воздушном зазоре [38, 118, 129-130, 139].

2.3.2 Дифференциальные уравнения асинхронной машины

При составлении дифференциальных уравнений и рассмотрении переходных процессов асинхронных машин, работающих в двигательном или генераторном режиме, используют общепринятые допущения, связанные с идеализацией машины: фазные обмотки симметричны и расположены под углом в 120 градусов для 3-х фазных машин, отсутствуют потери в стали, воздушный зазор равномерен, машина ненасыщенна, магнитодвижущие силы распределены синусоидально вдоль по окружности воздушного зазора. При условии обязательного учета всех особенностей и нелинейностей (насыщения магнитной цепи, несимметрией обмоток и т.д.) система дифференциальных уравнений значительно усложняется.

Для описания переходных процессов асинхронной машины составляются уравнения электромагнитного равновесия моментов, действующих на ротор, и напряжений контуров системы.

Уравнения напряжений для трехфазной электрической машины представлены системой (27).

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\Psi_A}{dt} + r_s i_A = U_A, \\ \frac{d\Psi_B}{dt} + r_s i_B = U_B, \\ \frac{d\Psi_C}{dt} + r_s i_C = U_C, \\ \frac{d\Psi_a}{dt} + r_r i_a = 0, \\ \frac{d\Psi_b}{dt} + r_r i_b = 0, \\ \frac{d\Psi_c}{dt} + r_r i_c = 0, \end{array} \right. \quad (27)$$

где $\Psi_{A,B,C}$ ($\Psi_{a,b,c}$) – полное потокосцепление фазы статора (ротора);

$i_{A,B,C}$ ($i_{a,b,c}$) – ток в фазе статора (ротора);

$r_{A,B,C}$ ($r_{a,b,c}$) – сопротивление фазы статора (ротора);

$U_{A,B,C}$ – значение напряжения на фазах статора.

Первые три уравнения характеризуют напряжения фаз статора $U_{A,B,C}$, вторая тройка описывает уравнения условных обмоток фаз ротора $U_{a,b,c} = 0$ через полное потокосцепление и ток в фазе.

В свою очередь потокосцепление любой фазы определяется величиной собственной индуктивности и взаимной индуктивности с прочими обмотками электрической машины:

$$\begin{aligned} \Psi_A &= L_A i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C + M \cos \gamma i_a + M \cos(\gamma + 2\pi/3) i_b + M (\cos \gamma - 2\pi/3) i_c, \\ \Psi_a &= L_a i_a + M_{ab} i_b + M_{ac} i_c + M \cos \gamma i_A + M \cos(\gamma + 2\pi/3) i_B + M (\cos \gamma - 2\pi/3) i_C, \end{aligned} \quad (28)$$

где M – максимальная величина взаимной индуктивности, при совпадении осей соответствующих обмоток фаз статора “А” и ротора “а”;

$M_{AB} = M_{AC} = M_{BC}$ ($M_{ab} = M_{ac} = M_{bc}$) – взаимоиндуктивности между обмотками статора (ротора);

$L_A = L_B = L_C$ ($L_a = L_b = L_c$) – индуктивность фазы статора (ротора);

Подобным образом описываются и прочие фазы статора и ротора.

Электромагнитный момент асинхронной машины определяется как производная запасенной электромагнитной энергии машины $W_{\text{ЭМ}}$ по углу поворота ротора γ :

$$M_{\text{ЭМ}} = p \frac{dW_{\text{ЭМ}}}{d\gamma}. \quad (29)$$

Электромагнитная энергия описывается следующим соотношением:

$$W_{\text{ЭМ}} = 0,5(\Psi_A i_A + \Psi_B i_B + \dots + \Psi_b i_b + \Psi_c i_c). \quad (30)$$

Уравнение скорости вращения ротора:

$$\frac{dw_r}{dt} = (M_{\text{ЭМ}} - M_{\text{Мех}}) / J, \quad (31)$$

где J – момент инерции ротора;

$M_{\text{Мех}}$ – механический момент на валу электрической машины.

Приведенные уравнения (27)-(31) составляют систему уравнений, описывающую работу трехфазной асинхронной машины. Система состоит из пятнадцати выражений с четырнадцатью переменными параметрами: фазными токами, потоками, частотой вращения ротора и электромагнитным моментом. Кроме этого данная система нелинейная, т.к. в ней имеются взаимозависимые переменные коэффициенты. Однако при постоянной частоте вращения систему можно рассматривать как линейную с периодически изменяемыми коэффициентами, являющимися функциями от времени.

Для упрощения полученной системы, сокращения числа уравнений целесообразен переход из трехосевой системы к системе ортогональных координат (α, β) , неподвижной относительно статора. Такая система удобна для исследования переходных процессов электрических машин, в том числе с несимметричными обмотками статора и симметричным ротором, анализа работы в генераторном и аварийных режимах работы. Установив положение одной из осей, совпадающее с осью фазы реальной машины значение тока i_α будет соответствовать реальному фазному току.

Выбор такой системы координат может существенно облегчить исследования и моделирование электрических машин переменного тока. Но даже предпочтение

конкретной системы координат позволяет несколько форм записей уравнений асинхронной машины, выраженные либо через потокосцепления, либо через токи и потокосцепления статорного и роторного контуров. В первом случае система максимально упрощена из-за отсутствующих в явном виде выражений токов, что ограничивает исследование только анализом механических характеристик. Уравнения АМ, выраженные через токи и потокосцепления, позволяют определять характер изменения токов, потокосцепления и электромагнитного момента. Такая форма может быть представлена в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\Psi_{\alpha}}{dt} = U_{\alpha} - r_s i_{\alpha}, \\ \frac{d\Psi_{\beta}}{dt} = U_{\beta} - r_s i_{\beta}, \\ \frac{d\Psi_{\alpha r}}{dt} = \omega_r \Psi_{\beta r} - r_r i_{\alpha r}, \\ \frac{d\Psi_{\beta r}}{dt} = \omega_r \Psi_{\alpha r} - r_r i_{\beta r}, \\ i_{\alpha} = \frac{\Psi_{\alpha}}{\sigma x_s} - \frac{x_m}{\sigma x_s x_{\sigma r}} \Psi_{\alpha r}, \\ i_{\beta} = \frac{\Psi_{\beta}}{\sigma x_s} - \frac{x_m}{\sigma x_s x_r} \Psi_{\beta r}, \\ i_{\alpha r} = \frac{\Psi_{\alpha r}}{\sigma x_r} - \frac{x_m}{\sigma x_s x_r} \Psi_{\alpha}, \\ i_{\beta r} = \frac{\Psi_{\beta r}}{\sigma x_r} - \frac{x_m}{\sigma x_s x_{\sigma r}} \Psi_{\beta}, \\ \frac{dw_r}{dt} = (M_{\text{ЭМ}} - M_{\text{Мех}}) / J, \\ M_{\text{ЭМ}} = \frac{3}{2} x_m (i_{\alpha r} i_{\beta} - i_{\alpha} i_{\beta r}), \end{array} \right. \quad (32)$$

где $\Psi_{\alpha, \beta} (\Psi_{\alpha r, \beta r})$ – полное потокосцепление по α и β осям статора (ротора);

$i_{\alpha, \beta} (i_{\alpha r, \beta r})$ – ток по α и β осям статора (ротора);

$r_s (r_r)$ – сопротивление фазы статора (ротора);

$U_{\alpha} (U_{\beta})$ – по α и β осям;

ω_r – частота вращения ротора;

$\sigma = 1 - \frac{X_m^2}{X_s X_r}$ – полный коэффициент рассеяния, определяемый выражением.

Окончательный выбор формы записи системы уравнений асинхронной машины для составления математической модели определяется переменными, вызывающими интерес для анализа. В том числе, выражением электромагнитного переходного момента и критериями оптимальности математической модели, позволяющими оценивать устойчивость работы, возможность задания внешних возмущений, уменьшение времени вычисления при заданной точности расчета [75, 118].

В общем случае все параметры асинхронной машины являются переменными. Так индуктивное сопротивление зависит от насыщения магнитной цепи, активные сопротивления статора и ротора определяются нагревом материала проводников и эффектом вытеснения тока. Сложность полного учета изменения параметров связана с отсутствием непосредственных зависимостей в функциях потоков, токов и т.д. Кроме этого изменение параметров происходит, как правило, одновременно из-за нескольких факторов. Практические исследования показали, что уравнения идеализированной машины, с учетом принятых допущений, справедливы для реальной машины. Представление процессов в виде (32) в действительности является приближенным, позволяющим получить результат близкий к экспериментальным данным.

Фактором, оказывающим наибольшее влияние на изменение работы асинхронной машины в переходных режимах, является насыщение магнитной цепи. Величина основного магнитного потока, связанная с ЭДС воздушного зазора, влияет на магнитную проводимость. Это проявляется как изменение сопротивления взаимоиндукции статора и ротора. Не зная данной величины, невозможно рассчитать параметры стационарного режима работы. При этом сопротивление взаимоиндукции может варьироваться при изменении нагрузки, скорости вращения, величины реактивной энергии. Оценку величины магнитного сопротивления удобно выполнять по параметрам ветви намагничивания эквивалентной схемы замещения. Для учета изменения сопротивления

взаимоиндукции X_m используют функции результирующего магнитного потока в воздушном зазоре Ψ_δ :

$$\Psi_\delta = \sqrt{\Psi_{\delta\alpha}^2 + \Psi_{\delta\beta}^2}, \quad (33)$$

где $\Psi_{\delta\alpha}$, $\Psi_{\delta\beta}$ - потокосцепление в воздушном зазоре по осям α и β .

Для того чтобы учесть насыщение магнитной цепи по пути потоков рассеяния, потребуется из потокосцеплений по осям вычесть величину произведения фазного тока на значения насыщенного индуктивного сопротивления обмоток статора и ротора [25, 35, 62]:

$$\Psi_{\delta\alpha} = \Psi_\alpha - x_\sigma i_\alpha. \quad (34)$$

Определяющими являются значения параметров в начальный момент переходного процесса. В переходных процессах, описываемых уравнениями с нелинейными коэффициентами, происходит изменение параметров, влияющее на преобразования энергии в меньшей степени, чем в начальный момент.

Уравнения с нелинейными параметрами не имеют точного решения. Получение сходящегося решения не гарантирует полного соответствия расчетных и экспериментальных данных. Зачастую расчетные значения в установившемся режиме несколько выше экспериментальных, что наблюдается во многих работах [34, 43, 53, 107]. Данное явление связано с упрощением математической модели путем исключения факторов рассеивания мощности.

2.3.3 Дифференциальные уравнения асинхронных генераторов

Классическая схема возбуждения подразумевает использование батареи конденсаторов, как источника необходимой для возбуждения реактивной энергии. Дополнительный контур схемы возбуждения должен быть учтен при математическом описании. Для этого необходимо систему уравнений (32) дополнить уравнениями равновесия напряжений, токов цепи возбуждения и нагрузки [39, 69, 72], см. (35).

$$\begin{cases} i_{\alpha} + \frac{Cdu_{\alpha}}{dt} - i_H = 0, \\ i_{\beta} - \frac{Cdu_{\beta}}{dt} - i_H = 0, \\ i_C = \frac{Cdu}{dt}, \end{cases} \quad (35)$$

где i_C, i_H – токи конденсатора, нагрузки генератора.

Окончательная форма дифференциальных уравнений асинхронного генератора с емкостным возбуждением, выполненного на базе асинхронной машины с короткозамкнутым ротором с учетом внешнего источника возбуждения – батареи конденсаторов, соединенным по схеме “треугольник”, и подключенной нагрузки в неподвижной системе комплексных координат α, β представлена в (36):

$$\begin{cases} \frac{di_{s\alpha}}{dt} = \frac{u_{s\alpha}}{L_s} - \frac{r_s i_{s\alpha}}{L_s} + \frac{k_r}{L_s T_r} \Psi_{r\alpha} + \frac{k_r}{L_s} p w_{\text{пот}} \Psi_{r\beta}, \\ \frac{di_{s\beta}}{dt} = \frac{u_{s\beta}}{L_s} - \frac{r_s i_{s\beta}}{L_s} + \frac{k_r}{L_s T_r} \Psi_{r\beta} + \frac{k_r}{L_s} p w_{\text{пот}} \Psi_{r\alpha}, \\ \frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} = k_r r_r i_{s\alpha} - \frac{\Psi_{r\alpha}}{T_r} - p w_{\text{пот}} \Psi_{r\beta}, \\ \frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} = k_r r_r i_{s\beta} - \frac{\Psi_{r\beta}}{T_r} - p w_{\text{пот}} \Psi_{r\alpha}, \\ \frac{du_{s\alpha}}{dt} = \frac{r_H (i_{c\alpha} - i_{s\alpha})}{C}, \\ \frac{du_{s\beta}}{dt} = \frac{r_H (i_{c\beta} - i_{s\beta})}{C}, \\ \frac{dw_{\text{пот}}}{dt} = \frac{k_r}{J_{AG}} (\Psi_{r\alpha} i_{s\beta} - \Psi_{r\beta} i_{s\alpha}), \end{cases} \quad (36)$$

где $k_r = X_m / X_r$ – параметр отношения реактивного сопротивления магнитной

ветви к реактивному сопротивлению ротора;

$T_r = X_r / R_r$ – относительный параметр реактивного сопротивления к

активному;

r_n – сопротивление нагрузки.

В общем случае при переменной частоте вращения требуется учитывать момент инерции ротора асинхронной машины и приводного механизма. Считая частоту вращения ротора электрической машины постоянной, можно сделать допущение, позволяющее не использовать момент инерции для описания электромеханической системы генерирования электроэнергии.

Результаты решения системы ДУ применительно к асинхронному двигателю и генератору позволяют оценить переходные режимы при вариации параметров АМ и емкости батареи конденсаторов, приведены в ПРИЛОЖЕНИЯХ 1,2.

2.3.4 Математическая модель полупроводниковых преобразователей

Трехфазные мостовые управляемые шестиключевые полупроводниковые преобразователи энергии являются основным видом промышленных частотных преобразователей. Данный вид преобразователей в общем случае стоит рассматривать как частный случай преобразователя с гораздо более высокой пульсности.

Описание работы АГ с инверторным возбуждением (рисунок 2.9.) через систему дифференциальных уравнений затруднительно из-за сложного нелинейного дискретного характера устройства. Для создания математической системы используют следующие допущения: вентили идеальные и полностью идентичные, интервал подачи импульсов на вентили симметричен, рабочий частотный диапазон не ограничен значениями верхней и нижней частоты полосы пропускания. Процесс “включения-выключения”, для упрощения математического представления, представляют в виде ломаной кривой разбитой на два линейных участка характеризующих время спада и время затягивания, при котором ток, соответственно, уменьшается до $0,1 I_{ном}$ и до нуля [4, 10-11, 134, 138].

Предложенная автором схема возбуждения АГ (рисунок 2.9) содержит двухзвенный частотный преобразователь, что позволяет считать систему возбуждения автономной при наличии напряжения в звене постоянного тока.

Математическое описание частотного преобразователя будет состоять из выражений токов вентилях, уравнений коммутации и межфазного напряжения.

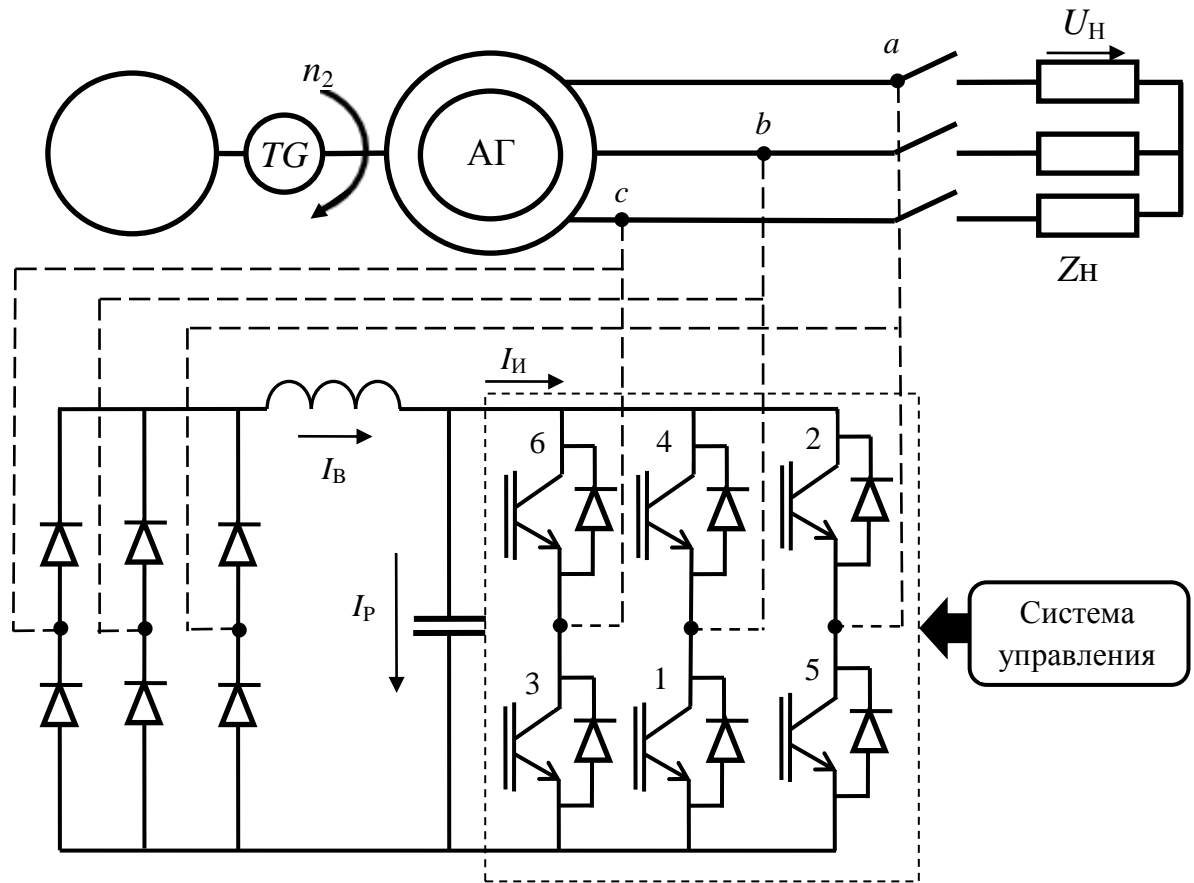


Рисунок 2.9. Схема АГ с возбуждением от полупроводниковых преобразователей

Токи вентилях связаны с токами фаз и выпрямленного значения следующим образом:

$$\begin{aligned}
 i_1 + i_3 + i_5 &= i_2 + i_4 + i_6 = i_p, \\
 i_a &= i_2 - i_5, \\
 i_b &= i_4 - i_1, \\
 i_c &= i_6 - i_3, \\
 i_a + i_b + i_c &= 0,
 \end{aligned}
 \tag{37}$$

где i_1, i_2, \dots, i_6 – токи ключей;

i_a, i_b, i_c – токи выходных фаз преобразователя;

i_p – значение постоянного тока на входе инвертора.

В зависимости от режима подачи импульсов на ключи возможны следующие варианты уравнений в момент коммутации (38). Аналогичные ДУ записываются для остальных интервалов повторяемости. В межкоммутационном интервале система описывается подобными уравнениями более высокого порядка:

$$\begin{aligned} L \frac{di_2}{dt} + L \frac{di_1}{dt} &= U_{ab} - U_0, \\ L \frac{di_2}{dt} + L \frac{di_3}{dt} &= U_{ac} - U_0. \end{aligned} \quad (38)$$

Спектральный диапазон переменного тока имеет сложный состав, включающий в себя высокочастотные гармоники. Определение данного спектра является сложной задачей, полученный результат в дальнейшем будет влиять на величину линейных напряжений в точке гармонического баланса. Этой задачей занимался Л.А. Кучумов, что отображено в работе “Использование метода гармонического баланса”.

Межфазное напряжение можно определить из состава спектра следующим образом:

$$\begin{cases} U_{AB} = \sum_{i=1}^k U_{ABi} \cos(k\omega T + \varphi_{ABi}), \\ U_{BC} = \sum_{i=1}^k U_{BCi} \cos(k\omega T + \varphi_{BCi}), \\ U_{CA} = \sum_{i=1}^k U_{CAi} \cos(k\omega T + \varphi_{CAi}), \end{cases} \quad (39)$$

где k – количество учитываемых гармоник.

Упрощение частотного спектра путем учета только основных гармоник приводит к дополнительной ошибке расчетов, что в совокупности с неточностью методов нахождения решения зачастую приводит к результатам далеким от истинного значения.

Возможен другой способ описания работы инвертора напряжения через двухосевую модель в неподвижной или вращающейся системе координат. Данную систему уравнений для полного соответствия физическому объекту необходимо

дополнить уравнениями выпрямителя и фильтров звеньев постоянного и переменного тока, уравнениями системы управления полупроводниковым преобразователем:

$$\begin{cases} f_{\alpha} = \frac{1}{2U_0} u_{\alpha}^*, \\ f_{\beta} = \frac{1}{2U_0} u_{\beta}^*, \\ i = \frac{3}{2} (i_{\alpha} f_{\alpha} + i_{\beta} f_{\beta}), \\ u_{\alpha} = u_i f_{\alpha}, \\ u_{\beta} = u_i f_{\beta}, \end{cases} \quad (40)$$

где U_0 – амплитуда напряжения опорного сигнала;

f_{α} (f_{β}) – функции коммутации ключей;

u_{α}^* (u_{β}^*) – задающие воздействия;

u_{α} (u_{β}) – усредненное выходное напряжение;

u_i – напряжение питания инвертора;

i_{α} (i_{β}) – значения выходного тока;

i – усредненный ток питания.

Некоторые параметры, определяющие режим работы, такие как напряжение звена постоянного тока, должны быть заданы независимо из-за числа уравнений. Избыточность в задании независимых переменных способствует ускорению итерационного процесса получения установившегося режима. Это, безусловно, является достоинством такого вида задания переменных, однако при этом повышается вероятность получения расходящегося решения [57, 87, 129, 130, 134-137].

Можно сделать вывод, что математическое описание частотного преобразователя для системы возбуждения АГ является сложной задачей, учитывающей помимо физических принципов работы, элементную базу, схему управления преобразователем и энергетические потери. Таким образом, система дифференциальных уравнений частотного преобразователя применима только

после настройки параметров учитывая характер нагрузки и функции перекоммутации, определяемые системой управления.

2.4 Определение условий самовозбуждения частотными методами

Определение условий самовозбуждения можно получить из частотных характеристик АГ, рассматривая его как электрическую цепь. Для получения передаточной функции и значения полного входного сопротивления требуется упростить первоначальную схему четырехполюсника (рисунок 1.3) до вида, представленного на рисунке 2.10:

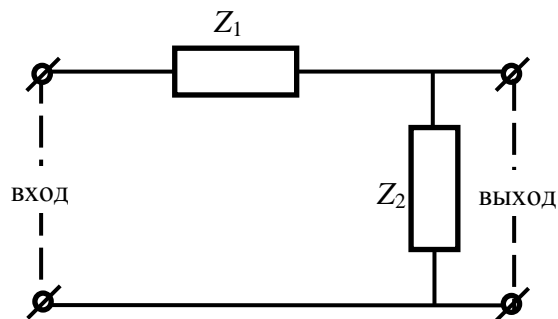


Рисунок 2.10. Преобразованная схема замещения АГ с емкостным возбуждением

В представленной схеме принято, что энергия, способствующая возбуждению, присутствует в роторе электрической машины. Первичная энергия может быть представлена в качестве остаточного намагничивания. Исходя из этого Z_1 - индуктивно-активное сопротивление ротора, Z_2 – приведенное сопротивление прочей схемы замещения. Данные значения определяются следующими выражениями:

$$Z_1 = \frac{r_r}{s(R_H)} + X_r, \quad (41)$$

$$Z_2 = \frac{(R_m + X_m i)(X_s i + r_s - \frac{R_H X_C i}{R_H - X_C i})}{R_m + X_m i + X_s i + r_s - \frac{R_H X_C i}{R_H - X_C i}}. \quad (42)$$

Повышение точности анализа переходных процессов требует учитывать функцию скольжения генератора $s(R_H)$ от величины нагрузки, влияющей на качество переходного процесса, время нарастания колебаний, значения установившейся амплитуды и частоты напряжения и т.д. Данная корреляция была определена автором из обратной зависимости полного сопротивления нагрузки $R_H(s)$ от значения скольжения, представленной в Лиценко А.И. “Асинхронные машины с массивным ферромагнитным ротором” [84]. Полученная функция:

$$s(R_H) = - \frac{R_s (R_H - \sqrt{R_H^2 - 4X_s^2 \cos\varphi_H} + 2R_r \cdot \cos\varphi_H)}{2(\cos\varphi_H \cdot R_r^2 + R_H \cdot R_r + \cos\varphi_H \cdot X_s^2)}, \quad (43)$$

где $\cos\varphi_H$ – коэффициент мощности нагрузки.

Для исследования переходных процессов необходимо оценить частотные характеристики, из которых возможно не только определить резонансную частоту, но и описать поведение схемы в широком диапазоне частот. Для этого требуется получить выражения реальной и мнимой частей амплитудно–фазовой частотной характеристики (АФЧХ), полного сопротивления и передаточной функции системы генерирования.

Входное сопротивление в данном случае будет выражаться как сумма слагаемых Z_1 и Z_2 :

$$Z_{vh} = Z_1 + Z_2 = \frac{R_s}{S_k} + X_s \cdot i - \frac{(R_m + X_m \cdot i) \cdot (R_H X_c - R_H X_r + X_r X_c \cdot i) \cdot i}{R_n (R_m - i(X_c + X_m + X_r)) - X_c (R_m \cdot i + X_r + X_m)} = \frac{U}{I} \cdot e^{i\varphi}. \quad (44)$$

Передаточная функция является отношением изображения по Лапласу выходной величины напряжения к изображению входной величины напряжения. Считая равным ток на входе и выходе представленной схемы (рисунок 2.10.), передаточную функцию можно понимать как отношение выходного сопротивления к входному:

$$W_{per} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{Z_2}{Z_{vh}}. \quad (45)$$

Выразив передаточную функцию через параметры схемы замещения, получим выражение представленное уравнением (46).

$$W_{пер} = \frac{(R_m + X_m \cdot i)(R_{нагр} X_c - X_r \cdot R_{нагр} + X_r X_c \cdot i)}{i \left(\frac{R_r}{S_k} - \frac{(R_m + X_m \cdot i) \cdot (R_{нагр} X_c - R_{нагр} X_1 + X_1 X_c \cdot i)}{R_n (R_m - i(X_c - X_m - X_r)) - X_c (R_m \cdot i + X_s + X_m)} + X_r \cdot i \right) X^*}, \quad (46)$$

$$\text{где } X^* = \left[R_{нагр} (R_m - i(X_c + X_s + X_m)) - X_c (R_m \cdot i_s - X_s - X_m) \right].$$

Анализ изучаемого объекта проведем из выражений действительной и мнимой частей приведенных функций Z_{vh} и $W_{пер}$, которые представляют собой сложные полиномы высокого порядка. Упрощенные выражения передаточной функции и входного сопротивления приведены в ПРИЛОЖЕНИИ 3. Расчёт действительной и мнимой частей входного сопротивления и передаточной функции АГ, работающего на индуктивно-активную нагрузку, требует большой вычислительной мощности и значительного времени вычисления. При этом расчет схемы в режиме холостого хода не представляет никаких трудностей. По этой причине, для получения требуемых выражений при работе АГ на нагрузку приходится пренебрегать значениями активного сопротивления статора и цепи намагничивания в представленной схеме замещения АД. Стоит отметить, что данное упрощение не вносит существенную погрешность в найденный результат.

Пересечение годографов с мнимой осью соответствует условию резонанса – условию баланса фаз. В этих точках пересечения фазовый сдвиг $\varphi = \arctan\left(\frac{Im}{Re}\right) = 0^0$, а это в свою очередь означает, что вносимая в контур и накопленная энергия синфазны, т.е. расход и поступление энергии происходит одновременно.

Исходя из этого, фазовый сдвиг будет отсутствовать в одном из случаев: мнимая часть равна нулю или действительная часть стремится в бесконечность. Из полученных кривых (см. рисунок 2.11. б) следует, что действительная часть не имеет разрывов первого и второго рода. Таким образом, фазовый сдвиг будет отсутствовать только при достижении величины мнимой части функций Z_{vh} и $W_{пер}$ нулевого значения.

Отметим, что при анализе математических выражений используется величина угловой частоты ω , в то время как напряжение выражается в единицах линейной частоты f . Данную особенность необходимо учитывать при построении графиков, переводя угловую частоту к линейной известным соотношением: $f = \omega/2\pi$.

В качестве примера, показывающего громоздкость полученных выражений, в ПРИЛОЖЕНИИ 4 приведены выражения комплексных частей входного сопротивления. Данные зависимости получены при указанных выше упрощениях модели. Выражения действительной и мнимой части передаточной функции не приведены в работе из-за избыточной громоздкости, не позволяющей математическому пакету *Mathcad* вывести их на экран, но дающего возможность использования полученного символьного результата в дальнейших вычислениях.

Оценка полученных результатов была проведена для асинхронного генератора на базе асинхронной машины АИР160S4. Параметры схемы замещения приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Параметры схемы замещения АГ на базе асинхронной машины АИР160S4

Мощность P_l , кВт	R_s , Ом	R_r , Ом	$L_s = L_r$, Гн	R_m	L_m , Гн	C , мкФ
15	0.2761	0.1645	0.00219	0	0.07614	400

Приведем графики полученных выражений действительной и мнимой частей от частоты (рисунок 2.11). Из полученных характеристик Z_{vh} следует, что условие баланса фаз будет выполняться в окрестностях двух точек пересечения с мнимой осью. Первая точка пересечения с координатами (103; 0) получена на частоте $f_1 = 28$ Гц. Вторая точка пересечения с мнимой осью имеет координаты (13,8; 0) на частоте $f_2 = 127$ Гц. По зависимости действительной части входного сопротивления видно, что происходит резонанс второго рода, так как колебания сначала нарастают быстрее, затем медленнее.

Следует отметить, что явление резонанса проявляется в окрестности минимума мнимой части, кроме этого в первой точке пересечения действительной оси наблюдается максимум действительной части входного сопротивления, при этом данные значения тем ближе, чем больший вклад вносит емкостная составляющая.

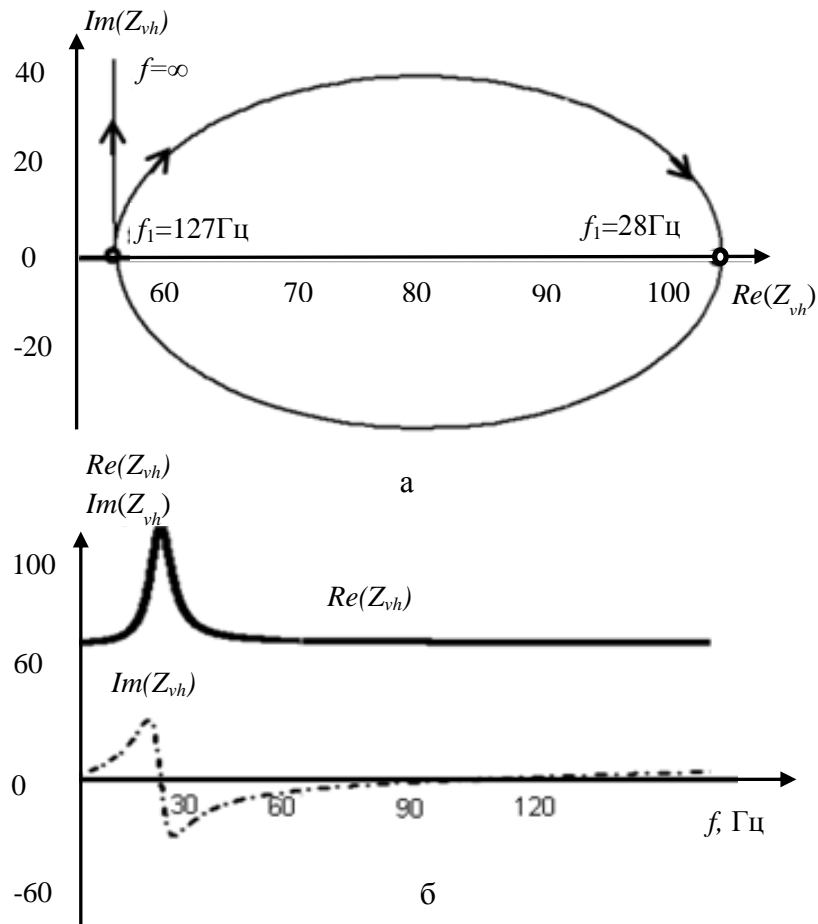


Рисунок 2.11. Частотные характеристики Z_{vh} : а – годограф (АФЧХ) полного входного сопротивления, б – действительной и мнимой части

Смещение большой оси полученного годографа (пунктирная линия на рисунке 2.12) возможно только в положительном направлении оси мнимой части входного сопротивления при уменьшении емкости возбуждающего конденсатора на фазу. При выборе конденсатора с емкостью меньше на 40 % от указанной в таблице 2.5, годограф полного сопротивления примет вид (рисунок 2.12).

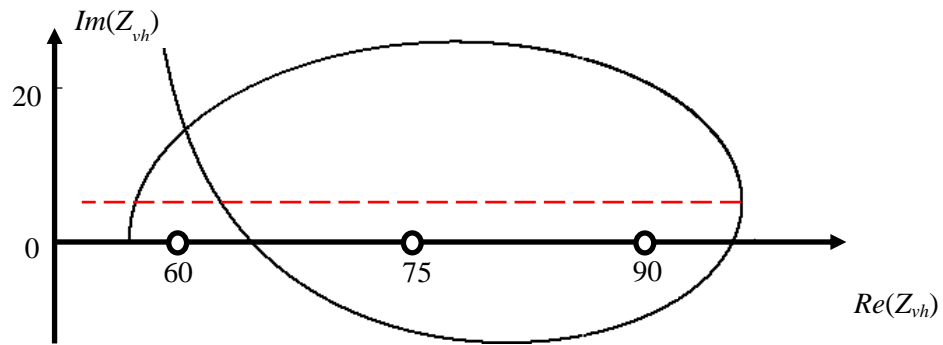


Рисунок 2.12. Частотные характеристики Z_{vh} при минимально возможном для самовозбуждения значении емкости конденсатора

Уменьшение емкости батареи конденсаторов приводит к увеличению частот точек пересечения годографа с осью, характеризующей действительную часть входного сопротивления, на величину изменения квадратного корня, что полностью соответствует физическому процессу резонанса.

Основной особенностью частотных характеристик входного сопротивления является то, что действительная часть входного сопротивления имеет ненулевую величину при воздействии на частоте $f = 0$ Гц. Это стоит понимать как то, что схема имеет некоторое значение импеданса на постоянном токе, базирующееся на активном сопротивлении электрических ветвей. Дальнейший рост связан с увеличением вклада индуктивного сопротивления намагничивающего контура, линейно зависящего от частоты тока (напряжения) $X_L = i\omega L$, последующее уменьшение мнимой части входного сопротивления определяется влиянием величины емкостного сопротивления $X_C = 1/i\omega C = -i/\omega C$ батареи конденсаторов.

Отличительной особенностью частотных характеристик передаточной функции является нулевое значение действительной части, что характеризует недопустимость работы асинхронной машины на постоянном токе. Оценка частот самовозбуждения по характеристикам передаточной функции $W_{пер}$ (рисунок 2.13) соответствует результату аналогичному для частотных характеристик входного сопротивления: имеется две точки пересечения действительной оси на частотах 28 Гц и 127 Гц.

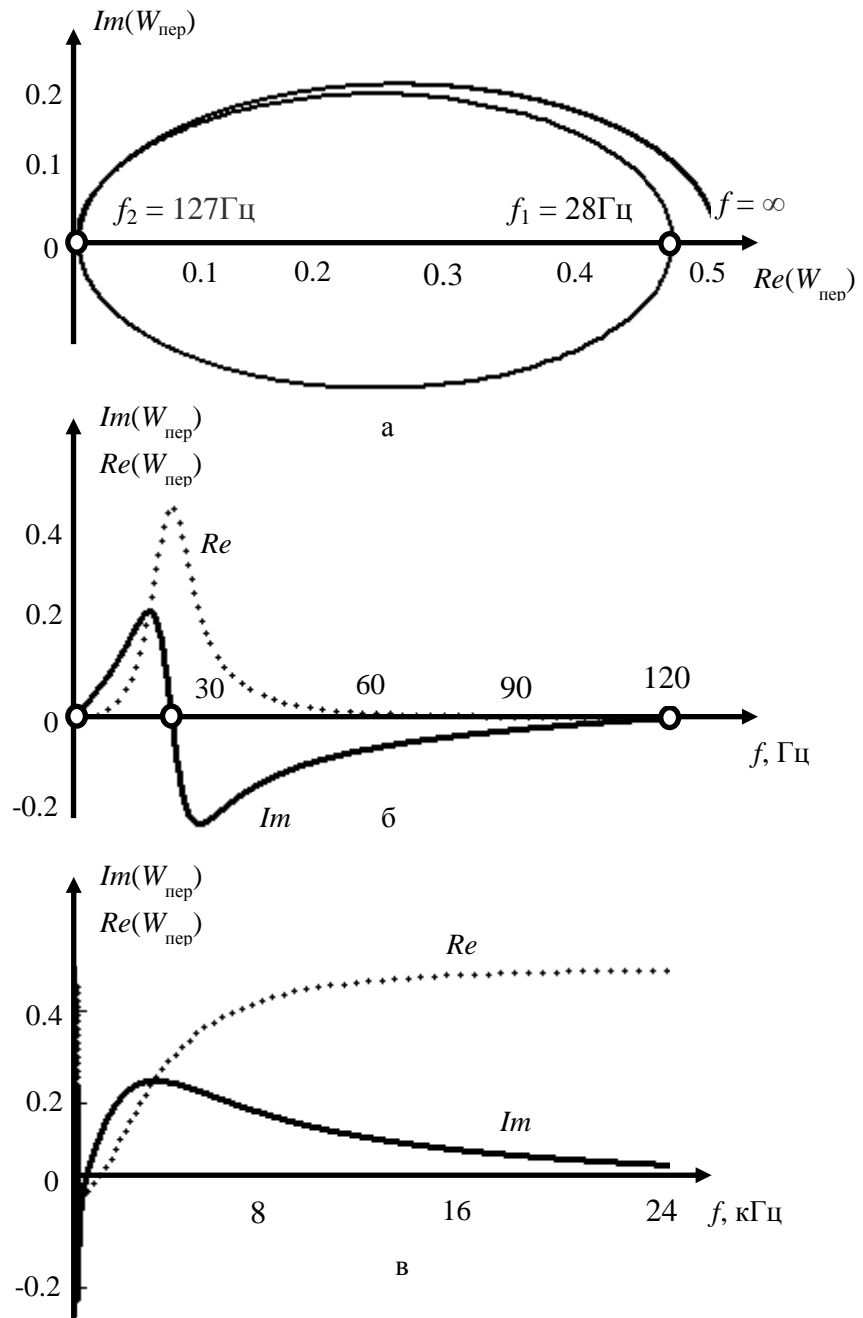


Рисунок 2.13. Частотные характеристики $W_{\text{пер}}$:

а – годограф передаточной функции, б – действительная и мнимая часть $W_{\text{пер}}$,
в - действительная и мнимая часть $W_{\text{пер}}$ в высокочастотном диапазоне

При $w \rightarrow \infty$ годограф приближается к третьей точке пересечения с действительной осью, но не достигнет ее, значение действительной части будет стремиться к величине $1/2$, что связано с индуктивностями на входе и выходе преобразованной схемы, которые будут представлять собой бесконечные сопротивления. Помимо этого, пересечение действительной и мнимой частей

происходит вблизи точки перегиба, что характерно для явления параметрического резонанса. Требуемое условие кратности изменения реактивного элемента в два или четыре раза относительно базовой частоты выполняется, поскольку в асинхронной машине частота изменения взаимоиндуктивностей обмоток статора и ротора равна удвоенной частоте вращения ротора при малой величине скольжения.

Таким образом, оба способа определения возможных частот самовозбуждения из входного сопротивления и передаточной функции дают одинаковые результаты, что говорит: во-первых, о верности используемых методов; во-вторых, свидетельствует о характерных особенностях для феномена резонанса. Так как классический резонанс не возможен в силу отсутствия вынуждающего источника ЭДС, то данная часть исследования является доказательством того, что параметрический резонанс стоит считать причиной феномена самовозбуждения.

Наличие нескольких точек, в которых выполняется условие баланса фаз, поднимает задачу определения точки пересечения с наиболее устойчивым процессом нарастания колебаний и задачу определения значимости факторов на значение полученной частоты самовозбуждения. Исходя из графиков действительной и мнимой части, можно однозначно утверждать, что резонанс возможен только в окрестности первой точки пересечения действительной оси. Это заключение можно сделать из того, что вторая точка пересечения действительной оси будет иметь малое действительное значение передаточной функции, пассивно указывая на низкое значение добротности в данной точке. Третья точка, исходя из физических принципов, не способна обеспечить коэффициент обратной связи больше единицы, т.к. на частотах в сотни кГц основное падение напряжения будет происходить на индуктивных сопротивлениях электрической машины, коэффициент петлевого усиления по обратной связи будет гораздо меньше единицы. Кроме этого для получения таких высоких частот, потребовалась бы частота вращения ротора, превышающая на несколько порядков номинальное значение, при этом возникал бы вопрос обеспечения механической прочности конструктивных элементов.

На процесс самовозбуждения влияет множество факторов, наиболее признанным остается величина остаточного намагничивания ротора. Однако в представленных моделях даже при отсутствии остаточного магнитного потока, но при наличии энергии на любом этапе преобразования, наблюдается процесс самовозбуждения до такой же величины ЭДС, как при его наличии, что согласуется с экспериментальными результатами, представленными А.В. Нетушил в работах [97-98].

Все же возбуждение АГ, как и прочих систем генерирования, невозможно без присутствия первоначальной электромагнитной энергии в каком-либо виде, например, напряжении на конденсаторе, остаточном магнитном потоке ротора, внешних пульсациях магнитного поля и т.д. Величина этой энергии сказывается на времени и характере протекания переходных процессов. Значимыми факторами для возникновения процесса возбуждения являются конструктивные особенности электрической машины, в том числе материал ротора. Наличие магнитных материалов позволяет обеспечить гарантированное возбуждение АГ. Однако обязательными факторами можно назвать частоту вращения ротора, превышающую номинальное значение, для получения напряжения соответствующей частотой, и величину нагрузки не превышающую предельное значение. Предельная величина нагрузки определяется величиной фазной емкости батареи конденсаторов.

Выражения, позволяющие определить резонансные частоты, были определены из числителей мнимой части входного сопротивления и передаточной функции. Несмотря на то, что знаменатель $Im(Z_{vh})$ и $Im(W_{пер})$ представляет собой полином с большим количеством высокостепенных слагаемых (см. ПРИЛОЖЕНИЯ 4, 5), выражения частот точек пересечения с мнимой осью имеют следующий вид:

$$\begin{cases} f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{C \cdot L_m}}, \\ f_2 = \frac{L_m + L_s + L_r}{2\pi\sqrt{C \cdot L_m^2 (L_s + L_r)}}. \end{cases} \quad (47)$$

Приняв за основу, в виду большей устойчивости процесса возбуждения, первую точку пересечения с действительной осью, выходит, что частота определяется емкостью возбуждения и взаимоиндуктивностью ротора и статора. Возбуждение при этом определяется резонансом в последовательном контуре $C - L_m$. Вторая точка соответствует резонансу гораздо более сложного вида в параллельно-последовательном контуре $C - L_{\text{общ}}$, индуктивность которого определяется эквивалентной Т-образной схемой замещения.

В уравнениях (3) было представлено, что добротность колебательного контура является значимым фактором, влияющим на самовозбуждение АГ. Известно, что величина добротности сказывается на кривой роста резонанса, чем больше добротность, тем круче рост и наоборот. Добротность первой точки пересечения будет рассчитываться как для схемы последовательного резонансного контура (рисунок 1.2), добротность второй точки определяется как для параллельно-последовательного контура.

Для АГ, работающего на холостом ходу, с параметрами, приведенными в таблице 2.5, добротность в точках пересечения составит: $Q_1 = 50,7$ и $Q_2 = 0,084$. Это в свою очередь означает, что резонанс во второй точке возможен при относительном изменении реактивного параметра элемента (индуктивности или емкости) в 37,4 раза. В то время как для первой точки пересечения с действительной осью будет достаточно небольшого относительного изменения в 0,062 раза. Оценка условий возбуждения для представленных точек дает возможность понять, что явление самовозбуждения стоит рассматривать в окрестности только первой точки пересечения годографа с действительной осью.

2.5 Выводы по главе

Анализируя возможные методы исследования переходных и стационарных режимов работы асинхронного генератора, можно сделать следующие выводы:

1. Для электромеханических систем генерирования, содержащих асинхронные машины и нагрузку емкостного типа, возникает необходимость исследования переходного процесса режима самовозбуждения, в некоторых случаях неконтролируемый процесс самовозбуждения может негативно сказываться на протекании рабочего процесса и надежности эксплуатации устройств.
2. Получение достоверных результатов моделирования возможно только при учете насыщения магнитной цепи. Требуется располагать действительной кривой намагничивания, исключается принятие прямолинейной магнитной характеристики. Помимо этого необходимо учитывать характер нагрузочного сопротивления и изменение сопротивления взаимной индукции, определяемое магнитным состоянием, влияющее на стационарный режим работы генератора.
3. Малые пределы изменения величины скольжения, генерируемое напряжение на частоте свободных колебаний и прочие характерные признаки резонанса, такие, как пересечение действительной и мнимой части вблизи точки перегиба, свидетельствуют о резонансной природе самовозбуждения асинхронного генератора. Отсутствие внешнего источника ЭДС, позволяет утверждать, что явление самовозбуждения АГ обусловлено феноменом параметрического резонанса.
4. Амплитуда и частота выходного напряжения могут быть определены из эквивалентной электрической схемы замещения. Частота определяется реактивными параметрами асинхронной машины и конденсаторной батареи возбуждения. Амплитуда, помимо этого, зависит от величины активных сопротивлений электромеханического преобразователя и нагрузки. Предложена методика, основанная на частотном анализе передаточной

функции и полного сопротивления, позволяющая определить устойчивость работы СГЭЭ в различных режимах работы.

5. Используемые методы проектирования дают схожие результаты, что говорит о верном подходе изучения объекта исследования. Применительно к генераторам постоянного тока и асинхронным генераторам, анализ процесса самовозбуждения приводит к идентичным формам математических выражений и аналогичным физическим условиям самовозбуждения, что говорит об общности явления генерирования электроэнергии в различных типах электрических машин. Прочие системы генерирования с самовозбуждением, построенные на синхронных машинах с постоянными магнитами, синхронно-гистерезисных машинах и прочих типах электрических машин, также могут быть изучены данным методом.
6. Анализ дифференциальных уравнений и частотных характеристик позволяет определить необходимые условия для возбуждения АГ и решить задачу о величине критической нагрузки. Исследование процесса и определение условий самовозбуждения, позволяет выявить оптимальные режимы регулирования амплитуды и частоты генерируемого напряжения при использовании возбуждающих полупроводниковых устройств.

ГЛАВА 3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО РЕЗОНАНСА И МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЫ С АСИНХРОННОЙ МАШИНОЙ И ИНВЕРТОРНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

3.1 Параметрический резонанс асинхронных генераторов

Для возникновения любого вида резонанса необходимо наличие колебаний определенной частоты, но параметрический резонанс не нуждается в постоянном наличии внешнего источника переменного сигнала. Появление синусоидального сигнала объясняется простым физическим явлением. Как известно, в индуктивно-емкостном контуре происходит свободный процесс перекачивания запасённой энергии из емкости в индуктивность и наоборот, при этом часть электромагнитной энергии расходуется в активном сопротивлении, преобразуясь в тепло. Присутствием потерь объясняется затухающий закон изменения тока (48) и напряжения в неизменяемом резонансном контуре, частота которых соответствует собственным колебаниям.

$$i = I_m e^{-Kt} \cos(\omega_c t), \quad (48)$$

где ω_c – частота свободных колебаний, K – коэффициент затухания.

При условии статичного контура процесс колебаний всегда несет затухающий характер, скорость затухания зависит от величины тока в активной нагрузке. Если же реактивные элементы изменяются во времени по периодическим законам, то колебания могут быть как нарастающими, так и затухающими в зависимости от коэффициента затухания, определяемого активным сопротивлением. Явление параметрического резонанса зависит от глубины модуляции реактивных элементов, наиболее сильное проявление происходит при скачкообразном изменении емкости или индуктивности [29-33].

Из математического анализа были получены условия возникновения параметрического резонанса, из которых следует, что для обеспечения нарастающего характера колебаний изменение индуктивности или емкости должно

быть больше величины линейно зависящей от параметра реактивного элемента и обратно пропорциональной добротности [24]:

$$\Delta C > \frac{\pi \cdot C}{Q}, \Delta L > \frac{\pi \cdot L}{Q}. \quad (49)$$

Во второй главе было определено, что для резонанса в первой точке пересечения годографа с действительной осью при добротности $Q = 50,7$ необходимо и достаточно периодического изменения реактивных элементов на 6,2%.

Причиной изменений реактивных параметров асинхронных машин является пульсация магнитного поля, связанная с конструктивными особенностями статора. Высота зубцов, материал клиньев паза и прочие особенности проектирования АМ оказывают воздействие на направление и значение магнитной индукции, потока.

На рисунке 3.1 приведено изображение распределения векторов магнитной индукции асинхронной машины, при использовании наиболее часто применяемого диэлектрического клина. Приведенный результат получен с помощью программы *Elcut 5.1*, использующей метод конечных элементов.

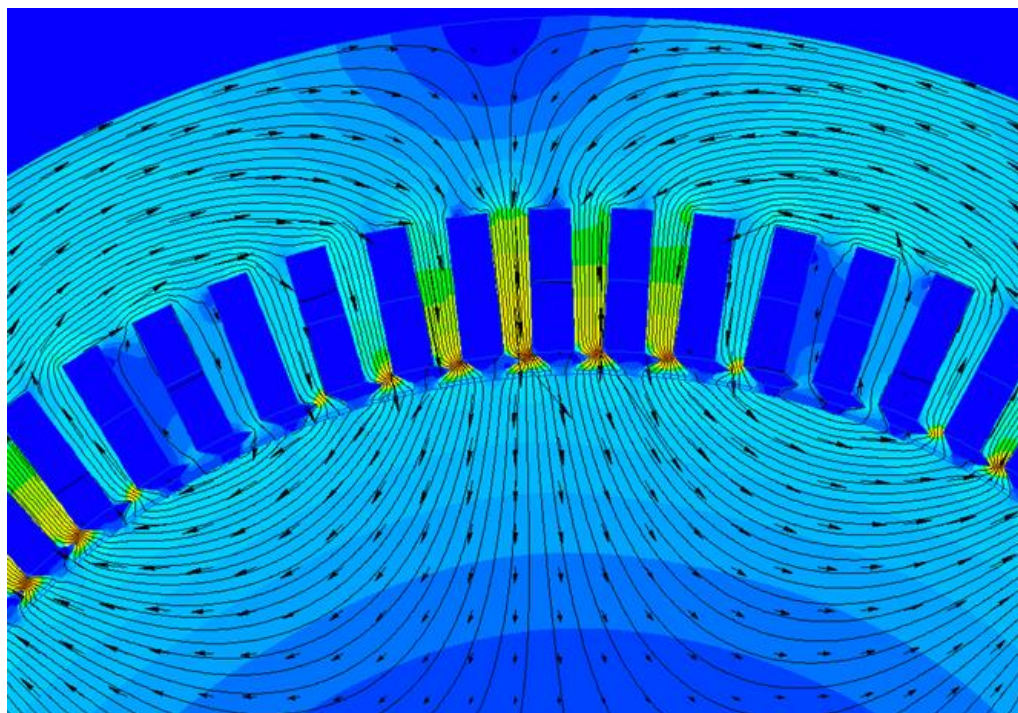


Рисунок 3.1. Векторы магнитной индукции асинхронной машины

На рисунке видно, что магнитное поле не проходит через клин. Вектор индукции замыкается, проходя через ярмо статора, зубцы, воздушный зазор, ротор. При этом самая насыщенная часть – это зубец статора в месте расположения диэлектрического клина. Индукция в зубце статора имеет максимальное значение.

Детальный анализ магнитной индукции возможен после построения графика индукции по радиальной длине воздушного зазора (длине внутренней расточки статора). Полученный результат представлен на рисунке 3.2. На графике видны пульсации магнитной индукции, величина которых в среднем составляет 0,4 Тл, в относительном виде это соответствует значению 28,5 % от общей пульсации. Направление векторной величины определяет знак индукции.

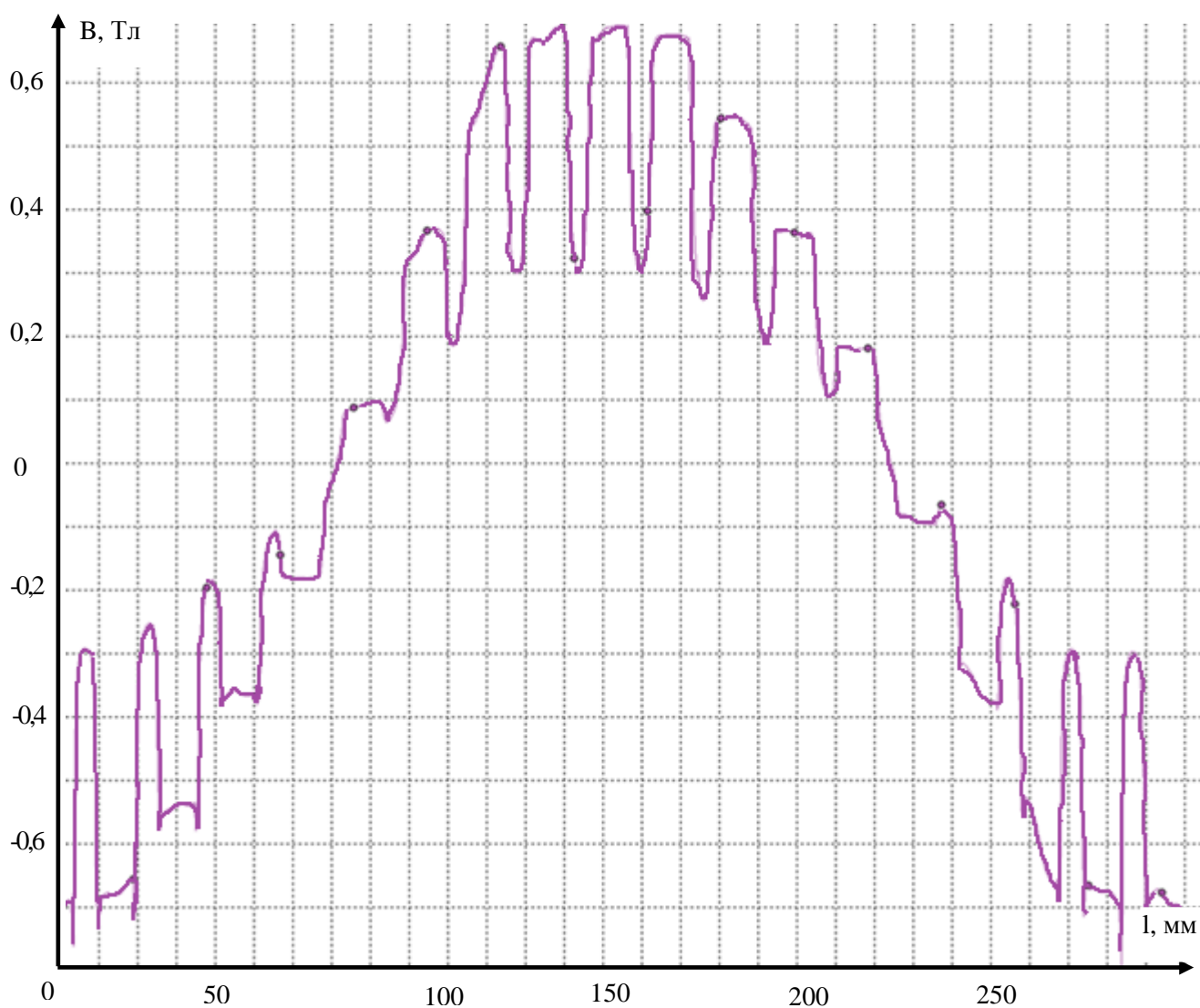


Рисунок 3.2. Магнитная индукция АМ по радиальной длине воздушного зазора

Представленное изменение индукции будет влиять на значение индуктивности следующим образом: пульсирующий характер магнитной индукции связан с величиной магнитного потока, пропорционально зависящего от значений индукции, площади поверхности S и угла α между нормалью и плоскостью контура: $\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha$. Индуктивность можно определить через отношение созданного магнитного потока к значению протекающего тока:

$$L = \frac{\Phi}{I} = \frac{B(I) \cdot S \cdot \cos \alpha}{I}. \quad (50)$$

Возбуждение от полупроводникового преобразователя вносит дополнительные периодические пульсации, связанные с процессом коммутации силовых ключей. Все это свидетельствует о том, что асинхронную машину необходимо считать объектом с периодически изменяемыми параметрами. Асинхронный генератор с преобразователями частоты имеет параметры, изменяемые по сложному периодическому закону. Наличие резонансного контура с периодически изменяемыми параметрами дает возможность рассматривать процесс возбуждения как явление параметрического резонанса.

Исходя из влияния амплитуды изменения индуктивности электрической машины следует, что более выраженные пульсации в большей мере способствуют процессу параметрического возбуждения АГ. Переход в генераторный режим машины с высокой степенью пульсации магнитной индукции более вероятен, чем машины с низкой пульсацией. Подбор фазных емкостей, и как следствие величина реактивной энергии, требуемых для возбуждения определяется необходимой добротностью цепи “асинхронная машина - схема возбуждения” из условия (49). Однако использование машины с высокой пульсацией магнитной индукции скажется на качестве генерируемого напряжения и параметрах характеризующих энергоэффективность генераторной установки. Электрическая машина с меньшей величиной индуктивности при значительном значении пульсации магнитной индукции потребует большей добротности колебательного контура для колебательного процесса с нарастающей амплитудой [103].

3.1.1 Моделирование параметрического резонанса

Изложив толкование причин изменения индуктивности асинхронной машины, промоделируем процесс параметрического резонанса. В качестве параметров колебательного контура используем данные АГ на базе АИР160S4 из таблицы 2.5. Преобразуем Т-образную схему замещения (рисунок 1.3.) применительно к случаю работы асинхронного генератора с емкостным возбуждением на холостом ходу. Исходя из полученных выражений (47), анализ параметрического резонанса стоит рассматривать в контуре $L_m - C$, связующим звеном между указанными параметрами является ветвь статора. Наличие данной ветви не скажется, в значительной мере, на значении частоты собственных колебаний полученного контура. Однако присутствие активного сопротивления в схеме позволяет учитывать факт преобразования энергии на активном сопротивлении в тепло, что в итоге обеспечивает стабилизацию амплитуды колебаний.

Как принятое допущение, упразднена ветвь ротора по причине $s \approx 0$, при котором сопротивление ротора $\lim_{s \rightarrow 0} R_2/s = \infty$ можно считать разрывом. Предложенный вариант схемы приведен на рисунке 3.3. В качестве первичного источника энергии может выступать заряженный конденсатор или остаточная намагниченность, но даже при полном отсутствии в контуре энергии процесс резонанса становится возможным за счет внешних флуктуаций магнитного поля. Для моделирования явления параметрического резонанса конденсатор C имел заряд 1 В.

Периодически изменяемым параметром колебательного контура выступает индуктивность намагничивания. Изменение индуктивности происходит под действием коммутации ключа. Ключ в положении “разомкнуто” соединяет номинальное значение индуктивности намагничивания L_m с индуктивностью L_{m2} , отвечающей за отклонение итогового значения от номинальной величины, через большое сопротивление (100 МОм). В таком положении ветвь индуктивности L_{m2} отделена от прочей схемы, и происходят свободные колебания в контуре $L_m - C$.

Положение ключа “замкнуто” характеризует соединение индуктивностей L_m с L_{m2} через малое сопротивление (1 нОм). Таким образом, получая параллельное соединение индуктивностей, общее значение которого будет определяться выражением:

$$L_{\text{общ}} = \frac{L_m \cdot L_{m2}}{L_m + L_{m2}} \quad (51)$$

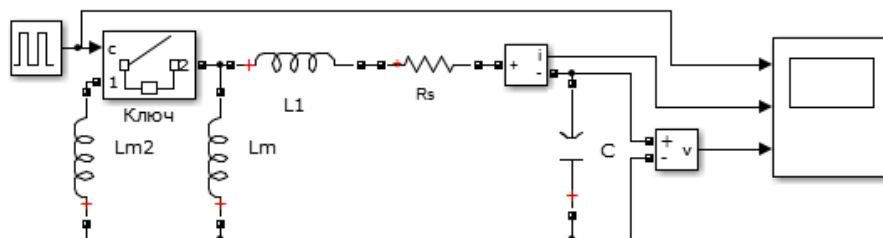


Рисунок 3.3. Модель схемы замещения АГ с емкостным возбуждением на холостом ходу

Для представления параметрического резонанса была выбрана величина изменения индуктивности 20 %. Это значение соответствует необходимой вариации в 6,2 % и не превышает относительную величину пульсаций индукции. Уменьшение значения индуктивности $L_m = 0,07614$ Гн на 20 % требует коммутацию в четыре раза большей индуктивностью $L_{m2} = 0,30456$ Гн. Изменение индуктивности должно происходить при максимальной запасенной энергии, максимальном магнитном потоке. Возможно несколько вариантов коммутации индуктивности: два, четыре раза за период (рисунок 3.4) и прочие четные. В каждом из вариантов энергия в контуре будет увеличиваться два раза за период в момент максимума индуктивной энергии за счет уменьшения величины индуктивности. В точках, где энергия равна нулю, изменение индуктивности не вносит энергии в контур, а лишь создает возможность для большего ее накопления через четверть периода. Коммутация при больших кратностях частоты также может приводить к параметрическому резонансу, но будет менее эффективна.

Кроме частоты коммутации на резонансное явление оказывает воздействие скважность – величина классифицирующая отношение периода следования к длительности импульса.

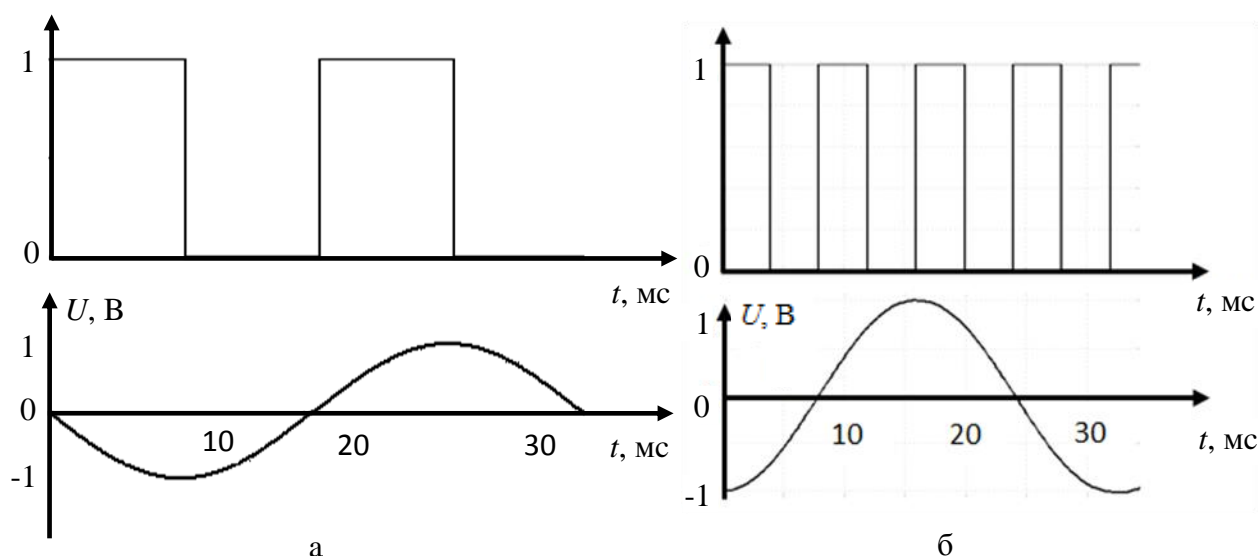


Рисунок 3.4. Графики зависимости от времени переключения ключа и напряжения:

а - коммутация два раза за период, б – коммутация четыре раза за период

В виртуальном эксперименте было выбрано наиболее оптимальное значение $S = 50\%$ (рисунок 3.4 а). Меньшая или большая величина скважности приводит к уменьшению амплитуды установившегося значения напряжения и росту времени нарастания колебаний. Наиболее сильно на данный эффект резонанса воздействует периодическое совпадение моментов коммутации ключа с достижением нулевого значения и экстремума напряжения. Наличие рассогласования частот собственных колебаний и частоты изменения индуктивности приводит к нелинейному пульсирующему росту колебаний.

Моделирование параметрического резонанса дает результат, представленный на рисунке 3.5, при условиях: двойной кратности частоты коммутации ключа к частоте собственных колебаний, первичном напряжении на конденсаторе в 1 В, скважности управляющего сигнала $S = 50\%$ и т.д. Прирост энергии будет происходить до момента равенства энергий, вкладываемой за период и преобразующейся в тепло на активном сопротивлении. Из рисунка видно увеличение амплитуды напряжения до значения $U = 86$ В. Полученное

ограничение роста напряжения связано с рассеянием энергии в тепло. В реальной генераторной установке ограничение роста напряжения будет связано с насыщением магнитной системы асинхронной машины.

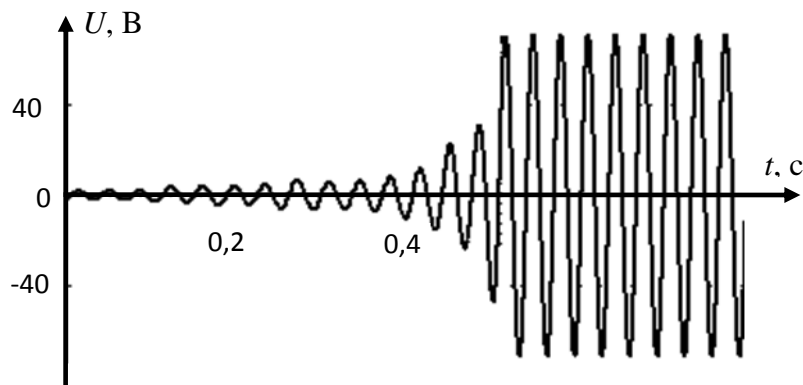


Рисунок 3.5. График зависимости напряжения от времени при параметрическом резонансе

В совокупности с наведением ЭДС вращения, выходное значение напряжения будет значительно выше, т.к. помимо резонансного роста будет обусловлено наведением ЭДС за счет изменения магнитного потока.

Частота полученного синусоидального сигнала соотносится с частотой колебаний определяемой выражением (47) для первой точки пересечения АФЧХ с мнимой осью (из рисунков 2.10, 2.12) и составляет $f \approx 28$ Гц. Таким образом, полученные математические выражения подтверждаются моделированием, выполненным в среде *MatLab Simulink*. Процесс возбуждения во второй точке пересечения с действительной осью является неустойчивым, колебания всегда имеют затухающий характер [103].

Стоит отметить существенное влияние выбора метода нахождения решения на полученный результат. Расчет с использованием элементов высокого порядка не всегда приводит к достижению заданной степени точности решения и сходимости полученного решения. Большое значение на верность найденного решения и вид полученного графика влияет метод расчета.

Как известно *Matlab* предлагает следующие методы решения:

- одношаговый метод Рунге-Кутты 4-го и 5-го порядка (*ode45*), рекомендуемый для решения дифференциальных уравнений;
- одношаговые явные методы Рунге-Кутты 2-го и 3-го порядка (*ode23*), используется при низких требованиях к точности, этот метод дает выигрыш в скорости решения относительно *ode45*;
- адаптивный многошаговый метод Адамса-Башворта-Мултона переменного порядка (*ode133*);
- многошаговый метод численного дифференцирования переменного порядка (*ode15s*);
- одношаговый метод, использующий модифицированную формулу Розенброка 2-го порядка (*ode23s*);
- неявный метод Рунге-Кутты, использующий формулы обратного дифференцирования 2-го порядка (*ode23tb*);
- метод трапеций с интерполяцией (*ode23t*).

Выбор неоптимального метода приводит к большому времени расчета и/или неверным результатам, причиной этого часто служит ошибка округления. Для получения схожих результатов необходимо вручную устанавливать шаг расчета, допустимое округление и прочие параметры. К решаемой задаче не подходят адаптивные методы решения и методы Рунге-Кутты, рекомендуется использовать метод трапеций с интерполяцией *ode23t*. Этот метод дает хорошие результаты при решении задач, описывающих осцилляторы с почти гармоническим выходным сигналом. Использование прочих методов решения приводит к результатам не согласующимся с физическими принципами характерными колебательному контуру.

3.2 Определение требуемой емкости и мощности при конденсаторном возбуждении АГ

При классическом типе возбуждения, когда источником реактивной энергии выступает батарея конденсаторов, запасенная энергия блока возбуждения описывается следующим выражением:

$$P_c = \frac{CU^2}{2} = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C}. \quad (52)$$

где U – рабочее напряжение, В;

q – заряд между пластин конденсатора, Кл;

C – емкость конденсатора, Ф.

Для расчета реактивной мощности более известна и часто встречается в литературе формула, имеющая следующий вид:

$$P_c = 0,314 \cdot U^2 C. \quad (53)$$

Величинами, определяющими мощность, являются значения напряжения на конденсаторе и его емкость. Выражая напряжение через значение заряда на пластинах, можно получить прочие виды зависимостей. Однако наиболее привычной и удобной формой является функция, включающая в себя квадратичную зависимость от напряжения и линейную зависимость от величины емкости.

Исходя из полученных во второй главе выражений, можно оценить требуемую величину емкости конденсатора в зависимости от скорости вращения ротора электрической машины. С одной стороны частота генерируемой электроэнергии определяется фазной емкостью и индуктивностью намагничивающего контура АМ и определяется выражением (47).

С другой, исходя из зависимости частоты вращения ротора асинхронной машины, частота питающего или генерируемого напряжения определяется как:

$$f = \frac{p \cdot n}{60 \cdot (1 - s)}. \quad (54)$$

Приняв, что приведенные выражения равны между собой, можем выразить значение емкости:

$$C = \frac{3600(1-s)^2}{4\pi^2 p^2 n^2 L_m} . \quad (55)$$

Из предложенной формулы расчета величины фазной емкости конденсатора следует, что данное значение кроме индуктивного сопротивления намагничивающего контура также зависит от числа пар полюсов и скорости вращения ротора, но проверка проводилась из условия, что частота вращения ротора близка и немного превышает синхронную частоту. Полученное выражение дает результаты схожие со значениями, полученными эмпирическим путем. Для асинхронной машины АИР160S4 (таблица 2.5.) для самовозбуждения на холостом ходу понадобится фазная емкость в 118 мкФ, наиболее подходящее значение из номинальных рядов емкостей конденсаторов 120 мкФ. Выбор значения, превышающего расчетную величину, позволяет работать АГ на активную нагрузку не более 10 % от номинальной величины. Окончательный выбор фазной емкости батареи конденсаторов стоит производить исходя из максимальной величины и характера нагрузки АГ.

Эмпирическим путем автором определена форма зависимости емкости от величины коэффициента мощности при номинальной нагрузке:

$$C = \frac{900 \cdot (1-s)^2}{\pi^2 p^2 n^2 L_m (1 - \sin \varphi)} , \quad (56)$$

$$\text{где } \sin \varphi = \sqrt{1 - (\cos \varphi)^2} .$$

Поддержание постоянной частоты вращения на номинальном значении позволяет считать произведение $p^2 n^2$ константой, значение которой равно $p^2 n^2 = 9 \cdot 10^6$, что упрощает выражение (56) до вида:

$$C = \frac{(1-s)^2 \cdot 10^{-4}}{\pi^2 L_m (1 - \sin \varphi)} . \quad (57)$$

Индуктивность намагничивания L_m лежит в широком диапазоне от сотых до сотен Гн, чем меньше мощность, тем выше индуктивность намагничивания. Данная величина меняется во время работы в зависимости от насыщения стали электрической машины. Индуктивность намагничивания можно рассчитать по любой методике определения параметров схем замещения АМ, например [115, 127], или найти в справочных данных [80] и перевести из относительной величины в соответствующую размерность Гн. Значение индуктивности изменяется следующим образом (рисунок 3.6):

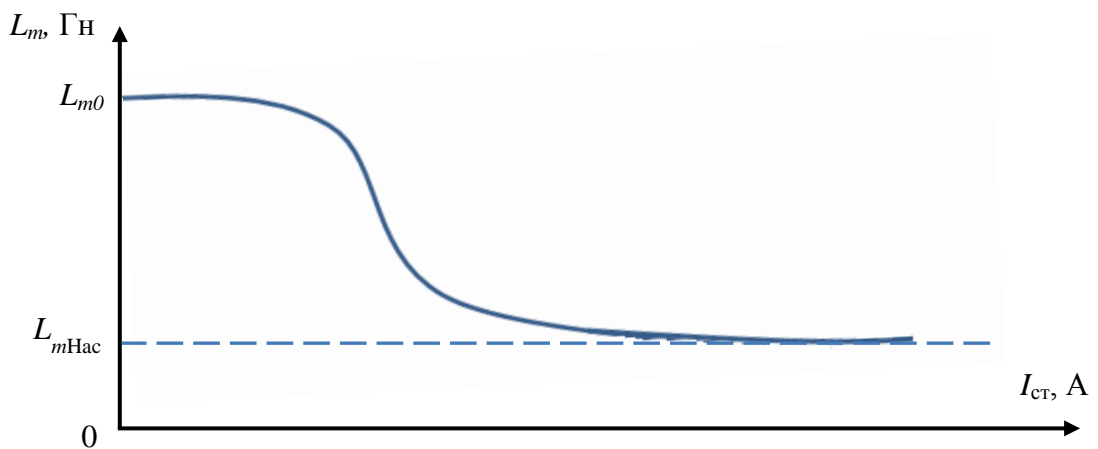


Рисунок 3.6. Зависимость индуктивности намагничивания от тока статора

Для проверки полученного выражения было проведено сравнение значения фазной емкости конденсатора, достаточного для самовозбуждения, найденное эмпирическим путем [50, 57, 81] и полученное из выражения (57). В расчете было принято, что скольжение равно 2 %, а индуктивность намагничивания была рассчитана для режима холостого хода и далее определена для номинального режима работы. Принятые допущения выбранной величины скольжения и метод расчета индуктивности намагничивания вводят некоторую погрешность, которая сказывается на итоговой сходимости результатов. Используемые допущения могут быть оправданы тем, что произведённое сравнение расчетных и экспериментальных результатов асинхронных генераторов одинаковой мощности не учитывает конструктивных особенностей. Полученные результаты сравнения сведены в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Емкость фазных конденсаторов для асинхронных генераторов

Мощность асинхронной машины, кВт	Требуемая емкость для самовозбуждения, мкФ					
	На холостом ходу		На номинальную нагрузку			
	ЭМ	РМ	ЭМ $\cos\varphi = 1$	РМ $\cos\varphi = 1$	ЭМ $\cos\varphi = 0.8$	РМ $\cos\varphi = 0.8$
2,2	31	28	40	36	68	74
4	50	49	65	61	124	130
7,5	76	70	105	98	190	192
11	98	92	140	133	260	256
15	120	118	172	170	342	355
ЭМ – эмпирический метод, РМ – расчетный метод						

Для режима холостого хода максимальное отклонение результатов составило $\Delta C = 9.7\%$, для режима номинальной нагрузки при $\cos\varphi = 1$ $\Delta C = 10\%$, а для режима номинальной нагрузки при $\cos\varphi = 0,8$ $\Delta C = 8.8\%$. Максимальное отклонение приходится на минимальную мощность электрической машины, с ростом мощности отклонение сокращается до 4% . Детальный расчет величины индуктивности намагничивания и значения скольжения смог бы обеспечить большую сходимость результатов, но так как номинальные значения емкости конденсаторов выбираются из стандартизованных рядов ($E3$, $E6$, $E12$, $E24$ и т.д.), то полученное отклонение фазной емкости зачастую нивелируется возможностью выбора. Графики зависимости значения фазной емкости от мощности асинхронной машины приведены на рисунке 3.7.

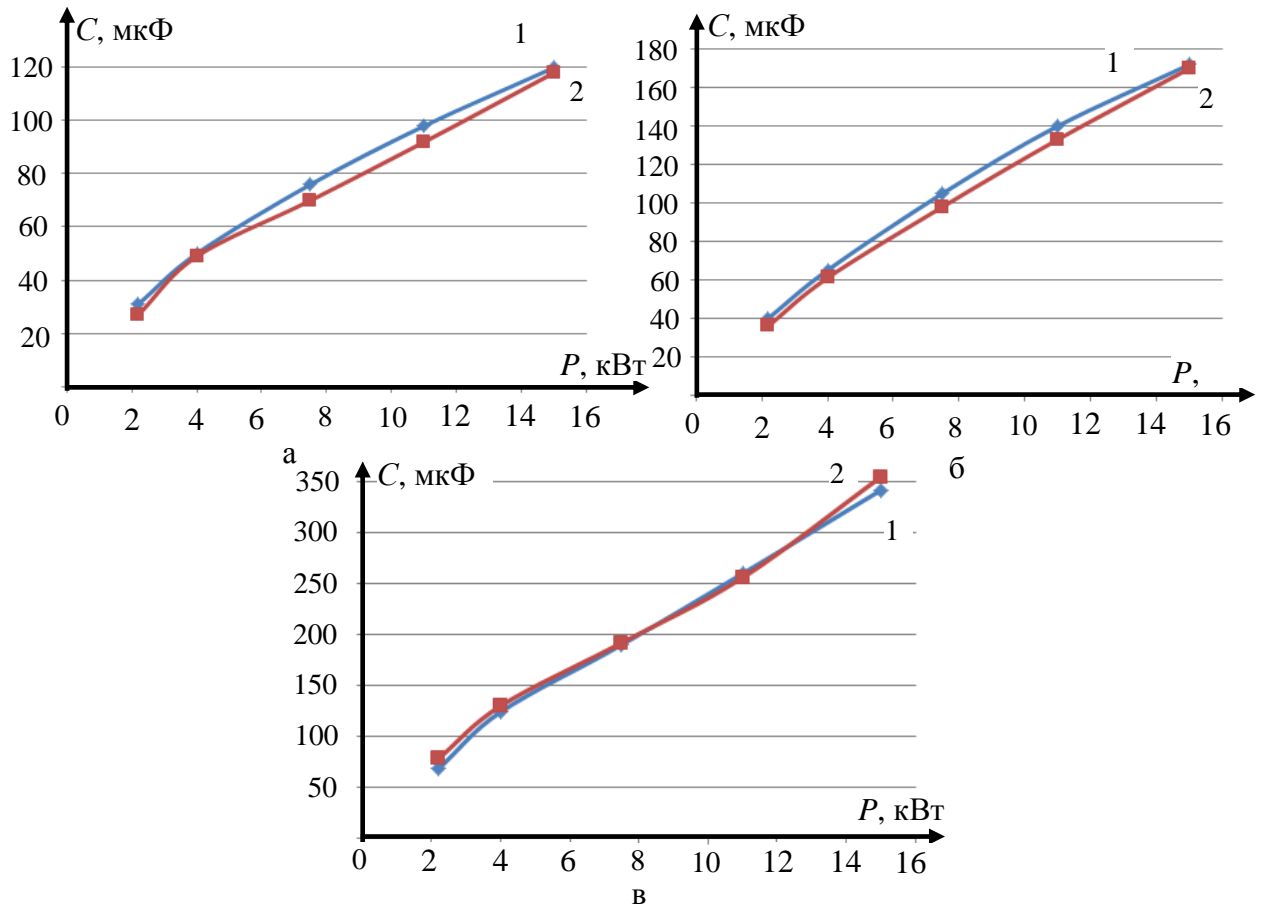


Рисунок 3.7. Зависимость фазной емкости для самовозбуждения АГ

а – на холостом ходу; б – на номинальную активную нагрузку;

в – на номинальную активно-индуктивную нагрузку $\cos\varphi = 0,8$:

1 – экспериментальная кривая, 2 – расчётная кривая

Нестабильность момента или скорости вращения приводного механизма, вызывающие изменение скорости вращения ротора, приводит к необходимости расчета по формуле (56). При этом стоит учитывать, что стабильная работа асинхронного генератора обеспечивается лишь при малой величине скольжения. Другими словами, невозможно перевести асинхронную машину в генераторный режим с частотой выходного напряжения близкой к частоте сети, на которую спроектирована электрическая машина, при вращении ротора на частоте, значительно отличающейся от синхронного значения. Однако некоторая вариация данной величины допустима с учетом отклонения параметров генерируемого напряжения. Кроме этого в приведенном выражении величину скольжения

правильнее рассматривать как функцию нагрузки $s(R_{\text{нагр}})$, приведенную во второй главе в выражении (43).

Полученная зависимость учитывает тот факт, что при активно-емкостной нагрузке, для которой характерен $\sin\varphi < 0$, т.к. ток опережает напряжение, требуется меньшее значение емкости для самовозбуждения. Работа асинхронного генератора на активно-индуктивную нагрузку должна выполняться при большем значении фазных емкостей.

Влияние изменения нагрузки по величине сказывается на необходимом значении емкости возбуждения. Эта зависимость отражается в изменении величины индуктивного сопротивления намагничивающего контура, связанного с насыщением электрической машины. При насыщении магнитной цепи машины индуктивное сопротивление намагничивающего контура уменьшается. В общем случае индуктивное сопротивление намагничивающего контура определяется выражением [9, 48, 109, 112]:

$$X_m = \frac{4mf}{\pi} \cdot \frac{\mu_0 \tau l_u}{\delta_{\Delta}} \cdot \frac{w_1^2 k_{\text{об1}}^2}{p}, \quad (58)$$

где m – число фаз;

μ_0 – магнитная проницаемость воздуха;

τ – полюсное деление;

l_u – ширина сердечника индуктора;

w_1 – число витков статора;

$k_{\text{об1}}$ – обмоточный коэффициент;

δ_{Δ} – эквивалентный воздушный зазор;

p – число пар полюсов.

Таким образом, полученная формула (56) может быть использована для определения емкости фазных конденсаторов, необходимых для возбуждения

генератора на базе асинхронной машины при работе на различные типы и значения нагрузки.

Зная необходимую емкость, можно рассчитать объем реактивной энергии на фазу, достаточный для явления самовозбуждения. Исходя из приведенных выражений (53, 57), реактивную мощность можно посчитать по предложенному автором выражению:

$$P_C = 0,314 \cdot U^2 \frac{(1 - s(R_{нагр}))^2 \cdot 10^{-4}}{\pi^2 L_m (1 - \sin\varphi)}. \quad (59)$$

Для асинхронных генераторов из исследуемого диапазона мощности 2-15 кВт во время переходного процесса потребуется реактивная мощность от нескольких единиц до нескольких десятков кВАр, причем наиболее сильно на данный параметр влияет тип нагрузки. Изменение типа нагрузки с активного на активно-индуктивный, с коэффициентом мощности $\cos\varphi = 0,8$ потребует для поддержания процесса генерирования увеличение фазной емкости не менее чем в два раза.

Полученный результат расчета необходимой реактивной энергии для явления конденсаторного самовозбуждения можно применить для оценивания параметров и требований к частотным преобразователям, способным обеспечить необходимый объем реактивной энергии.

3.3 Реактивная мощность при инверторном возбуждении

Оценку реактивно-емкостной мощности инвертора стоит производить с учетом того, что индуктивно-емкостные фильтры имеются как в звене постоянного, так и в звене переменного тока (рисунок 3.8.). Наличие нескольких реактивных элементов и нелинейность работы полупроводникового преобразователя, определяемая системой управления коммутацией ключей инвертора, усложняет процесс математического описания выражения реактивной мощности.

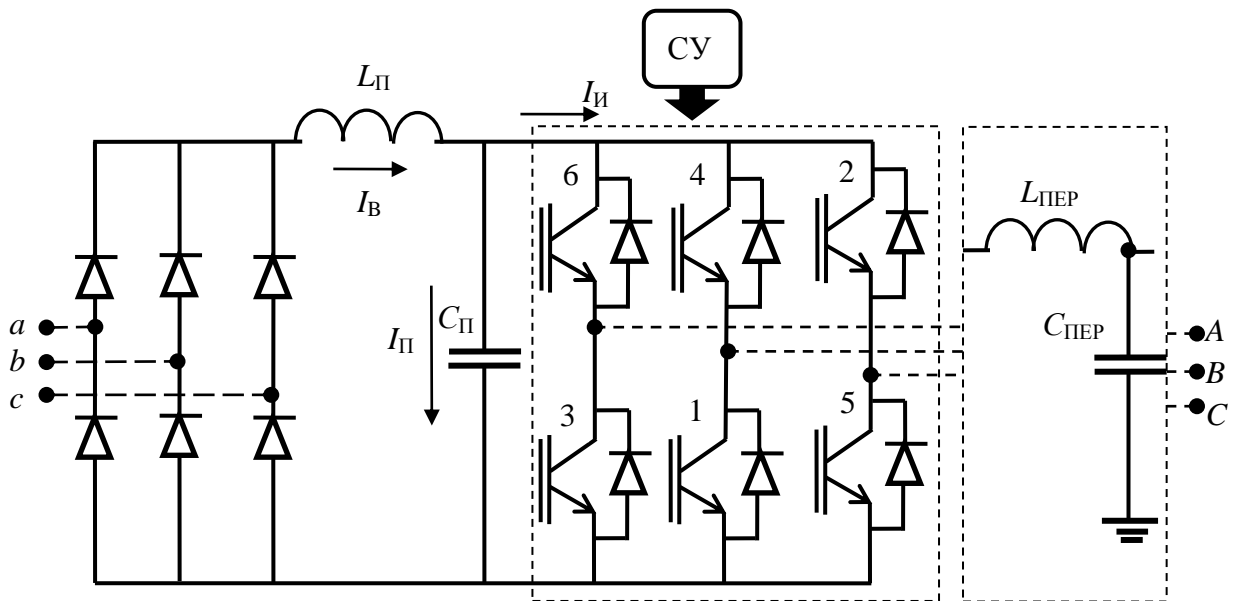


Рисунок 3.8. Схема полупроводникового частотного преобразователя

Конденсатор – неотъемлемое звено частотного преобразователя, не только выполняющее функции фильтра, но и задающего режим работы инвертора. Основными функциями конденсатора при двухзвенном преобразовании энергии, являются устранение перенапряжений и сглаживание пульсаций напряжения, связанных с коммутацией силовых элементов инвертора при работе на активно-индуктивную нагрузку. Напряжение в звене постоянного тока определяется числом пульсации, в общем случае характеризуемое числом фаз и видом выпрямительного блока одно-/двухполупериодный. При этом пульсации в звене постоянного тока тем меньше, чем больше емкость конденсатора [57, 87]. Выбор конденсатора с большей емкостью сказывается на ухудшении динамических характеристик частотного преобразователя.

Однако использование любого фильтра помимо положительных эффектов имеет ряд недостатков, такие как падение напряжения на фильтре, увеличение стоимости и габаритов готового устройства.

В технической литературе достаточно широко и полно описываются алгоритмы расчета выходных фильтров выпрямителей, например в работе Ф.А. Гельвера “Выбор емкости конденсатора звена постоянного тока двухзвенного преобразователя частоты с инвертором напряжения”. Емкость конденсатора в

звене постоянного тока выбирается из величины допустимой пульсации и может быть рассчитана по формуле [1-2, 8, 125, 132-133]:

$$C = \frac{\lambda \cdot I_H}{\omega \cdot \Delta U} \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{2\Delta U}{\lambda U_{\max}}} \right), \quad (60)$$

где $\lambda = \frac{2\pi}{m}$ – угол повторяемости процессов в звене постоянного тока;

ω – угловая частота сети;

$\Delta U = U_{MAX} (1 - \cos(\lambda^*))$ – величина пульсации;

λ^* – угол заряда конденсатора;

U_{MAX} – максимальное напряжение ($U_{MAX} = \sqrt{2}U_\phi$ и $U_{MAX} = \sqrt{6}U_\phi$ для одно и двухполупериодных выпрямителей соответственно);

ΔU_{MAX} – максимальная величина пульсации;

I_H – номинальный ток звена постоянного тока.

В отличие от используемых при конденсаторном возбуждении громоздких и дорогостоящих конденсаторов переменного тока, данный конденсатор предназначен для работы на постоянном токе имеет меньшие габариты и стоимость.

Полученное с инвертора переменное напряжение также проходит через индуктивно-емкостной фильтр для устранения высокочастотных гармоник и сглаживания формы напряжения. Методы расчета выходных фильтров инверторов на заданный коэффициент гармоник в литературе отображены в достаточной мере, например, в работах Г.М. Малышкова [88, 89]. При этом во главе выбора данного фильтра стоит подбор подходящего по индуктивности дросселя фильтра, а значение емкости конденсатора находят из условия выполнения заданного коэффициента гармоник и равенства волнового сопротивления фильтра сопротивлению нагрузки для исключения резонансных явлений на высокочастотных составляющих (61).

$$C = \frac{L}{R_H} \quad (61)$$

Таким образом, реактивная энергия инвертора выходного напряжения имеет несколько ступеней образования, поэтому расчет данной величины является очень сложной задачей, в совокупности с нелинейной работой самого частотного преобразователя и нелинейности намагничения асинхронной машины, выступающей в качестве нагрузки, потребителя реактивной энергии. При использовании промышленных преобразователей для возбуждения асинхронных генераторов нет возможности и необходимости замены конденсаторов в фильтрах звеньев постоянного и переменного тока, т.к. реактивные элементы фильтров рассчитаны и подобраны таким образом, чтобы минимизировать пульсации и обеспечить на заданном уровне коэффициент гармоник.

Задаваясь значением необходимой реактивной мощности для возбуждения АГ от полупроводникового частотного преобразователя можно исходя из выражения, полученного для конденсаторной схемы возбуждения (59). Фактическое значение реактивной мощности легко определить, зная коэффициент мощности или фазовый сдвиг тока относительно напряжения:

$$P_{реак} = I_1 \cdot U_1 \cdot (1 - \cos\varphi). \quad (62)$$

Из выражения, определяющего реактивную мощность видно, что регулирование реактивной мощности возможно через изменение значения фазового сдвига φ между током и напряжением или их амплитуды. Как упоминалось выше, для перехода асинхронной машины в генераторный режим требуется источник емкостной реактивной энергии $\sin\varphi < 0$ для создания электромагнитного поля. При значении коэффициента мощности отличного от нуля $\cos\varphi \neq 0$, активная составляющая энергии будет рассеиваться в тепло на активных сопротивлениях электрической машины и передаваться в нагрузку.

3.4 Моделирование асинхронного генератора с инверторным возбуждением

Проверка выдвинутых предположений об инверторном возбуждении асинхронного генератора была проведена на предложенной модели на базе двухзвенного частотного преобразователя (рисунок 3.9). Особенностью данной схемы является отсутствие индуктивно-емкостных фильтров в звеньях постоянного и переменного тока, что сказывается на качестве возбуждающего напряжения, в том числе наличии высокочастотных составляющих. Однако возбуждение асинхронного генератора при отсутствии конденсаторов в предложенной схеме позволяет по-новому взглянуть на явление возбуждения.

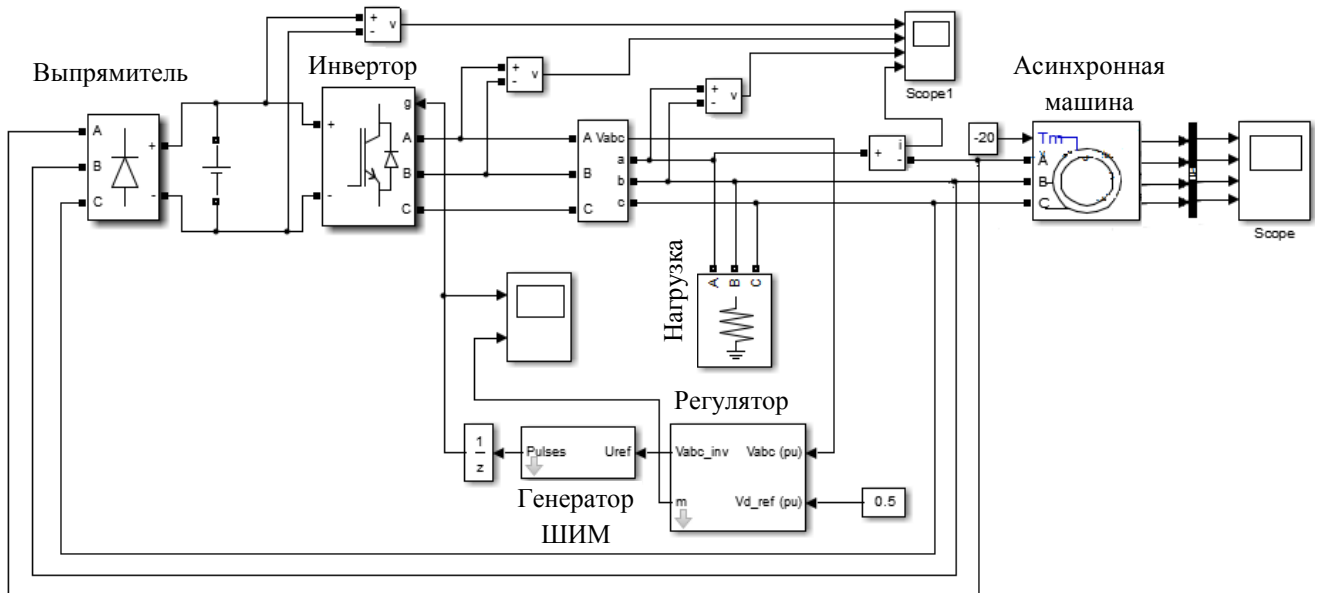


Рисунок 3.9. Модель мехатронной системы генерирования на базе АМ

Представленная модель состоит из следующих блоков:

- асинхронная машина;
- аккумуляторная батарея или конденсатор;
- двухзвенный частотный преобразователь;
- система управления инвертора;
- блок нагрузки;
- прочие измерительные устройства.

Данная схема позволяет работать асинхронной машине как в двигательном, так и генераторном режиме. Ключевым отличием этих режимов будет соответственно тормозящий или дополнительный крутящий момент на валу электрической машины. Кроме установки момента, вращение можно задавать через параметр угловой скорости или соединяя с другими блоками библиотеки *Simscape*, имеющими механические вращательные порты. Кроме этого, для двигательного режима работы потребуется подключение к сети, т.к. продолжительная работа при работе от аккумуляторной батареи невозможна. При этом в данном режиме блок неуправляемого выпрямителя не принимает участия в работе схемы.

Работа в генераторном режиме определяется дополнительным крутящим моментом, способным разогнать ротор до некоторой частоты вращения немного большей частоты вращения магнитного поля статора. Энергия, способствующая возбуждению, хранится в блоке аккумуляторной батареи или конденсаторе, из которого формируется переменное напряжение. Остаточный магнитный поток отсутствует и не предусмотрен блоком “Асинхронная машина”. При этом возникает несколько условий, необходимых для возбуждения АГ. Во-первых, напряжение должно быть выше некоторого критического значения, при котором инвертор сможет формировать переменное значение требуемой амплитуды. Во-вторых, время разряда первоисточника должно превышать время переходного процесса возбуждения асинхронного генератора, что выдвигает требование к емкости конденсатора (мФ), при использовании конденсатора в качестве хранителя постоянного напряжения, или аккумулятора (А · ч). Данный параметр зависит от тока, потребляемого инвертором, который в свою очередь определяется параметрами асинхронной машины и величиной нагрузки.

Использование устройства, способного запасать и хранить энергию для дальнейшего преобразования, в совокупности с наличием выпрямителя, позволяющего наращивать или поддерживать напряжение на выходе звена постоянного тока неизменным, позволяет считать данную систему генерирования автономной.

Трехфазный измеритель устанавливает текущее значение токов и напряжений в трехфазных цепях и позволяет передавать информационный сигнал, характеризующий амплитуду напряжения, в абсолютных или относительных единицах на устройство регулирования. В приведенной модели производится измерение фазного напряжения в относительных единицах, нормируя величину измеренного значения напряжения через значение заданного линейного напряжения по формуле:

$$U' = \frac{U_{\text{фазн}}}{U_{\text{лин}} \cdot \sqrt{2} / \sqrt{3}}. \quad (63)$$

Блок трехфазной нагрузки “*Three Phase RLC Load*” позволяет задавать значение активно-реактивной нагрузки любого характера. Нагрузка при этом симметрична, схема соединения цепей – “звезда” с заземленной нейтралью. Параметры цепи задаются через мощности фаз цепи при номинальном напряжении и частоте. В качестве электромеханического преобразователя выбрана асинхронная машина с короткозамкнутым ротором АИР160S4, параметры которой приводились в таблице 2.5. Механический вращающий момент, заданный отрицательным числом позволяет работать электромеханическому преобразователю в генераторном режиме.

Как описывалось выше, источником первоначальной энергии может служить как источник постоянного тока, так и предварительно заряженный конденсатор. Это в значительной мере будет сказываться на возбуждении асинхронной машины, т.к. использование источника постоянного тока делает режим работы инвертора стабильным. Применимо к схеме с предварительно заряженным конденсатором, режим работы будет меняться из-за изменения напряжения звена постоянного тока.

Инвертор формирует переменное напряжение, которое подается на обмотку статора асинхронной машины. Специфика управления транзисторами заключается в отдельном формировании активной и реактивной составляющей образцового тока в схеме управления инвертором. Схема формирования генерирует сигнал, амплитуда которого зависит от баланса активных и реактивных мощностей. Мерой

баланса активной и реактивной составляющей является соответственно величина постоянного напряжения на входе инвертора и переменное выходное напряжение генератора [41]. Регулирование реактивной составляющей производится путем обратной связи через датчик напряжения, который в свою очередь воздействует на систему управления ключами – генератор дискретных сигналов с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Схема управления выполнена таким образом, чтобы стабилизировать амплитуду и частоту генерируемой ЭДС на значении $U_{\text{д}} = 380 \text{ В}$ $f = 50 \text{ Гц}$, вариация частоты во всем стабильном диапазоне работы АГ не превышает $\Delta f = \pm 0,5 \text{ Гц}$, что соответствует требованиям ГОСТ 32144-2013.

Регулятор напряжения поддерживает на номинальном уровне амплитуду генерируемой электроэнергии, жесткость характеристики обеспечивается изменением работы ШИМ-регулятора, скважности импульсов (рисунок 3.10, ПРИЛОЖЕНИЕ 6), и фазового сдвига тока возбуждения.

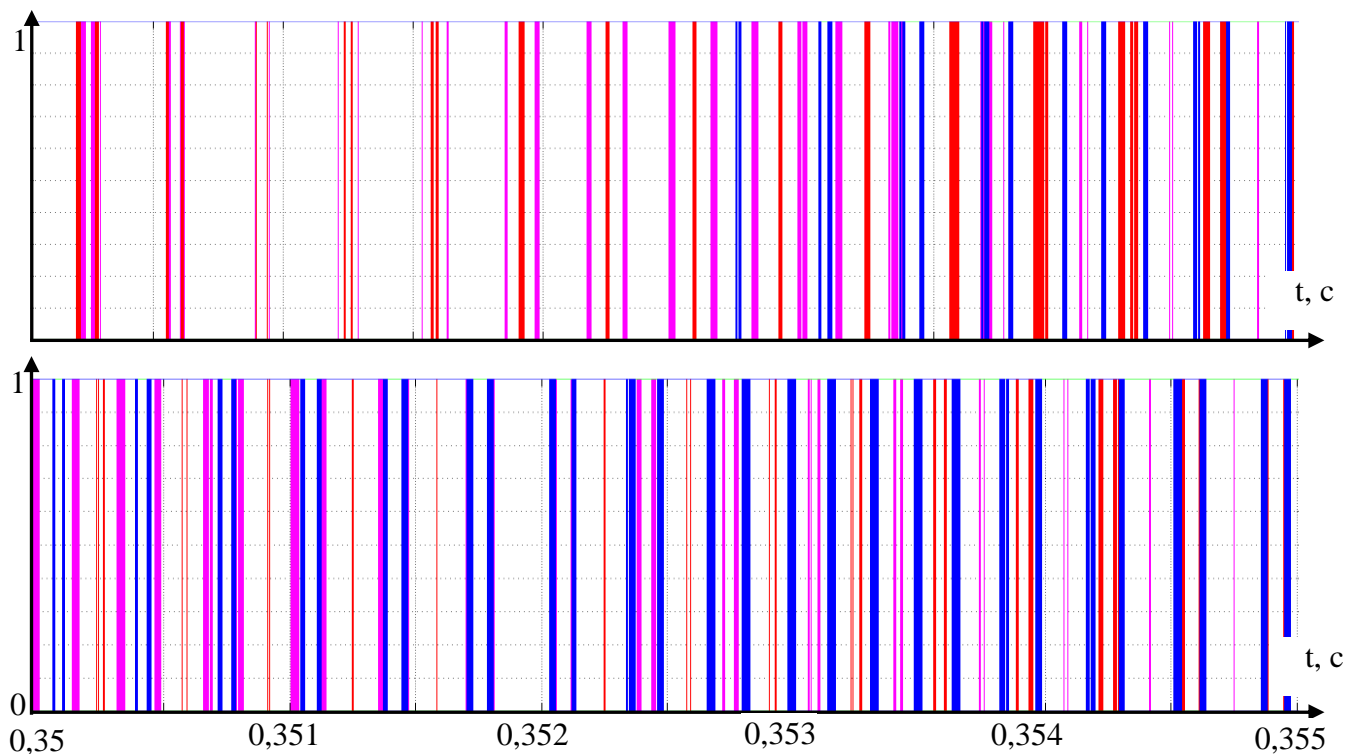


Рисунок 3.10. Управляемые ШИМ импульсы при различной нагрузке: а – на холостом ходу,
б – на нагрузку

Стабилизация амплитуды и частоты генерируемого напряжения осуществляется по одному каналу. Этому способствует особенность изменения состояния АГ при наличии нагрузки. Работа на активную и активно-индуктивную нагрузку характеризуется снижением амплитуды напряжения за счет размагничивающего действия якоря (статора АМ), и обусловлено падением напряжения на сопротивлении обмоток АМ. Кроме этого наблюдается уменьшение частоты генерируемого напряжения по причине увеличения индуктивности намагничивающего контура L_m из-за уменьшения насыщения машины и сдвига рабочей точки на кривой (рисунок 3.11, 3.12). Фактически, реализуется процесс, близкий к закону $U / f = const$. Аналогичные явления характерны и для прочих электромагнитных устройств.

Стабилизация амплитуды генерируемого напряжения осуществляется увеличением намагничивающего тока, вследствие чего уменьшается индуктивность электрической машины L_m . Таким образом, регулирование двух параметров выходного напряжения происходит за счет наличия одной обратной связи, оценивая отклонение фазного напряжения от эталонной величины.

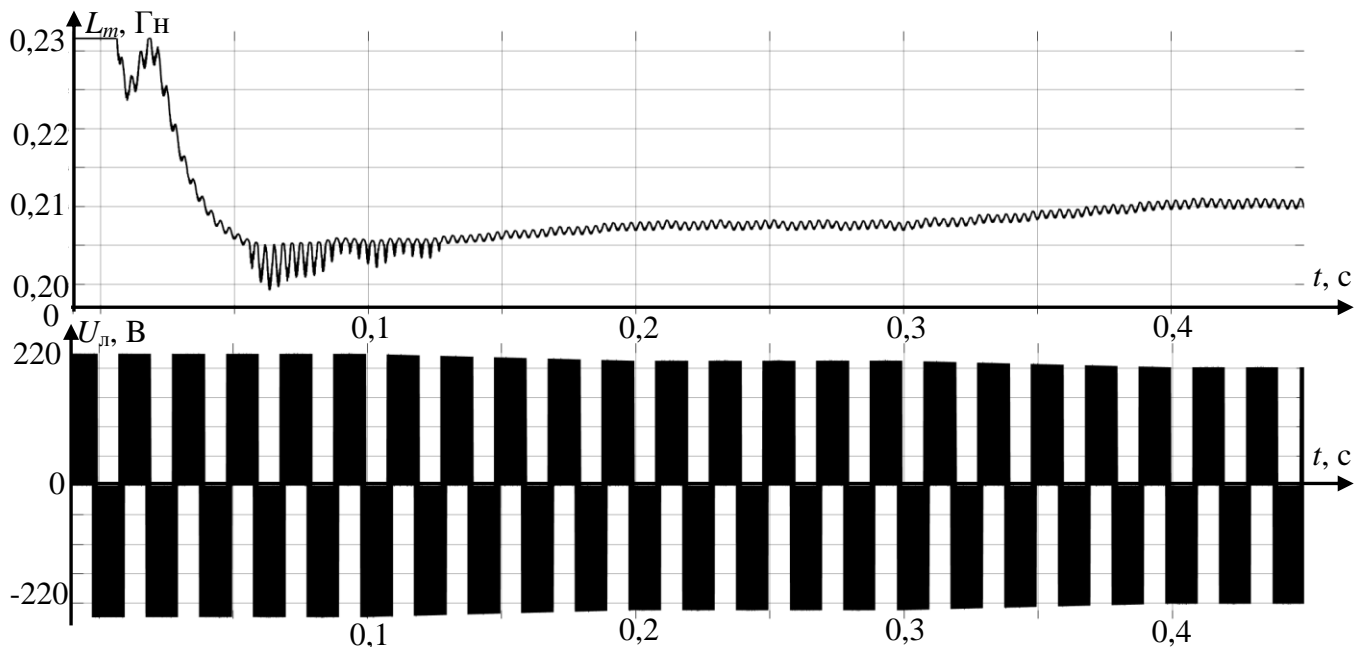


Рисунок 3.11. Индуктивность намагничивающего контура и линейное напряжение при изменении нагрузки в разомкнутой системе

Для компенсации отклонения система управления инвертором начинает пропускать большую энергию за счет увеличения скважности ШИМ (ПРИЛОЖЕНИЕ 6). Подтягивая напряжение к заданному уровню и частоту к номинальному значению за счет уменьшения индуктивности намагничивающего контура. Время отработки воздействия нагрузки определяется инерционностью системы и параметрами используемого ПИ-регулятора, способного обеспечить нулевую статическую ошибку и имеет малую чувствительность к шумам в измерительном канале, однако имеет плохое быстродействие по сравнению с ПИД-регуляторами. В работе не ставилась задача обеспечить максимальное быстродействие системы стабилизации, была исследована работа МСГ в различных режимах и возможность стабилизации параметров генерируемого напряжения. Исследовалось поведение МСГ в разомкнутой системе. При этом работа системы генерирования характеризуется нестабильными параметрами напряжения и частоты к внешним возмущениям, происходит значительное изменение амплитуды и частоты генерируемого напряжения при подключении нагрузки.

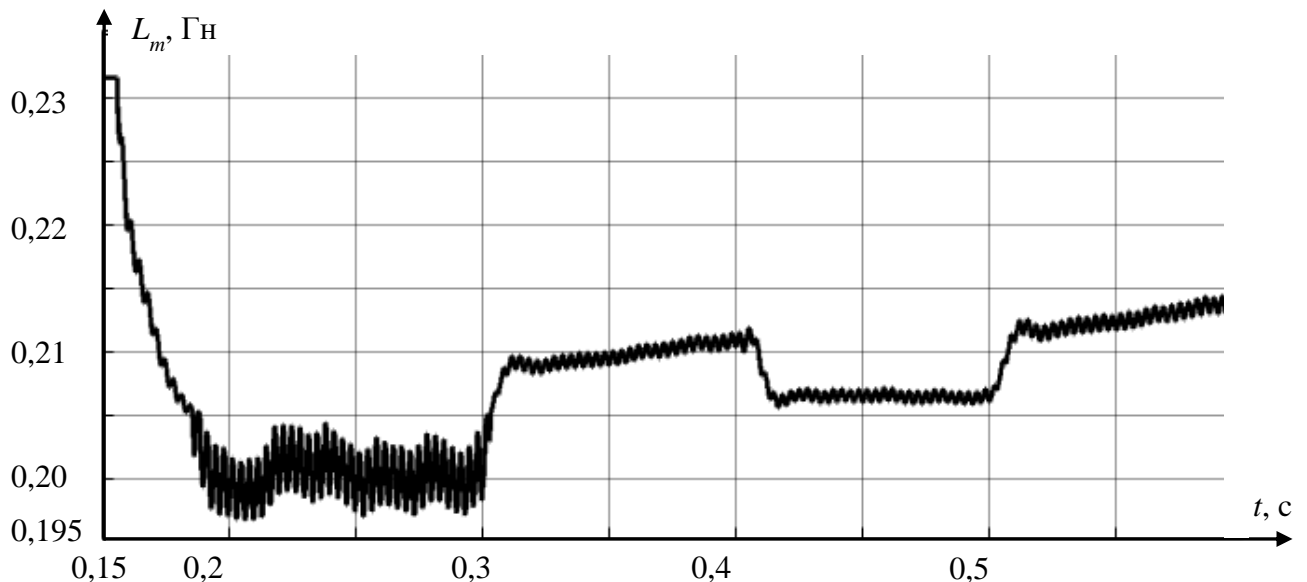


Рисунок 3.12. Индуктивность намагничивающего контура при изменении нагрузки в разомкнутой системе

Форма выходного напряжения генератора содержит большое число гармоник, что не приемлемо для конечного потребителя. Решением вопроса обеспечения необходимой формы напряжения является установка индуктивно-емкостного фильтра между системой генерирования и нагрузкой. Выбор реактивных параметров фильтра уже поднимался в большом количестве работ и не представляет особой сложности [16, 92]. Так при использовании L - C фильтра со следующими параметрами $L = 3$ мГн и $C = 5,6$ мкФ напряжение имеет форму близкую к синусоидальной (рисунок 3.13). Точный расчет и выбор параметров фильтра позволит получить напряжение с гораздо меньшим коэффициентом гармоник.

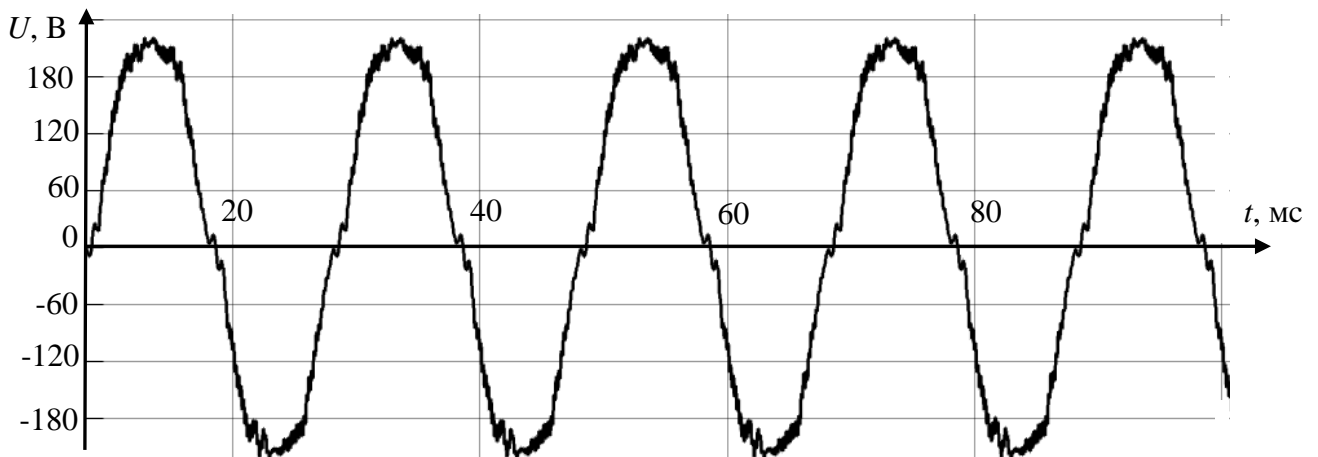


Рисунок 3.13. Напряжение АГ после L - C фильтра

Ввод индуктивно-емкостных фильтров позволяет сглаживать сформированное на выходе инвертора напряжение, но реактивный характер фильтра однозначно оказывает влияние на возбуждение асинхронного генератора. По данной причине в исследуемой модели мехатронной системы фильтр в ветви «инвертор – АМ» не применен. Кроме этого на качество выходного напряжения инвертора оказывает влияние частота генератора дискретных сигналов с ШИМ.

Состояние работы асинхронного генератора фиксируется через измерительные приборы. Так основные показатели стабильной работы асинхронного генератора можно наблюдать с помощью блока “*Bus Selector*”. Стабильная скорость вращения ротора и установившейся электромагнитный

момент, сопоставимый с внешним вращающим моментом, свидетельствуют об устойчивом режиме работы СГЭЭ. Кроме этого фиксировать возбуждение АГ можно через напряжение на конденсаторе и показания тока асинхронной машины.

На рисунке 3.13 приведены графики скорости вращения и электромагнитного момента при работе АГ на холостом ходу. До момента времени 0,18 секунды асинхронная машина работает в двигательном режиме за счет питания переменным напряжением инвертора для разгона ротора ЭМ. Как видно, устойчивый режим работы генератора достигается через 0,25 секунды после начала моделирования. Через это время электромагнитный момент достигает значения в 20 Н·м, а скорость вращения ротора при этом устанавливается на величине 164 рад/с, что соответствует 1566 оборотам в минуту (рисунок 3.14).

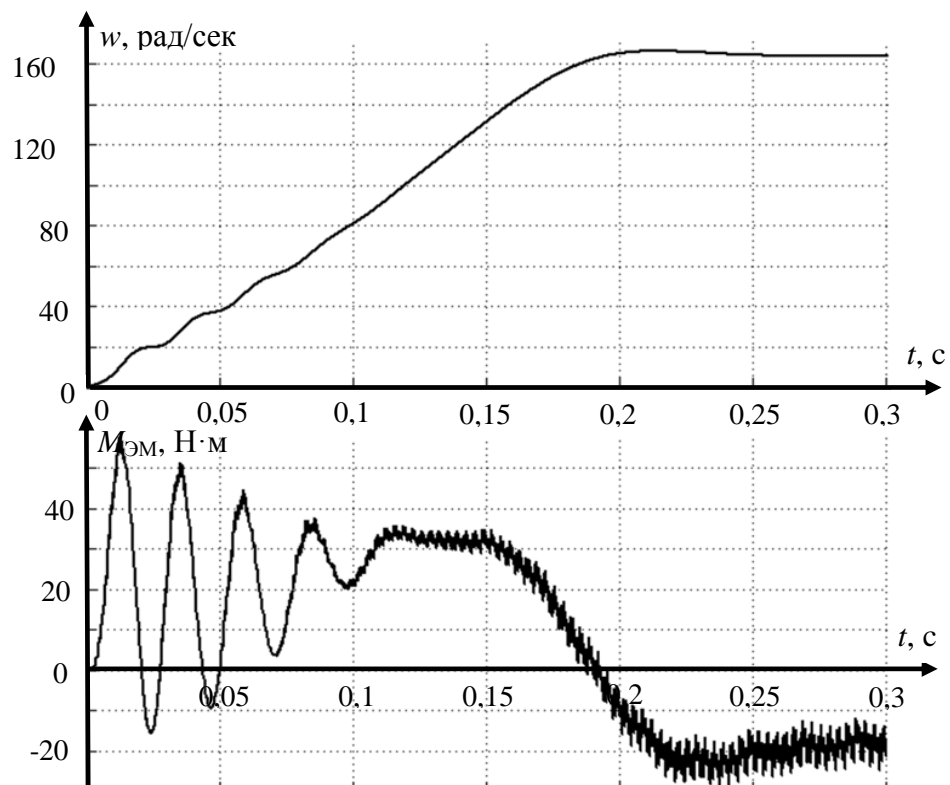


Рисунок 3.14. Кривые угловой скорости и электромагнитного момента

Частота генерируемого напряжения достигает $f = 49,7$ Гц, из чего следует, что величина скольжения составит $s = -0,048$. Пульсации электромагнитного момента на представленном рисунке связаны с формой выходного напряжения

инвертора, которая отлична от синусоиды из-за отсутствия индуктивно-емкостного фильтра.

Графики напряжения на конденсаторе и тока цепи статора, представленные на рисунке 3.15, также позволяют определить момент возбуждения асинхронной машины. Из кривой напряжения конденсатора видно, что до момента времени 0,18 секунды машина работает в двигательном режиме, потребляя электроэнергию. После чего энергия вновь начинает запасаться в конденсаторе, что говорит о начале работы асинхронной машины в генераторном режиме.

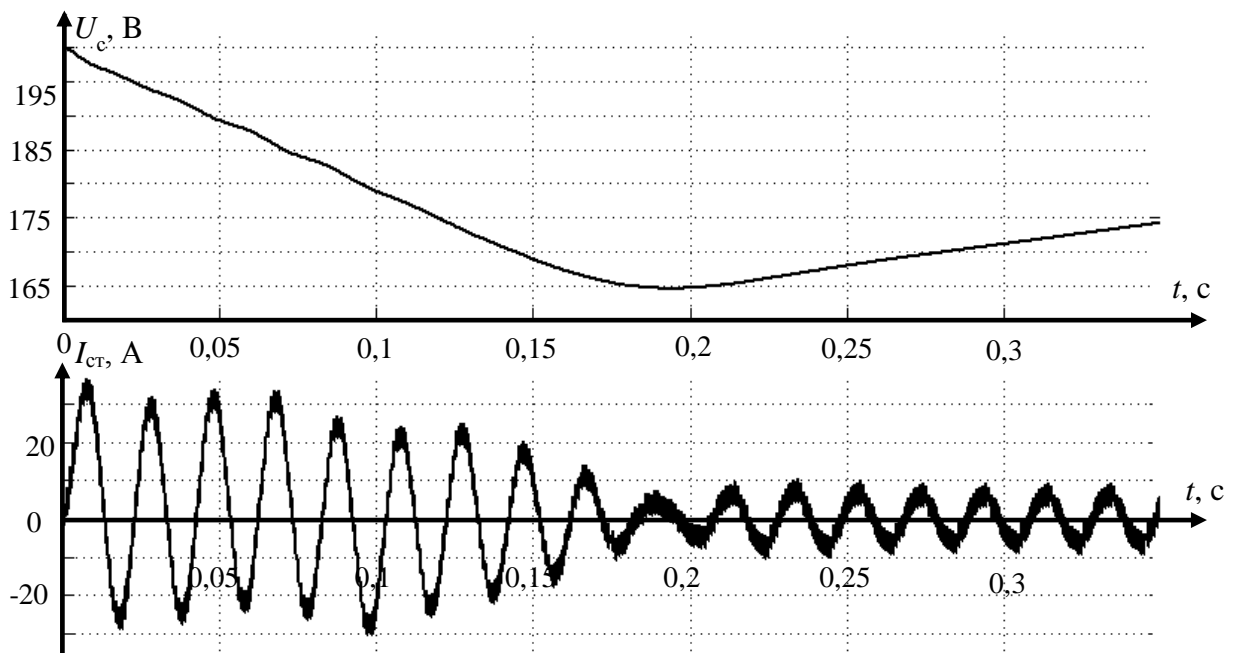


Рисунок 3.15. Кривые напряжения на конденсаторе и тока статора

Из графиков следует, что в указанный момент времени ток меняет направление, а амплитуда фиксируется на некотором значении. В таком режиме асинхронный генератор будет работать до момента полного заряда конденсатора. Заряд конденсатора возможен как через блок выпрямителя, так и через обратные диоды инвертора при определённом коэффициенте мощности. Следовательно, после возбуждения АГ работает на нагрузку в виде блока постоянного тока до достижения на конденсаторе значения, соответствующего выпрямленному трехфазному напряжению генератора. После этого ток в ветви статора будет определяться необходимой для поддержания генерирования реактивной энергией.

Вариация напряжения в звене постоянного тока будет влиять на режим работы инвертора и асинхронного генератора. Для исключения влияния перемены напряжения в блоке постоянного тока на снятые характеристики следует использовать источник постоянного напряжения. Анализ конденсаторного возбуждения показал, что для явления самовозбуждения во время переходного процесса требуется реактивная энергия, соизмеримая с мощностью используемой асинхронной машины, после установившегося режима необходимый объем реактивной энергии составляет 5-25 % от мощности генератора из чего можно сделать заключение, что электроэнергии, при использовании низковольтного источника, может быть недостаточно для возбуждения. Так как асинхронная машина АИР160S4 используемая для моделирования спроектирована на номинальный ток $I_{ном} = 29,6$ А, то исходя из вышесказанного напряжение в звене постоянного тока следует выбрать таким образом, чтобы обеспечить возбуждение асинхронной машины на токе близком к номинальному.

Эмпирическим путем было получено, что для возбуждения АГ будет достаточно напряжения в звене постоянного тока $U_{dc} = 180$ В при емкости конденсатора звена постоянного тока в 1 мФ. Обеспечение стабильной работы активной нагрузки мощностью около 5 кВт возможно лишь при напряжении $U_{dc} = 200$ В. Причиной такого явления выступает сам блок двухзвенного частотного преобразователя, который является также нагрузкой до момента заряда источника напряжения в звене постоянного тока. Для обеспечения работы при номинальной нагрузке требуется большее напряжение. Тем не менее, для полноты анализа установим напряжение конденсатора звена постоянного тока 200 В, что позволяет изучить работу СГЭЭ при перегрузке [17, 78, 82].

Ток в обмотке статора в момент пуска достигает значения $I_{пуск} = 33$ А, что является допустимой величиной. Оценив энергию в звене постоянного тока, получим следующий результат: объем потребляемой энергии в момент пуска составляет 7,6 кВА, после явления возбуждения объем энергии уменьшается до уровня 3,2 кВА, что составляет 21,3 % от мощности асинхронной машины.

Разработанная модель использовалась для получения характеристик асинхронного генератора с инверторным возбуждением. К основным характеристикам любого генератора относятся: характеристика холостого хода, внешняя, нагрузочная и регулировочная характеристики.

Наличие в схеме регулятора напряжения, управляющего объемом реактивной энергии, позволяет поддерживать неизменным значения амплитуды и частоты выходного напряжения в широком диапазоне тока нагрузки. Регулировочная характеристика АГ с инверторным возбуждением характеризует, как нужно регулировать ток возбуждения генератора при изменении тока нагрузки, чтобы напряжение генератора оставалось неизменным по величине.

В таблицу 3.2 сведены результаты моделирования при вариации величины нагрузки.

Таблица 3.2 – Результаты моделирования

Мощность, Вт	Ток нагрузки, А	Ток генератора, А	Напряжение, В
XX	0	22,8	380,5
50	0,13	22,9	380,3
68	0,18	23	379,98
250	0,66	23,02	379,7
1000	2,65	23,17	377,7
2000	5,25	23,29	375,1
3200	8,66	23,49	371,5
5800	15,9	23,85	364,1
8600	24,8	24,3	348,3
13300	39,5	25	336,4
15000	46	25,26	326

Как уточнялось выше, напряжения звена постоянного тока хватит для работы генератора на активную нагрузку порядка 5 кВт. Из опыта можно наблюдать, что генератор выдает большой ток, участвующий в заряде конденсатора звена ПТ,

уменьшающийся по мере увеличения активной нагрузки. Кроме этого, увеличение нагрузки приводит к снижению напряжения генератора, по причине размагничивающего действия якоря от активно-индуктивного типа нагрузки.

На нагрузке мощностью 8,6 кВт можно заметить превышение значения тока нагрузки относительно тока генератора. Это связано с включением в работу инвертора как источника электроэнергии. Напряжение на конденсаторе при этом уменьшается, что говорит о неустойчивой работе СГЭЭ и ведет к прекращению процесса генерирования. Однако возможна непродолжительная работа в таком режиме и даже при большей нагрузке, о чем говорят опыты на мощности 13,3 кВт и 15 кВт. Система генерирования при работе на активную нагрузку 15 кВт смогла отработать 2,3 секунды. Таким образом, устойчивость и продолжительность режима генерации при перегрузке системы определяется достаточной энергией звена постоянного тока.

Снятая характеристика зависимости напряжения генератора от тока нагрузки приведена на рисунке 3.16, данная характеристика отличается от внешней тем, что ток возбуждения переменная величина $I_{инв} = var$.

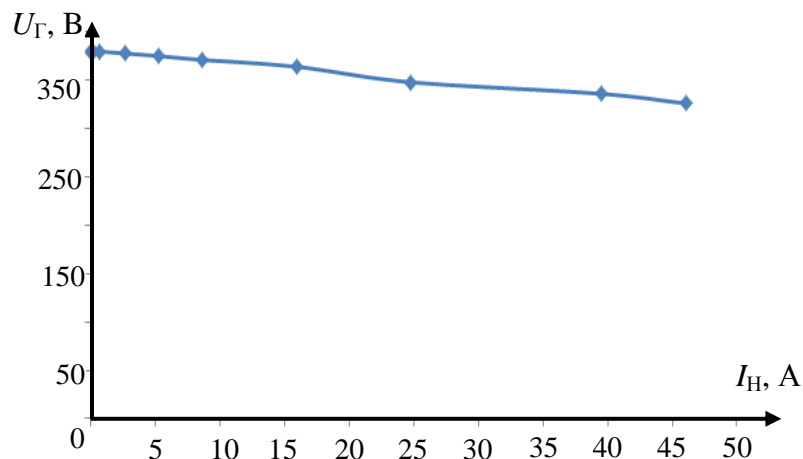


Рисунок 3.16. Зависимость генерируемого напряжения от тока нагрузки в разомкнутой системе

Отмеченная зависимость тока генератора от тока нагрузки приведена на рисунке 3.17. Анализируя данную зависимость, можно сделать следующий

вывод: АГ с инверторным возбуждением способен кратковременно работать на нагрузку выше номинального значения, используя инвертор не только как источник реактивной энергии для возбуждения генератора, но и выдавая активную энергию в нагрузку. На рисунке 3.17 отмечена точка, когда инвертор вступает в работу в качестве источника энергии для нагрузки. Положение данной точки на кривой определяется напряжением звена постоянного тока и режимом работы АГ.

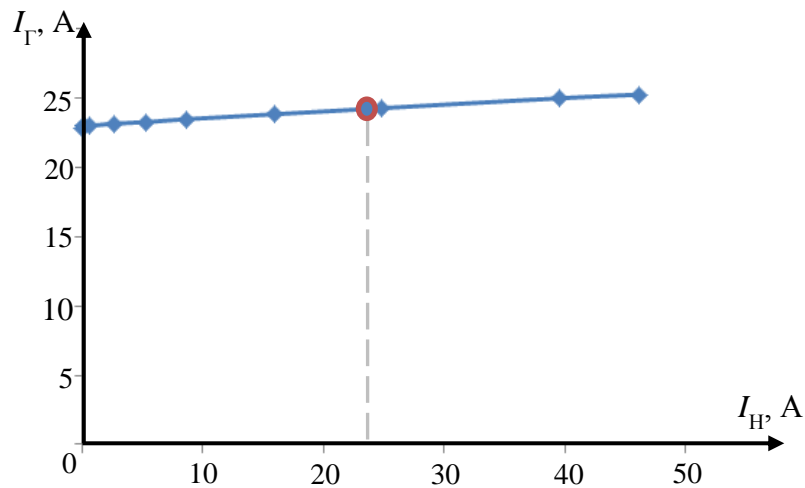


Рисунок 3.17. Кривая тока генератора от тока нагрузки для разомкнутой системы

Исследование стационарных и динамических режимов генерирования замкнутой системы регулирования напряжения производилось с использованием источника постоянного напряжения, значение которого соизмеримо с выпрямленной величиной трехфазного напряжения АГ. При значении напряжения конденсатора 545 В, блок инверторного возбуждения и выпрямитель перестают выступать в качестве нагрузки, не наблюдается процесс “падения – нарастания” напряжения на конденсаторе во время работы установки на нагрузку.

Работа в режиме ХХ сопровождается избыточной накачкой реактивной энергии в звено постоянного тока. Работа на нагрузку во всем номинальном диапазоне мощности будет характеризоваться не только поддержанием неизменной величины частоты генерируемого тока, но и высокой жесткостью внешней характеристики.

Подключение активной номинальной нагрузки приводит к падению напряжения порядка 1 В, активно-индуктивной с коэффициентом мощности $\cos\varphi = 0,8$ приводит к падению напряжения при номинальной нагрузке 2,4 В. При работе на номинальную активно-емкостную нагрузку, напряжение на зажимах генератора возрастает на 2 В (рисунок 3.18). Жесткость внешней характеристики обеспечивается изменением величины реактивной энергии частотного преобразователя участвующего в возбуждении АГ.

Время отработки регулятором напряжения, воздействия нагрузки, определяется инерционностью МСГ и характером нагрузки, в том числе, мощностью генераторной установки и емкости конденсатора звена постоянного тока и параметров индуктивно-емкостных фильтров.

Таблица 3.3 – Результаты моделирования

Мощность нагрузки, Вт	Линейное напряжение АГ, В			Коэффициент мощности при активной нагрузке $\cos\varphi = 1$
	Активная нагрузка	Активно-индуктивная нагрузка, $\cos\varphi = 0,8$	Активно-ёмкостная нагрузка, $\cos\varphi = 0,8$	
XX	363,39	363,39	363,39	0,03
26,5	363,38	363,2	364	0,04
52	363,35	362,9	364,05	0,05
132	363,34	362,7	364,1	0,06
439	363,339	362,4	364,2	0,07
1319	363,3175	362,1	364,6	0,15
5279	363,306	361,8	365,1	0,6
13198	363,285	361,35	365,4	0,74
15000	363,26	361	366	0,75

Разработанная модель позволяет изучить работу АГ с инверторным возбуждением в динамических и аварийных режимах работы, таких как

однофазные и многофазные короткие замыкания, несимметричная нагрузка, сброс и наброс нагрузки, перегрузка (ПРИЛОЖЕНИЕ 6). Исследования имитационной модели показало высокую устойчивость МСГЭ при “набросе-сбросе” нагрузки за счет наличия регулятора напряжения. Даже импульсное включение нагрузки выше номинальной не приводит к срыву генерации.

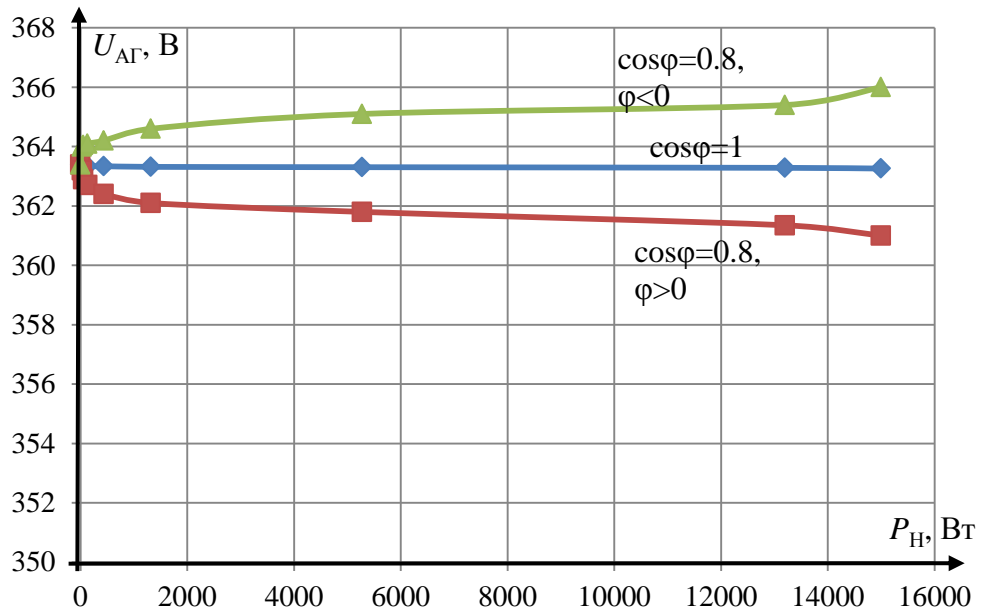


Рисунок 3.18. Внешние характеристики АГ в МСГ с регулятором напряжения

Регулирование амплитуды и частоты генерируемого напряжения осуществляется за счет наличия обратной связи по напряжению.

Кроме того, система стабильна при периодическом изменении нагрузки. Регулятор напряжения при импульсном изменении нагрузки не успевает мгновенно обработать процесс падения напряжения из-за изменения напряжения в звене постоянного тока и размагничивающего действия нагрузки, за счет чего происходит мгновенное проседание напряжения на зажимах генератора до 10 %. Регулятор напряжения обрабатывает внешнее воздействие по мере накачки напряжения конденсатора DC звена.

Увеличивая мощность трехфазной нагрузки можно построить зависимость коэффициента мощности $\cos\varphi$ от вырабатываемой мощности АГ.

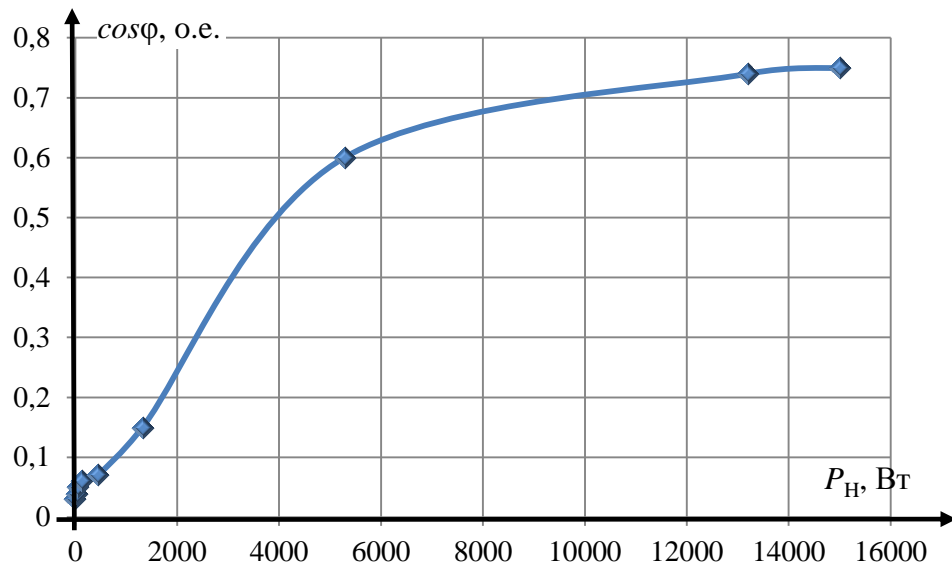


Рисунок 3.19. График зависимости коэффициента мощности от вырабатываемой энергии

Генератор на базе асинхронной машины обладает замечательной особенностью прерывания процесса генерирования электроэнергии при коротком замыкании. Для проверки этого эффекта в модель следует добавить ключ, который будет замыкаться по воздействию сигнализирующего импульса. Модернизировав модель таким образом, чтобы в момент времени 0,3 секунды от начала моделирования, когда процесс возбуждения перешел в стационарный режим, произошло межфазное замыкание двух любых фаз, получим следующий результат (рисунок 3.20).

Как видно из приведенного рисунка при замыкании фаз происходит кратковременное увеличение электромагнитного момента и тока генератора после которого за два периода колебаний данные величины достигают нулевого значения при постоянной частоте вращения ротора.

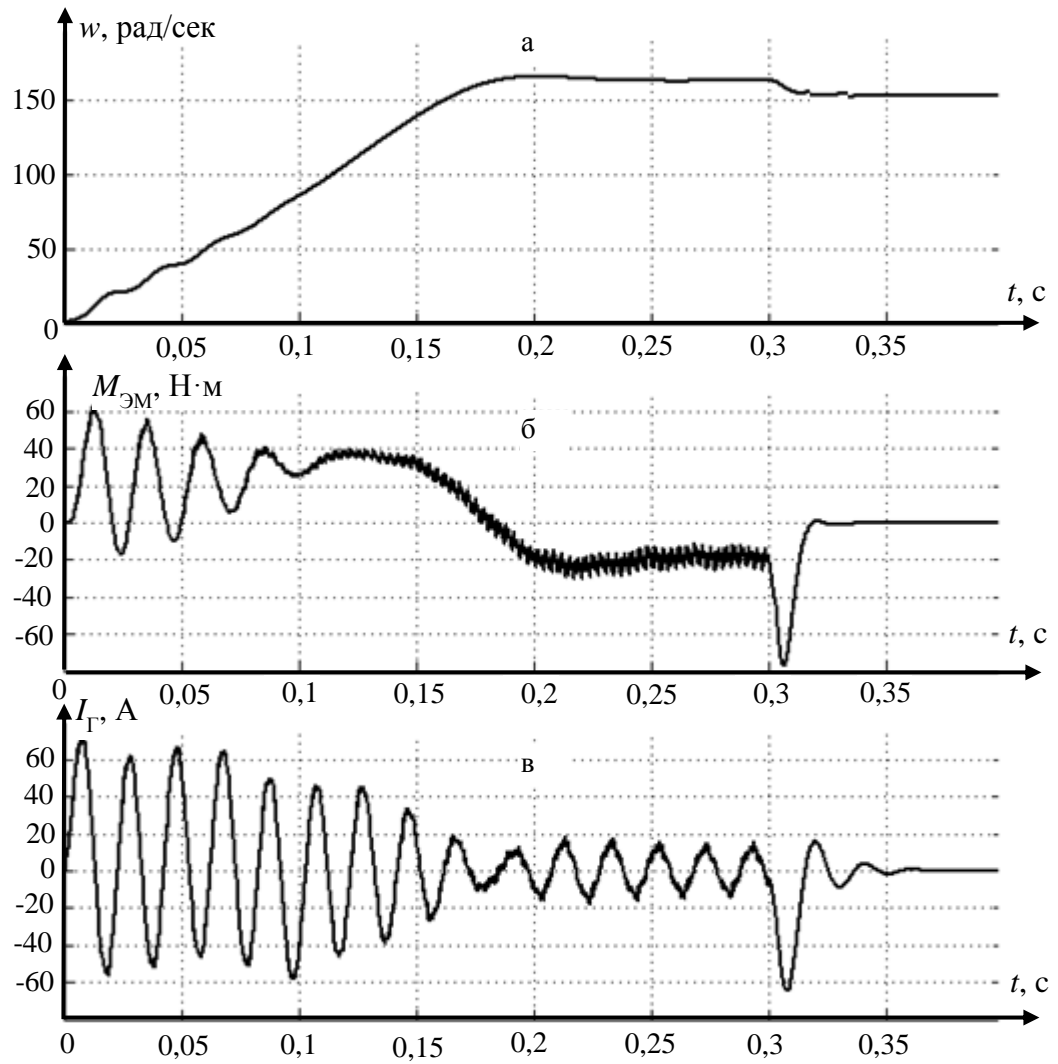


Рисунок 3.20. Кривые АГ при коротком замыкании: а – частота вращения ротора, б – электромагнитный момент, в – ток генератора

Исходя из полученного результата можно сделать вывод, что асинхронный генератор с инверторным, так же как и с конденсаторным возбуждением способен к прерыванию генерирования при КЗ фаз, что является значимым преимуществом для автономных объектов.

3.5 Выводы по главе

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Пульсация магнитной индукции по длине расточки внутреннего диаметра статора является причиной изменения индуктивности электрической машины, что в совокупности с коммутацией ключей инвертора способствует явлению параметрического резонанса, т.к. относительное изменение индукции значительно превышает необходимую вариацию индуктивности. Для гарантированного возбуждения системы генерирования на базе АМ можно рекомендовать проектировать машину с сильной пульсацией индукции в воздушном зазоре, однако генерируемое напряжение такого АГ будет содержать повышенный коэффициент гармоник.
2. Предложенная расчётная формула фазной емкости для АГ с конденсаторным возбуждением дает погрешность с имеющимися в литературе экспериментальными результатами не более 10 %. Данное расхождение нивелируется выбором значения конденсатора из стандартизованных рядов. Детальный учет всех факторов, входящих в формулу (56) позволит точнее определять необходимую емкость. Учитывая простоту предложенного выражения, его можно рекомендовать для расчета фазных емкостей АГ и использовать для оценки необходимой реактивной энергии, в том числе в МСГ.
3. Для возбуждения мехатронной системы генерирования на базе АМ требуется реактивная энергия, соизмеримая с мощностью асинхронной машины, используемой в качестве электромеханического преобразователя. Расчет системы возбуждения должен исходить из выполнения данного условия, способности в переходном режиме обеспечить необходимый объем реактивной энергии. По достижению стационарного режима необходимая реактивная мощность при работе АГ на холостом ходу составляет до 25 % от номинальной мощности ЭМ и определяется величиной нагрузки.

4. Для систем с обязательным резервным питанием может быть рекомендовано использование мехатронной системы генерирования с двухзвенным частотным преобразователем. Это дает возможность использования инвертора не только как источника реактивной энергии для АГ, но и как резервный (дополнительный) блок электроэнергии для нагрузки, что является преимуществом данной СГЭЭ, позволяющим кратковременные перегрузки системы.
5. МСГ с обратной связью по выходному напряжению генератора реализует совместное регулирование напряжения и частоты лишь по одному контуру напряжения. Регулирование частоты происходит за счет воздействия тока инвертора на индуктивность намагничивающего контура электрической машины, фактически изменяя частоту резонанса системы. При этом в МСГ автоматически реализуется закон, близкий к $U/f = \text{const}$.
6. Инверторное возбуждение не исключает особенности АГ к срыву генерации при коротком замыкании фаз. Прекращение самовозбуждения будет обусловлено не только спецификой работы асинхронной машины, но и срабатыванием защиты инвертора – источника реактивной энергии. Наличие данной особенности позволяет использовать АГ с инверторным возбуждением в автономных объектах, для которых установлены требования по отработке аварийных режимов КЗ.

ГЛАВА 4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЫ ГЕНЕРИРОВАНИЯ С АСИНХРОННОЙ МАШИНОЙ

4.1 Особенности экспериментальной установки

Проверка полученных выводов и результатов математического моделирования предполагает проведение экспериментальных исследований. В виду принятых в математическом моделировании упрощений и допущений необходимо учитывать особенности экспериментальной установки. Испытания были проведены на двух экспериментальных установках. Особенности экспериментальных установок заключаются в следующем:

- использование промышленных инверторов с возможностью питания от сети предполагает наличие индуктивно-емкостных фильтров в звеньях постоянного и переменного тока;
- наличие различного рода защит от перенапряжений и высоких значений тока;
- необходимость питания системы управления;
- соизмеримость мощности генераторной установки и приводного двигателя, из-за чего скорость вращения ротора снижается по мере возрастания нагрузки генератора;
- отсутствие авторегулятора напряжения;
- погрешность измерительных приборов.

Отмеченные различия экспериментального макета от визуальной модели (рисунок 3.9) не являются критичными для подтверждения адекватности работы предложенных моделей.

Цель программы экспериментальных исследований заключается в:

- подтверждении явления возбуждения АГ в составе МСГ;

- определении потребляемой реактивной мощности, необходимой для начала и поддержания процесса самовозбуждения;
- изучении влияния нагрузки на режим работы энергосистемы;
- подтверждении регулировочных способностей МСГ.

Первая экспериментальная установка состоит из двух соосно спаренных асинхронных машин мощностью 1,5 и 2,2 кВт с вынесенным блоком управления (рисунок 4.1).

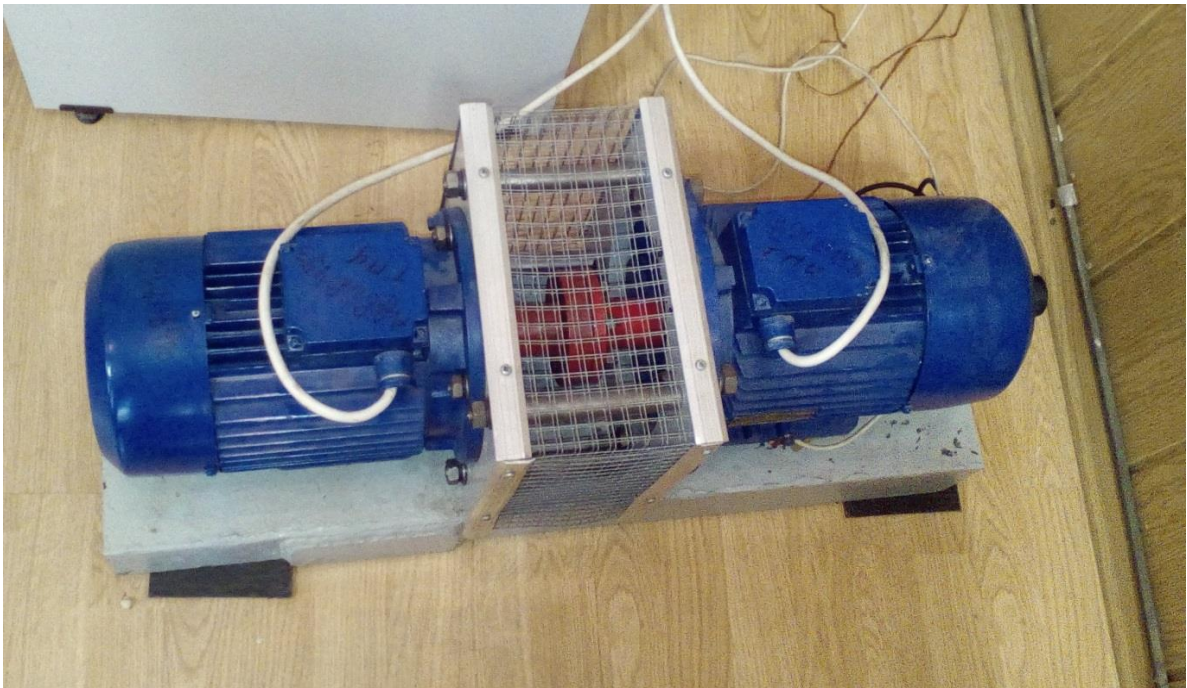


Рисунок 4.1. Внешний вид соединения АД-АГ

Первая асинхронная АД80В4У3 машина выступает в качестве источника внешнего крутящего момента для генераторной системы. Питание электрической машины осуществляется частотным преобразователем *Danfoss FC302*. Вторая электрическая машина АД90L4У3 работает в режиме генератора. Переход в генераторный режим осуществляется за счет питания электрической машины частотным преобразователем *Danfoss VLT 5000 FLUX* электроэнергией на частоте ниже, чем приводной машины. Приведенные технические параметры используются для определения значений параметров Т-образной схемы замещения АГ, необходимых для настройки математической модели. Расчет производился в

программе Matlab по алгоритму, приведенному в ПРИЛОЖЕНИИ 7. Технические параметры асинхронных машин, используемых в эксперименте приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Технические параметры асинхронных машин

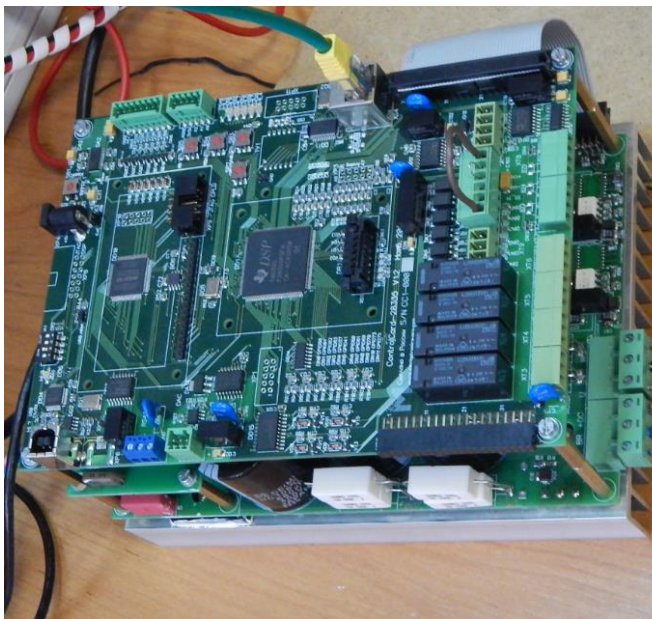
Параметры/ электрическая машина	АД80В4У3	АД90L4У3	АИР90L4У3
Номинальная мощность P_H , Вт	1500	2200	2200
Номинальное линейное напряжение U_H , В	380	380	380
Номинальное значение тока I_H , А	3,5	5,2	5,2
Коэффициент полезного действия η , %	78,5	80	81
Коэффициент мощности, $\cos\varphi$	0,8	0,8	0,83
Кратность токов, $I_{II}^* = I_{II}/I_H$	7	7	6
Кратность пускового момента, M_{II}/M_H	1,8	1,8	2,0
Кратность максимального момента, M_{Max}/M_H	2,2	2,2	2,6
Кратность минимального момента, M_{Min}/M_H	1,5	1,5	2,0
Момент инерции J , кг·м ²	0,021	0,029	0,0056

Вторая экспериментальная установка состоит из спаренных асинхронной машины АИР90L4У3 и машины постоянного тока 4ПО100L1, с номинальной частотой вращения 2200 об/мин и мощностью 2,2 кВт (рисунок 4.2).

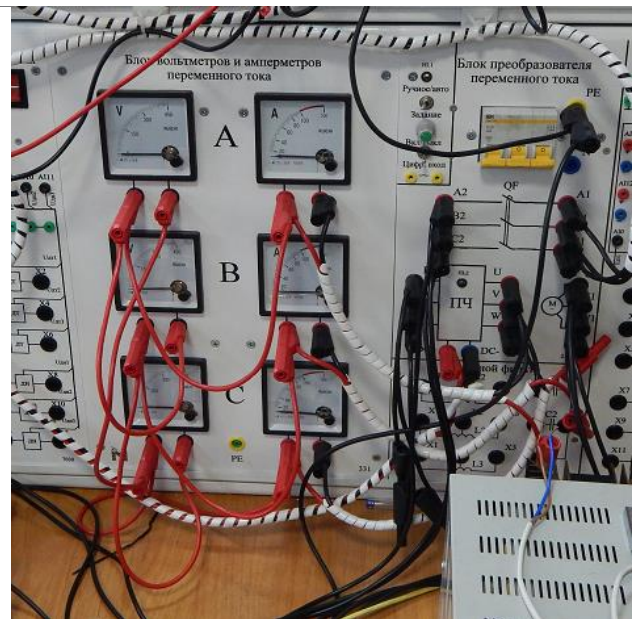


Рисунок 4.2. Внешний вид соединения ДПТ-АГ

Обе электрических машины питаются от полупроводниковых преобразователей, разработанных компанией “Мехатроника-ПРО” (рисунок 4.3).



а



б

Рисунок 4.3. Внешний вид: а – частотный преобразователь *DC-AC*;
б – панель стенда

Система управления полупроводниковыми преобразователями выполнена в программе *MexBIOS*. Особенностями данной установки является питание преобразователей от источника постоянного тока стабильного напряжения

(рисунок 4.3). Это позволяет: во-первых, при напряжении звена постоянного тока превышающем величину выпрямленного трехфазного напряжения сети считать систему генерирования автономной; во-вторых, изучить работу АГ при постоянной частоте вращения. Величина напряжения *DC*-звена влияла на формирование возбуждающего тока инвертора и, как следствие, объем реактивной энергии.

4.2 Измерительные приборы

Основным измерительным прибором экспериментальных исследований являлся анализатор качества энергии *Fluke 434 II* (рисунок 4.4), обладающий широкими функциональными возможностями анализа энергетических показателей в трехфазных системах. Анализ звена постоянного тока проводился через панель управления стендом (рисунок 4.3).



Рисунок 4.4. Внешний вид измерительного прибора *Fluke 434*

Наличие измерительного прибора *Fluke* с широкими возможностями измерения электрических параметров и прочих датчиков позволяют в экспериментальном исследовании измерять различные физические параметры:

- напряжение в звене переменного тока;

- ток генератора;
- коэффициент мощности;
- частоту вращения ротора;
- частоту генерируемого напряжения;
- величину крутящего момента;
- напряжение звена постоянного тока;
- потребляемую реактивную энергию.

Выполнение физических измерений в лабораторных условиях, соответствующих нормальным для измерительных приборов эксплуатационным условиям, позволяет пренебрегать методической и дополнительной погрешностью, учитывая только основную приборную погрешность. Погрешность измерения напряжения и тока составляет $\pm 0,5$ % от измеренного значения. Погрешность коэффициента мощности $\pm 0,1$ %. Погрешность измерения полной и реактивной мощности ± 1 %. Показание частоты вращения ротора снимались шестиканальным энкодером с 1024 метками, что соответствует 4096 импульсам за оборот. Момент нагрузки приводной машины определялся измерительным преобразователем – устройством, служащем для преобразования измеряемой величины потребляемого тока в физическую величину механического момента, при этом точность определения момента соответствует точности измерения тока.

Вторая экспериментальная установка оснащена комплексом датчиков, выводящих результат в цифровом виде в пакете *MexBIOS*. Погрешность определения положения не превышает 1 %, суммарная погрешность измеряемых электроэнергетических параметров не превышает 7 %.

Программа экспериментальных исследований не предполагает многократные измерения и определение законов распределения погрешностей измерения физических величин. Анализ полученных результатов выполнен по методу обработки прямых однократных измерений, учитывающему только основную приборную погрешность.

4.3 Ход эксперимента. Результаты.

В результате выполнения эксперимента было выявлено, что работа на нагрузку характеризуется высокими токами в момент возбуждения АГ. Исследование первой экспериментальной установки позволяет продемонстрировать работу связки частотный преобразователь – асинхронная генератор, при отсутствии в звене переменного тока нагрузки, соответствующей генерируемой мощности, приводит к перенапряжению в звене постоянного тока. В частотном преобразователе для обеспечения безопасности элементной базы звена постоянного тока применяется сбросовый резистор R_T (рисунок 4.5). Наличие сбросового резистора позволяет использовать частотный преобразователь в качестве нагрузки, преобразуя избыток электроэнергии в тепло. Отсутствие трехфазной нагрузки в явном виде не позволяет снять регулировочную характеристику, т.к. в одной ветви протекает генерируемый ток и ток возбуждения. Однако проведенное на первой экспериментальной установке исследование позволяет подтвердить явление возбуждения асинхронного генератора в составе МСГ и оценить потребляемую АГ реактивную мощность.

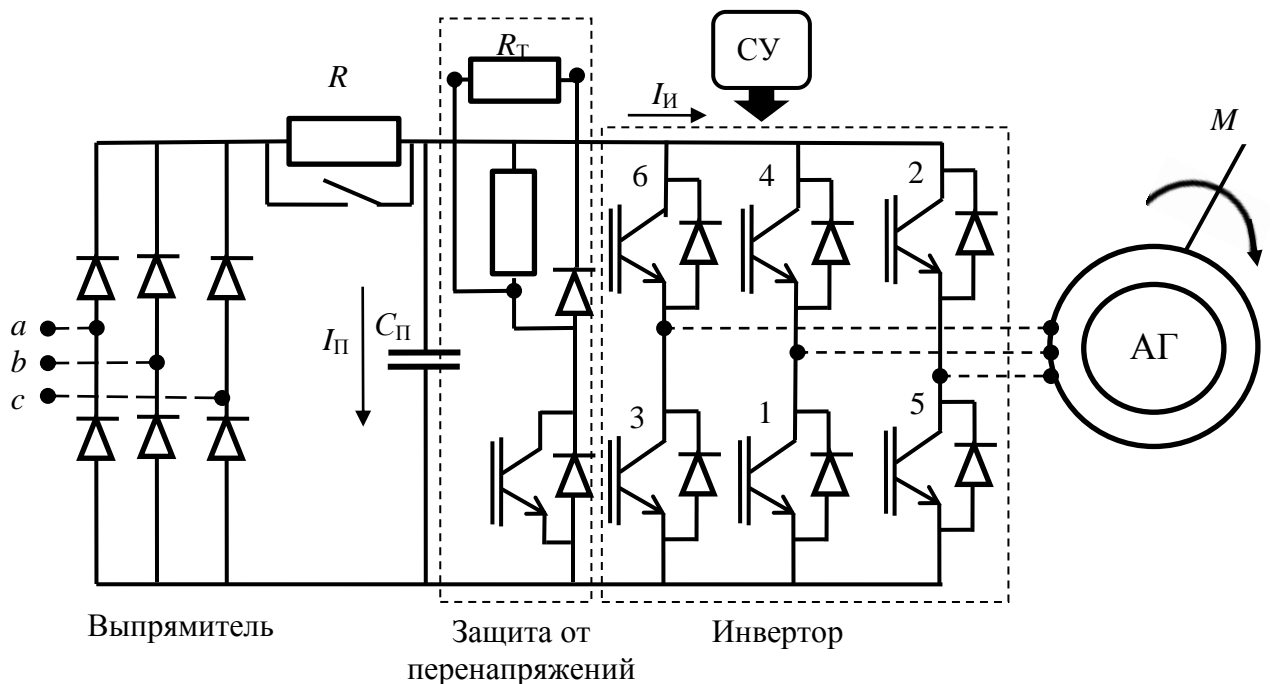


Рисунок 4.5. Функциональная схема МСГ

В результате проведенного эксперимента были получены данные, приведенные в таблице 4.2. При проведении экспериментального исследования регулирование реактивной мощностью проводилось путем изменения частоты возбуждающей энергии.

Таблица 4.2 – Результаты экспериментального исследования

Линейное напряжение генератора U_{AG} , В	357	364	367	382	396	399
Фазный ток генератора I_{AG} , А	2,3	2,5	2,8	3,0	3,2	3,6
Частота тока генератора f_{AG} , Гц	44,5	44,3	42,6	42,1	40,2	40,1
Коэффициент мощности $\cos\varphi$, о.е.	0,06	0,1	0,2	0,33	0,45	0,58
Частота вращения n , об/мин	1320	1300	1286	1275	1260	1240
Тормозной момент, создаваемый генератором M_{AG} , Н·м	0	0,2	1,5	3,1	5,2	7,5
Напряжение звена постоянного тока U_{DC} , В	531	541	745	808	809	812
Потребляемая АГ реактивная мощность, кВАр	0,48	0,5	0,52	0,56	0,58	0,62
Коэффициент интерпретации мощности PF , о.е.	-0.34	-0.36	-0.38	-0.41	-0.44	-0.46

Отрицательный коэффициент интерпретации мощности позволяет однозначно понять, что устройство генерирует мощность при наличии фазового сдвига между током и напряжением. Выходное напряжение инвертора по причине

формирования с помощью широтно-импульсной модуляции имеет форму, близкую к прямоугольной (рисунок 4.6). Возбуждение генератора приводит к изменению формы напряжения. Данное явление наблюдалось и в имитационном моделировании и отображено в ПРИЛОЖЕНИЯХ 6, 8.

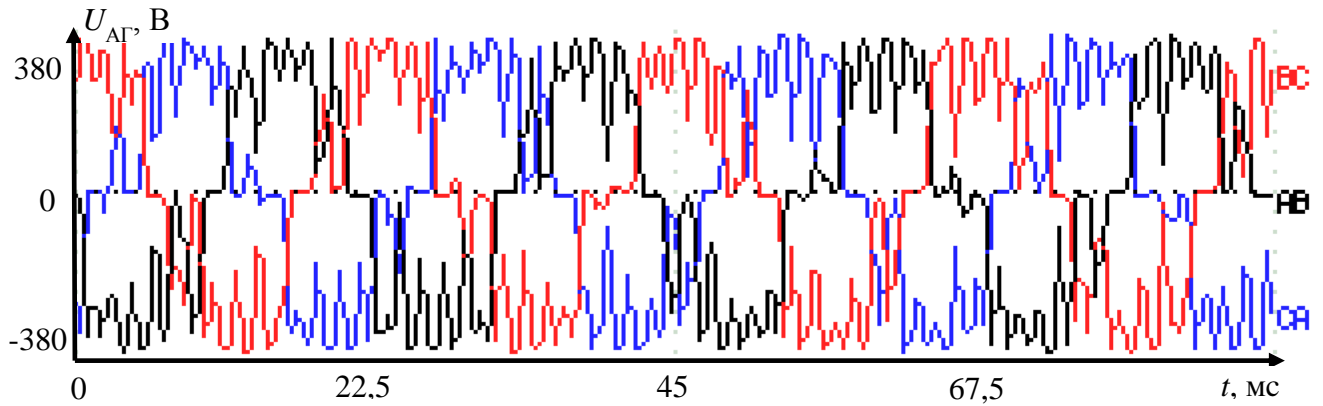


Рисунок 4.6. Осциллограмма напряжения инвертора до перехода асинхронной машины в генераторный режим

Вследствие соизмеримости мощности приводного двигателя и генератора наблюдается снижение частоты вращения по мере нагрузки АГ (рисунок 4.6), что также оказывает влияние на процесс генерирования электроэнергии.

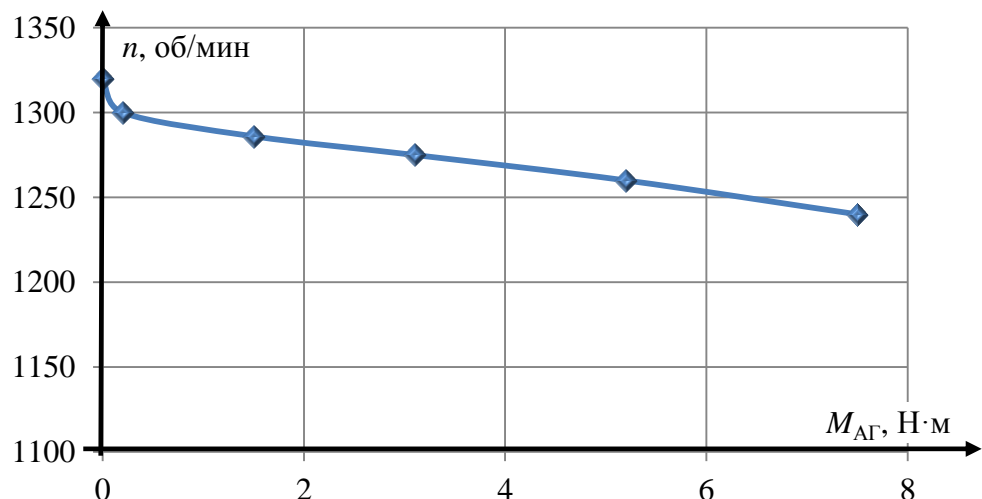


Рисунок 4.7. График зависимости скорости приводного асинхронного двигателя от тормозного момента, создаваемого генератором

Режим работы инвертора, по причине перенапряжений в звене постоянного тока, является нестабильным, что приводит к изменению реактивной мощности системы и росту напряжения в *DC* звене (рисунок 4.8).

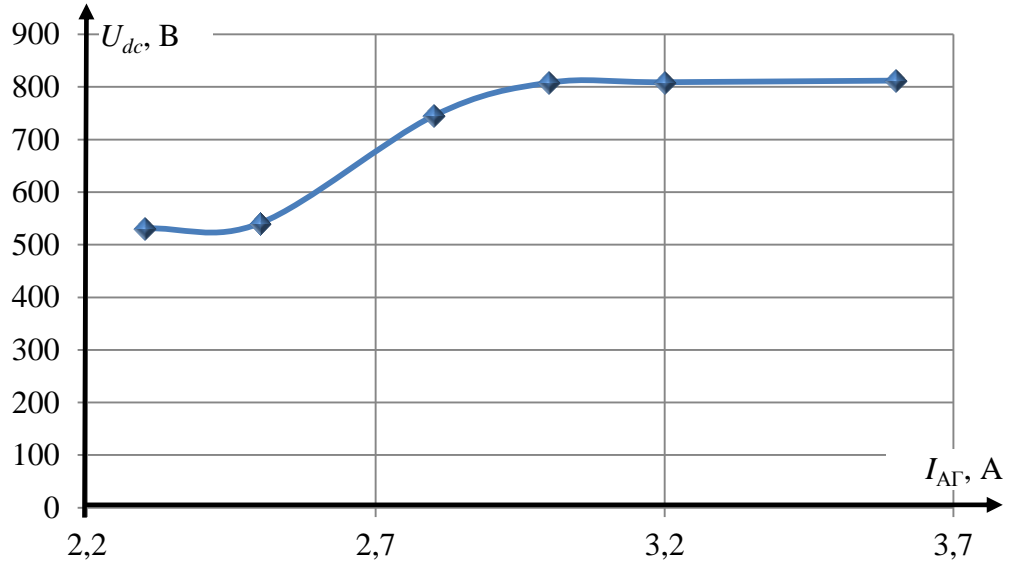


Рисунок 4.8. График зависимости напряжения в звене постоянного тока от тока генератора

Перенапряжение в звене постоянного тока позволяет нам считать систему генерирования автономной по причине закрытия диодов трехфазного выпрямителя, изолируя инвертор от сети. Избыток энергии преобразуется в тепло на сбросовом резисторе. Дополнительное питание реактивной энергией из сети произойдет только в случае перегрузки генератора, так, чтобы величина напряжения звена постоянного тока снизилась до уровня выпрямленного трехфазного напряжения генератора.

Как было отмечено выше, отсутствие нагрузки в звене постоянного тока приводит к значительному перенапряжению из-за наличия конденсатора способного аккумулировать энергию. В рабочем режиме до напряжения 809 В сбросовый резистор функционирует в режиме ШИМ, фактически преобразуя активную мощность АГ в тепло. Свыше отмеченного напряжения работа цепи сбросового резистора характеризуется релейным режимом работы, при котором

возникает модуляции выходного напряжения. Сброс энергии звена постоянного тока можно наблюдать через изменение линейного напряжения АГ на рисунке 4.9.

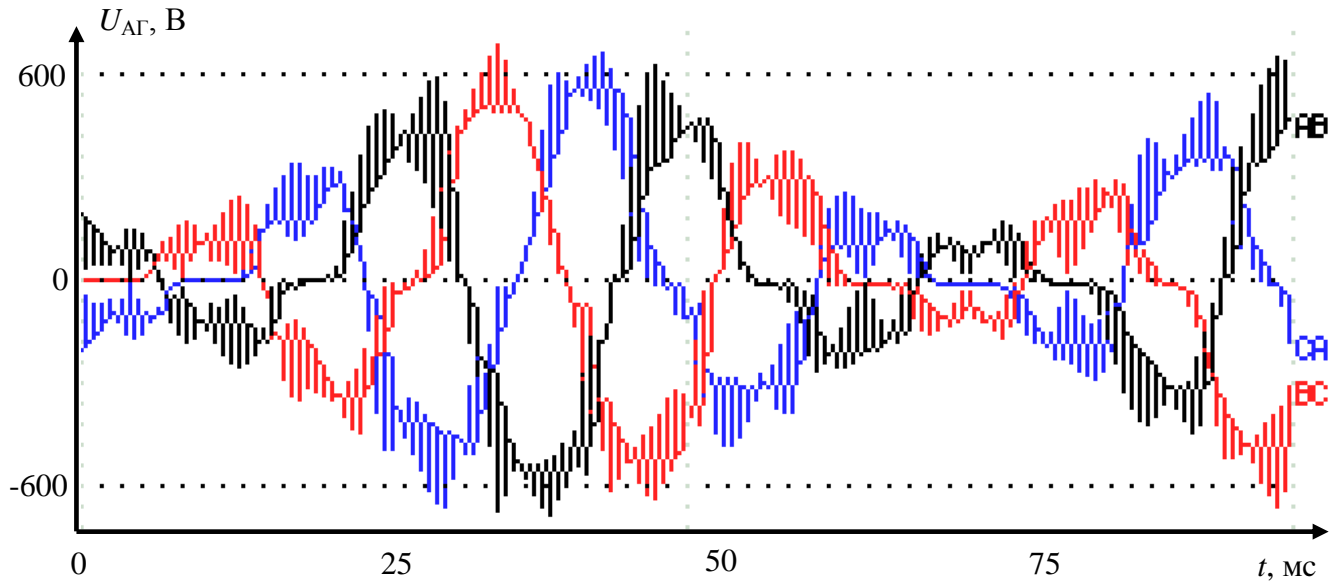


Рисунок 4.9. Осциллограмма напряжения в релейном режиме работы сбросового резистора

При отсутствии перегрузки звена постоянного тока форма генерируемого тока близка к синусоидальной (рисунок 4.10).

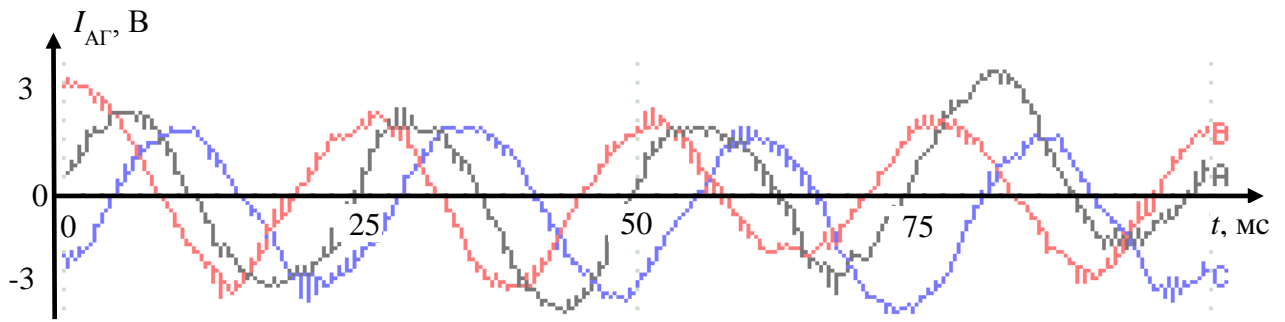


Рисунок 4.10. Осциллограмма фазного тока генератора в рабочем режиме

Проведение эксперимента на второй установке позволило подключать активную трехфазную нагрузку за счет чего исключить перенапряжение в звене постоянного тока, исследовать зависимость генерируемого напряжения от величины нагрузки и напряжения звена постоянного тока. Осциллограммы токов и напряжений при различной величине нагрузке и частоте возбуждающего тока

инвертора приведены в ПРИЛОЖЕНИИ 8, позволяют оценить влияние степени возбуждения на форму генерируемого тока и напряжения.

4.4 Апробация работы модели мехатронной системы генерирования

Отсутствие в экспериментальных установках регулятора напряжения не позволяет автоматически обеспечить жесткость внешней характеристики, сопоставимой с разработанной моделью. Для компенсации размагничивающей реакции статора, поддержания стабильного напряжения на зажимах статора при подключении активной нагрузки производилась регулировка тока инвертора (рисунок 4.11). Проверка результатов была произведена по величинам генерируемого тока, вращающего момента, потребляемой реактивной энергии и коэффициенту мощности от величины нагрузки (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Результаты экспериментального исследования и имитационного моделирования

Момент вращения, Н·м	Ток генератора I_{AG} , А		Потребляемая реактивная мощность $P_{реак}$, кВАр			Коэффициент мощности $cos\varphi$, о.е.	
	ЭИ	ИМ	ЭИ	ИМ	РЗ	ЭИ	ИМ
0	2,3	3	0,5	0,56	0,56	0,05	0,02
0,2	2,5	3	0,52	0,62	0,61	0,15	0,2
1,5	2,8	3,3	0,56	0,64	0,63	0,33	0,24
3,1	3,0	3,5	0,58	0,67	0,65	0,45	0,33
5,2	3,2	3,8	0,59	0,7	0,68	0,52	0,48
7,2	3,5	4	0,6	0,72	0,7	0,56	0,58
7,5	3,6	4,1	0,62	0,73	0,7	0,58	0,62

ЭИ – экспериментальное исследование;
ИМ – имитационное моделирование;
РЗ – рассчитанное значение по выражению (59).

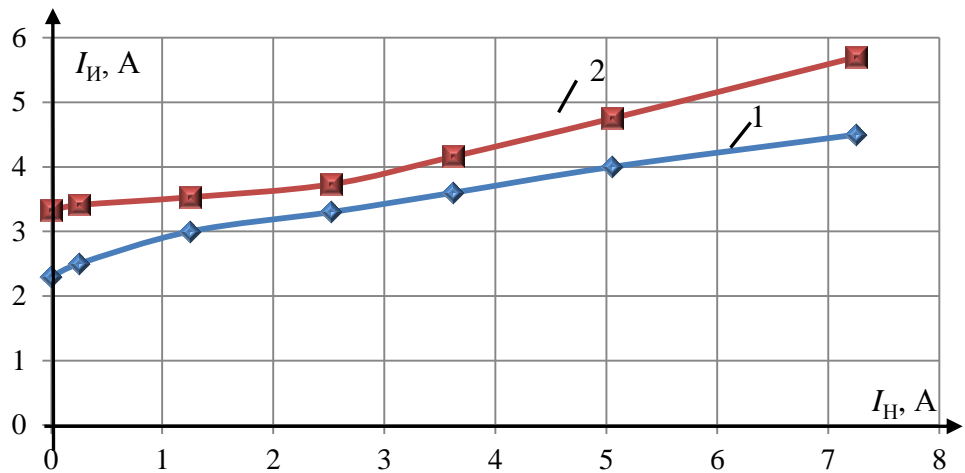


Рисунок 4.11. Регулировочная характеристика МСГ на базе АМ:
1 – экспериментальная кривая; 2 – расчетная кривая

Сопоставляя данные имитационного моделирования с результатами снятыми на экспериментальных установках, можно построить рабочие характеристики отмеченных физических величин от полезной мощности АГ. На рисунке 4.12 приведены расчетная и экспериментальная кривые коэффициента мощности. На экспериментальной установке при номинальной нагрузке не удалось достичь расчетного коэффициента мощности, тем не менее, максимальное расхождение достигается на малой нагрузке, расчетная и экспериментальная кривые пересекаются при нагрузке 40 % от номинальной мощности АМ.

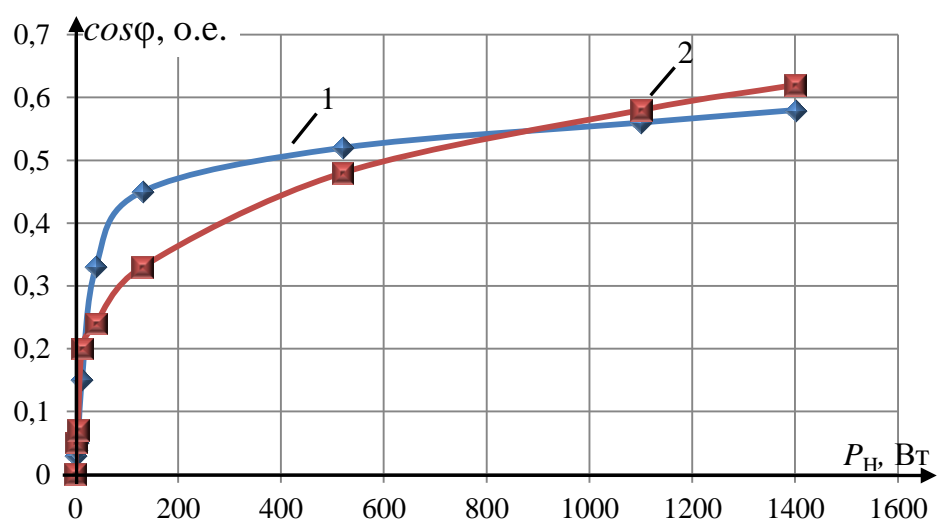
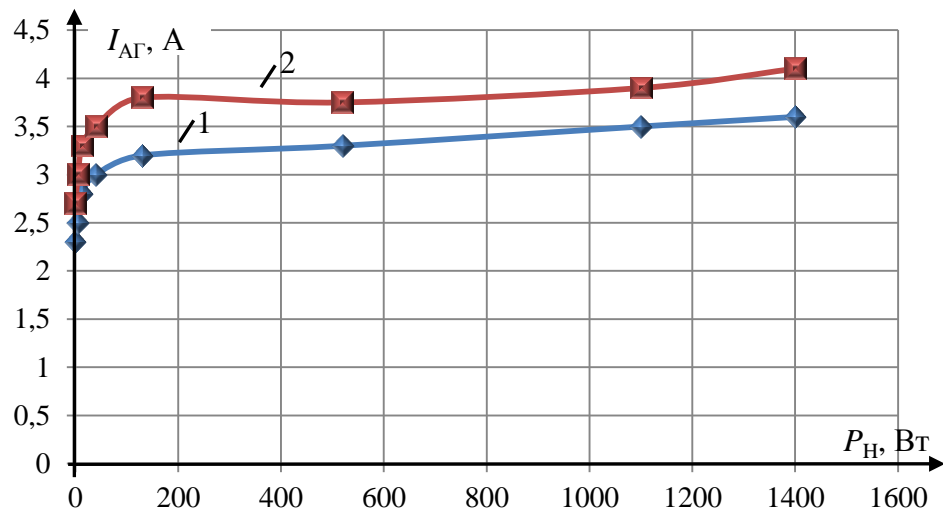
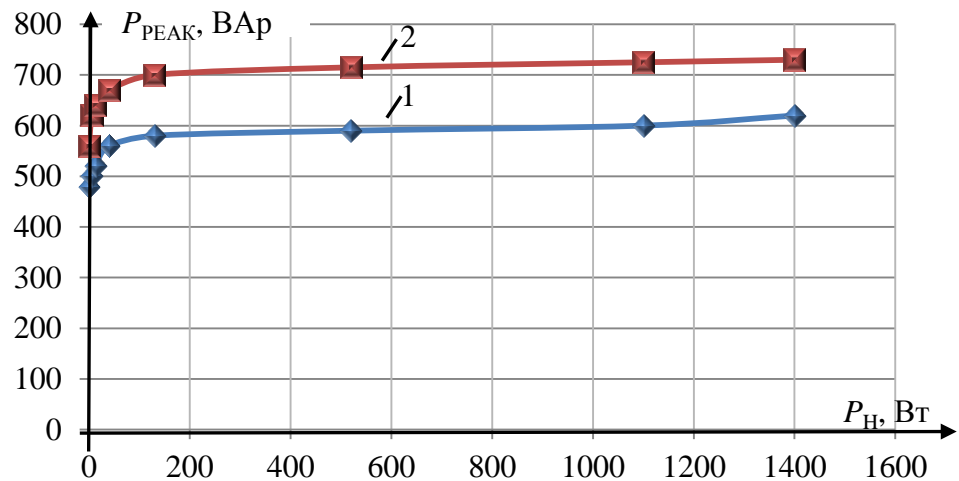


Рисунок 4.12. График зависимости коэффициента мощности от нагрузки АГ:
1 – экспериментальная кривая; 2 – расчетная кривая

Кривые тока генератора и потребляемой реактивной мощности, несмотря на некоторое расхождение, имеют схожую форму (рисунок 4.13). Отклонение остается практически неизменным во всем исследуемом диапазоне мощности, что с одной стороны свидетельствует о возможности применения разработанной имитационной модели для анализа поведения системы генерирования, с другой о недостаточной настройке имитационной модели. Полученные расхождения могут быть следствием неточности определения параметров схем замещения АМ и допущений при работе инвертора.



а



б

Рисунок 4.13. Рабочие характеристики:

а - зависимость тока генератора от нагрузки АГ;

б - зависимость потребляемой реактивной энергии от нагрузки АГ

1 – экспериментальная кривая; 2 – расчетная кривая

В связи с аддитивным характером отклонений относительная величина уменьшается с ростом величины нагрузки и находится в диапазоне от 13 до 20 %.

4.4 Выводы по главе

Получение экспериментальных результатов и сравнение с результатами, полученными из имитационной модели, позволяют сделать следующие выводы:

1. Результаты экспериментальных исследований по изучению работы МСГ на базе асинхронной машины подтвердили характер изменения электроэнергетических параметров системы при варьировании величины нагрузки в номинальном диапазоне мощности.
2. Предложенная имитационная модель с учетом принятых допущений и ограничений экспериментальной установки дает стабильную погрешность результатов. Величина абсолютной погрешности токов составляет 0,5-0,6 А, относительная не превышает 30 %. Величина абсолютной погрешности потребляемой реактивной мощности составляет 0,06-0,12 кВАр, относительная не превышает 20 %.
3. Аддитивный характер погрешности позволяет сделать заключение о неточности настройки модели МСГ и допустимом внесении поправок в результат моделирования.
4. Разработанная модель мехатронной системы генерирования на основе двухзвенного полупроводникового преобразователя может быть применена для АГ с инверторным возбуждением. Повышение степени соответствия экспериментального исследования и имитационного моделирования может быть получено путем дополнительного выявления факторов, влияющих на сходимость результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретические и экспериментальные исследования электромагнитных процессов генерирования электроэнергии в мехатронной системе на базе асинхронной машины, результаты которых изложены в диссертационной работе, позволяют сделать следующие выводы:

- 1) Процесс самовозбуждения АГ определяется явлением параметрического резонанса, причиной которого являются пульсации магнитной индукции по длине радиального воздушного зазора, а в мехатронной системе типа «АМ - АИН» этому дополнительно способствует периодическая коммутация ключей автономного инвертора. Пульсирующий характер индукции АМ является достаточным для явления самовозбуждения.
- 2) Использование методов теории автоматического управления применительно к электромеханическим системам позволяет уточнить имеющиеся условия возбуждения и показать общность процесса генерирования электроэнергии систем, построенных на электрических машинах различного типа.
- 3) Частотные методы анализа передаточной функции и полного сопротивления СГЭЭ позволяют определить частоту генерируемого напряжения и необходимую глубину модуляции индуктивности электрической машины. Использование частотного метода, помимо этого, позволяет судить об устойчивости процесса генерирования и определять границы возбуждения.
- 4) Предложенные в работе выражения для определения фазного значения емкости и реактивной мощности могут быть использованы для проектирования АГ с конденсаторным и инверторным возбуждением, в том числе для определения напряжения DC -звена. Проведенное сравнение расчетных и экспериментальных данных, даже без учета конструктивных особенностей сравниваемых асинхронных машин, работающих в режиме генератора, дает погрешность, не превышающую 10 %. Для возбуждения АГ должно выполняться условие обеспечения в переходном режиме объема реактивной энергии, соизмеримого с мощностью асинхронной машины.

- 5) Моделирование стационарных и аварийных режимов работы мехатронной системы генерирования электроэнергии показывает возможность работы при перегрузке и наличие естественной системы защиты в аварийных режимах короткого замыкания.
- 6) Применение регулятора выходного напряжения позволяет поддерживать величину частоты и напряжения на зажимах электрической машины на постоянном уровне путем изменения величины реактивной энергии, поставляемой инвертором напряжения. Регулирование частоты происходит за счет воздействия тока инвертора на индуктивность намагничивающего контура электрической машины, фактически изменяя частоту резонанса системы. При этом в МСГ при малой величине скольжения реализуется закон, близкий к $U/f = \text{const}$.
- 7) В совокупности с высокой надежностью асинхронной машины МСГ на ее основе можно рекомендовать для автономных объектов с повышенными требованиями пожаро- и взрывоопасности, безопасности при коротких замыканиях.
- 8) Результаты экспериментальных исследований подтверждают, что использование имитационной модели дает достоверную информацию о характеристиках и поведении системы при изменении нагрузки. Отклонение расчетных и экспериментальных данных показывает необходимость более точной настройки модели.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

МСГ – мехатронная система генерирования

АИН – автономный инвертор напряжения

СГЭЭ – система генерирования электроэнергии

ЭМ – электрическая машина

КПД – коэффициент полезного действия

АМ – асинхронная машина

АГ – асинхронный генератор

СГ – синхронный генератор

СГПМ – синхронный генератор с постоянными магнитами

СГГ – синхронно-гистерезисный генератор

ААГ – автономный асинхронный генератор

ХХ – холостой ход

ТАУ – теория автоматического управления

ГПТ – генератор постоянного тока

ППП – полупроводниковый преобразователь

ДУ – дифференциальные уравнения

АФЧХ – амплитудно-фазовая частотная характеристика

ЭИ – экспериментальное исследование

ИМ – имитационное моделирование

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dong Wang A Novel Stand-Alone Dual Stator-Winding Induction Generator With Static Excitation Regulation / Dong Wang, Fei Xiao, Botao Zhang, Dezhi Liu, An Hu // IEEE Transactions of Energy Conversion. – December 2005. – vol. 20, № 4. – p. 826–835.
2. Enes Goncalves Marra Self-Excited Induction Generator Controlled by a VS-PWM Bidirectional Converter for Applications / Enes Goncalves Marra, Jose Antenor Pomilio // IEEE Transactions on Industry Applications. – July/August 1999. – vol. 35, № 4. – p. 877–883.
3. Ishiguro A. A novel controll method for foprced commutated cycloconvertors using instantaneous values of input line-to-line voltages / Ishiguro A. at all // IEEE Trans on Ind. Electr. – 1991. – vol. 7, № 3.
4. Jason C. Dominic Comparison and Design of High Efficiency Microinverters for Photovoltaic Application: Master of Science in Electrical Engineering / Jason C. Dominic. – Virginia, 2014. – p. 120.
5. Malakondaiah Naidu A 4-kW 42V Induction-Machine-Based Automotive Power Generation System with a Diode Bridge Rectifier and PWM Inverter / Malakondaiah Naidu, James Walters // IEEE Transactions on Industry Applications. – September/October 2003. – vol. 39, № 5. – p. 1287–1293.
6. Morteza Soleimania Design for Reliability of Complex System with Limited Failure Data; Case Study of a Horizontal Drilling Equipment / Morteza Soleimania, Mohammad Pourgol-Mohammad // Probabilistic Safety Assessment and Management PSAM 12. – June 2014.
7. Murthy S.S., Analysis of self-excited induction generators/ S.S. Murthy, O.P. Malik // IEEE Proc. C. – 1982. – vol. 129, № 6. – p. 260–265.
8. Olorunfemi Ojo PWM-VSI Inverter-Assisted Stand-Alone Dual Stator Winding Induction Generator / Olorunfemi Ojo, Innocent Davidson // IEEE Transactions on Industry Applications. – November/December 2000. – vol. 36, № 6. – p. 1604–1611.

9. Patrick L. Jansen Transducerless Position and Velocity Estimation in Induction and Salient AC Machines / Patrick L. Jansen, Robert D. Lorenz // IEEE Transactions on Industry Applications. – March/April 1995. – vol. 31, № 2. – p. 240–247.
10. Zachepa Iurii Load Operational Modes of Autonomous Asynchronous Generator with DC Consumers / Zachepa Iurii // XIV International PhD Workshop OWD. – 2012. – p. 425–429.
11. Zachepa Iurii Research of the Operation Modes of the Autonomous Asynchronous Generator with Typical AC Customres / Zachepa Iurii // XIII International PhD Workshop OWD. – 2011. – p. 413–418.
12. Алиев, И.И. Асинхронный генератор с гарантированным самовозбуждением / И.И. Алиев, В.Я. Беспалов, Ю.Б. Клоков // Электричество. – 1997. – № 7. – С. 54–59.
13. Алиев, И.И. Динамические режимы асинхронного генератора с гарантированным самовозбуждением / И.И. Алиев // Электричество. – 2002. – № 6. – С. 37–40.
14. Архипцев, М. Г. Математическое моделирование переходных процессов в торцевом синхронном генераторе с магнитоэлектрическим возбуждением / М. Г. Архипцев // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. – 2012. – Т. 321, № 4: Энергетика. – С. 79–83.
15. Бачурин, П. А. Система генерирования электрической энергии постоянного тока на базе магнитоэлектрического генератора и активного выпрямителя / П. А. Бачурин, А. В. Гейст, Д. В. Коробков, Д. В. Макаров, А. Н. Решетников, С. А. Харитонов // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2015. – № 2 (59). – С. 43–58.
16. Беретинов, А.И. Проектирование авиационных электрических машин постоянного тока / А.И. Беретинов, Г.А. Ризник. – М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1958. – 423 с.

17. Берзан, В.П. Методология проектирования самовозбуждающегося асинхронного генератора / В.П. Берзан, А.С. Бырладян, М.С. Тыршу // Проблемы региональной энергетики. – 2012 – № 1. – С. 35–43.
18. Бертинов, А.И. Специальные электрические машины. Источники и преобразователи энергии: учебное пособие – М.: Энергоатомиздат, 1993. – ч.1. – 391 с.; ч.2. – 366 с.
19. Бирюк, Н.Д. Задача об устойчивости по Ляпунову параметрического колебательного контура / Н.Д. Бирюк, О.С. Хорпояков // Теория и техника радиосвязь. – 2015 – № 2. – С. 5–10.
20. Бирюк, Н.Д. Математическая модель параметрического контура и ее преобразования / Н.Д. Бирюк, А.Ю. Кравцов // Архивариус. – 2015 – № 3. – С. 94–98.
21. Бирюк, Н.Д. Обобщенная задача Ляпунова и ее приложение к анализу параметрического контура / Н.Д. Бирюк, А.Ю. Кравцов // Актуальные проблемы науки XXI века. – 2015. – С. 119–124.
22. Бирюк, Н.Д. Параметрический контур. Резонанс по Мандельштаму / Н.Д. Бирюк, Ю.Б. Нечаев, О.С. Хорпояков // Радиолокация, навигация, связь. – 2015. – С. 97–108.
23. Бирюк, Н.Д. Резонанс параметрического контура как обобщение резонанса обычного контура / Н.Д. Бирюк, А.Ю. Кравцов, О.С. Хорпояков // Проблемы развития современной науки. – 2016 – № 3. – С. 7–13.
24. Бирюк, Н.Д. Физическое толкование параметрического резонанса, энергетический подход / Н.Д. Бирюк, Ю.Б. Нечаев, В.Н. Финько // Вестник ВГУ. – 2005 – № 1. – С. 20–25.
25. Богомолов, С.В. Цифроаналоговая схема управления транзисторным инвертором для асинхронной двигатель-генераторной установки / С.В. Богомолов, А.И. Копылов, В.А. Прохоров, И.И. Трещев // Электрические машины специального назначения: сборник научных статей. – Куйбышев: КПТИ, 1985. – С. 104–104.

26. Бохян, С.К. Емкостное самовозбуждение асинхронного генератора / С.К. Бохян // Изв. АН СССР Энергетика и транспорт. – 1977. – № 2. – С. 39–45.
27. Бояр-Созонович, С.П. Альтернативность асинхронных генераторов с конденсаторным самовозбуждением / С.П. Бояр-Созонович // Электричество. – 1993. – № 3. – С. 24–29.
28. Брускин, Д.Э. Генераторы, возбуждаемые переменным током: учебное пособие для вузов / Д.Э. Брускин – М.: Высш. школа, 1974. – 128 с.: ил.
29. Бутиков, Е.И. Маятник с модулируемой длиной l . Параметрический резонанс / Е. И. Бутиков // Компьютерные инструменты в образовании. – 2013. – № 3. – С. 33–44.
30. Бутиков, Е.И. Маятник с модулируемой длиной. Области параметрического возбуждения / Е. И. Бутиков // Компьютерные инструменты в образовании. – 2013. – № 4. – С. 21–37.
31. Бутиков, Е.И. Параметрический резонанс / Е. И. Бутиков // Компьютерные инструменты в образовании. – 2009. – № 3. – С. 18–36.
32. Бутиков, Е.И. Параметрический резонанс / Е. И. Бутиков // Компьютерные инструменты в образовании. – 2007. – № 3. – С. 22.
33. Бутиков, Е.И. Параметрический резонанс при плавной модуляции параметра / Е. И. Бутиков // Компьютерные инструменты в образовании. – 2010. – № 1. – С. 37–53.
34. Бырладян, А.С. Асинхронная машина с массивным ферромагнитным ротором и конденсаторным возбуждением / А.С. Бырладян // PROBLEMELE ENERGETICE REGIONALE. – 2010 – № 1. – С. 35–40.
35. Важнов, А.И. Переходные процессы в машинах переменного тока / А.И. Важнов – Л.: Энергия, 1980. – 256 с.
36. Важнов, А.И. Электрические машины / А.И. Важнов. – Л.: Энергия, 1969. – 768 с.
37. Веников, В.А. Самовозбуждение и самораскачивание в электрических системах / В.А. Веников, Н.Д. Анисимова, А.И. Долгинов, Д.А. Федоров. – М.: Высшая школа, 1964. – 197 с.

38. Волгин, В.Н. Исследование динамических режимов работы асинхронного вентильного генератора / В.Н. Волгин, П.Ю. Грачев, С.А. Бурков // Электрические машины специального назначения: сборник научных статей. – Куйбышев: КПТИ, 1985. – С. 48–57.
39. Вольдек, А.И. Электрические машины. Переменного тока: учебник для вузов / А.И. Вольдек, В.В. Пережирова. – СПб.: Питер, 2010. – 350 с., ил.
40. Вольдек, А.И. Электрические машины: учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений – 3-е изд., перераб. / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с., ил.
41. Гарганеев, А.Г. О самовозбуждении электрических машин с позиций теории автоматического управления / А. Г. Гарганеев, Д.А. Падалко // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2016. – № 2. – С. 94–98.
42. Гарганеев, А.Г. Перспективы развития мехатронных систем с синхронно-гистерезисными электрическими машинами/ А. Г. Гарганеев, Д.А. Падалко, А.В. Черватюк // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2014. – № 2. – С. 308–314.
43. Гентковски, З. Процессы и характеристики автономных асинхронных генераторов с полупроводниковыми регуляторами: диссертация док. тех. наук: 05.09.01 / Гентковски Здислав. – СПб., 2000. – 255 с.
44. ГОСТ 11828-86 Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний – Введ. 1987-07-01. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – с. 39.
45. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения – Введ. 2014-17-01. – М.: Стандартинформ, 2014. – с. 16.
46. ГОСТ 7217-87 Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний – Введ. 1988-01-01. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – с. 49.

47. Данку, А. Электрические машины: сборник задач и упражнений. Пер. с венг. / А. Данку, Ф. Фаркаш, Л. Надь. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 360 с.: ил.
48. Дворецкий, С.И. Основы математического моделирования и оптимизации процессов и систем очистки и регенерации воздуха: учебное пособие / С.И. Дворецкий, С.В. Матвеева, С.Б. Путин, Е.Н. Туголуков. – Тамбов: Изд-во Тамб. Гос. Техн. Ун-та, 2008. – 324 с.
49. Джендубаев, А.-З.Р. Автономный асинхронный генератор с двумя обмотками статора и конденсаторным самовозбуждением: диссертация канд. тех. наук: 05.09.01 / Джендубаев Абрек-Заур Рауфович. – М., 1991. – 141 с.
50. Джендубаев, А.-З.Р., Автономные асинхронные генераторы с конденсаторным самовозбуждением: развитие теории и практики: диссертация док. тех. наук: 05.09.01 / Джендубаев Абрек-Заур Рауфович. – Черкесск, 2006. – 365 с.
51. Джендубаев, А.-З.Р. Асинхронный сварочный генератор / А.-З.Р. Джендубаев // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2005. – № 2. – С. 71–80.
52. Джендубаев, А.-З.Р. Конденсаторное самовозбуждение автономного асинхронного вентильного генератора с двумя обмотками статора / А.-З.Р. Джендубаев // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2003. – № 3. – С. 114.
53. Джендубаев, А.-З.Р. Моделирование асинхронного генератора и машины двойного питания с конденсаторным возбуждением / А.-З.Р. Джендубаев, Р.Ю. Барахоев, З.А.-З. Джендубаев // Электричество. – 2013. – № 7. – С. 46–51.
54. Джендубаев, А.-З.Р. Особенности самовозбуждения автономных генераторов. Ч. 1. Общие вопросы. Генератор постоянного тока / А.-З.Р. Джендубаев // Электричество. – 2006. – № 11. – С. 53–59.
55. Джендубаев, А.-З.Р. Особенности самовозбуждения автономных генераторов. Ч. 2. Асинхронный генератор / А.-З.Р. Джендубаев // Электричество. – 2006. – № 12. – С. 25–31.

56. Доливо-Добровольский, М.О. Современное развитие техники трехфазного тока / М.О. Доливо-Добровольский // Труды I Всерос. электротехн. съезда. – 1900.
57. Зверев, Ф. П. Некоторые результаты экспериментального исследования автономного источника импульсной мощности с индуктивно-емкостным преобразователем / Ф. П. Зверев, Г. А. Сипайлов, А. Б. Цукублин // Известия Томского политехнического института [Известия ТПИ]. – 1971. – Т. 212 : Электрические машины. – С. 479–483.
58. Зубков, Ю. Д. Асинхронные генераторы с конденсаторным возбуждением / Ю.Д. Зубков. – Алма-Ата: Шд-ъо АН Каз. ССР. – 1949. – 112с.
59. Иванов-Смоленский, А.В. Электрические машины: учебник для вузов / А.В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия, 1980. – 928с., ил.
60. Ильченко, Я.А., Асинхронный генератор с улучшенными эксплуатационными характеристиками для электротехнологических установок при производстве прудной рыбы: диссертация канд. тех. наук: 05.20.02 / Ильченко Яков Андреевич. – Краснодар, 2012. – 162 с.
61. Казовский, Е.Я. Переходные процессы в синхронных машинах при аномальных режимах в энергосистеме / Е.Я. Казовский, Г.В.Рубисов. – СПб.: Наука, 1994. – 172 с.
62. Казовский, Е.Я. Современные методы рассмотрения переходных процессов в электрических машинах переменного тока / Е.Я. Казовский, М.П. Костенко // Известия Академии наук СССР: Отделение технических наук. Энергетика и автоматика. – 1959. – С. 11.
63. Каримов, А.Х. О параметрическом самовозбуждении асинхронного генератора / А.Х. Каримов, Хо Тхань Хиен // Электротехника. – 1992. – № 6. – С. 5–7.
64. Китаев, А.В. О физическом механизме самовозбуждения асинхронной машины / А.В. Китаев, И.Н. Орлов // Электричество. – 1978. – № 4. – С. 47–52.

65. Кицис, С. И. Расчет стационарных режимов асинхронного генератора с обмоткой подмагничивания, присоединенной к выводам обмотки статора / С. И. Кицис, Ф. М. Амброс // Электричество. – 1978. – № 5. – С. 28–31.
66. Кицис, С.И. Асинхронные самовозбуждающиеся генераторы: учебник для вузов / С.И. Кицис. – М: Энергоатомиздат, 2003. – 328 с.
67. Кицис, С.И. Асинхронный самовозбуждающийся генератор в системе защиты детандера от разноса / С.И. Кицис // Электротехника. – 1980. – № 12. – С. 18–20.
68. Кицис, С.И. К анализу статики асинхронного самовозбуждающегося генератора с учетом влияния нагрузки / С.И. Кицис // Изв. АН СССР Энергетика и транспорт. – 1974. – № 4. – С. 135–140.
69. Кицис, С.И. Об одной форме записи уравнений асинхронной машины с параллельно включенными конденсаторами / С.И. Кицис // Изв. вузов. Энергетика. – 1981. – № 2. – С. 35–41.
70. Кицис, С.И. Особенности конструирования и расчета погружных асинхронных самовозбуждающихся генераторов / С.И. Кицис // Электротехника. – 1986. – № 11. – С. 36–37.
71. Кицис, С.И. Переходные процессы в асинхронном самовозбуждающемся генераторе при трехфазном коротком замыкании / С.И. Кицис // Электричество. – 1980. – № 10. – С. 23–29.
72. Кицис, С.И. Переходные процессы емкостного самовозбуждения асинхронного генератора под нагрузкой / С.И. Кицис // Изв. АН СССР Энергетика и транспорт. – 1977. – № 4. – С. 27–41.
73. Кицис, С.И. Расчет стационарных режимов асинхронного генератора с обмоткой подмагничивания, присоединенной к выводам обмотки статора / С.И. Кицис, Ф.М. Амброс // Электричество. – 1978. – № 5. – С. 43–49.
74. Кицис, С.И. Режимы установившегося самовозбуждения асинхронного генератора / С.И. Кицис // Электричество. – 2004. – № 2. – С. 64–67.

75. Кононенко, Е.В. Электрические машины. Специальный курс.: учебное пособие для вузов / Е.В. Кононенко, Г.А. Сипайлов, Н.А. Хорьков – М.: Высш. школа, 1975. – 279 с.: ил.
76. Коршунов, А.И. Исследование условий самовозбуждения асинхронного генератора / А.И. Коршунов // Электротехника. – 2015 – № 4. – С. 27–33.
77. Костырев, М.Л. Алгоритм проектирования асинхронных генераторов с вентильным возбуждением для автономных объектов / М.Л. Костырев, Н.В. Мотовилов, А.А. Дружков // Электротехника. – 1986. – № 7. – С. 32–35.
78. Костырев, М.Л. Электрическая мощность серийного асинхронного двигателя при его использовании в качестве асинхронного генератора / М.Л. Костырев, А.З.-Р. Джендубаев // Электротехника. – 2008. – № 7. – С. 6–10.
79. Костырев, М.Л. Электрические машины. Специальный курс: учебное пособие / М.Л. Костырев – Куйбышев: КПТИ, 1974. – 83 с.
80. Кравчик, А.Э. Справочник. Асинхронные двигатели серии 4А / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982. – 503 с.
81. Кунцевич, П.А. Асинхронный резонансный генератор как автоперестраиваемая автоколебательная система: диссертация канд.тех. наук: 05.09.01 / Кунцевич Петр Антонович. – Куйбышев, 1988. – 188 с.
82. Лищенко, А.И. Асинхронные машины с массивным ферромагнитным ротором: учебник / А. И. Лищенко, В.А. Лесник. – Киев: Наукова думка, 1984. – 168 с.
83. Лукутин, Б.В. Автономное электроснабжение от микрогидростанций: монография / Б.В. Лукутин, С.Г. Обухов, Е.Б. Шандарова. – Томск: Изд-во ТПУ, 2001. – 134 с.
84. Лукутин, Б.В. Режимы работы синхронного генератора инверторной дизельной электростанции / Б.В. Лукутин, Е.Б. Шандарова // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 3. – С. 613–617.
85. Лютер, Р.А. Теория переходных режимов синхронных машин с применением операторного анализа / Р.А. Лютер. – Л.: ГЭИ, 1939. – 274 с.

86. Макеев, М.С. Алгоритм расчета параметров схем замещения асинхронного двигателя по каталожным данным / М.С. Макеев, А.А. Кувшинов // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2013г. – № 1. – С. 108–112.
87. Маклаков, А.С. Энергосберегающий электропривод на базе двухзвенного преобразователя частоты с активным выпрямителем и автономным инвертором напряжения / А.С. Маклаков, В.Р. Гасияров, А.В. Белый // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2014 – № 1. – С. 23–30.
88. Малышков, Г.М. Выбор параметров однозвенного фильтра инвертора при широтно-импульсном регулировании ступенчатого напряжения / Малышков Г.М., Хрунова С.С. // – ЭТВА. – 1985. – Вып.16. – С.126 – 133.
89. Малышков, Г.М. Выходные фильтры простейших инверторов - ЭТВА / Под ред. Ю.И. Конева. – М.: Советское радио. – 1978. – Вып.10. – 178–185 с.
90. Мандельштам, Л.И. О параметрическом возбуждении электрических колебаний / Л.И Мандельштам, Я. Д. Папалекси // Журнал технической физики. – Том IV, вып. 1. – 1934 г. – С. 335–352.
91. Мандельштам, Л.И. О резонансных явлениях при делении частоты / Л.И Мандельштам, Я. Д. Папалекси, // УФН 93. – 1967. – С. 363–383.
92. Мандельштам, Л.И. Оригинальные работы о параметрическом возбуждении электрических / Л. И. Мандельштам, Я. Д. Папалекси // Журнал технической физики. – Том IV, вып. 1. – 1934. – С. 352–367.
93. Мандельштам, Л.И. Полное собрание трудов / Л.И. Мандельштам под ред. С.М. Рытова. – М.: Изд-во Академии наук СССР . – 1947 . – 396 с.
94. Медведев, М.Ю. Автономные управляемые ветроэнергетические установки / М.Ю. Медведев, В.И. Борзов, В.Х. Пшихопов // Известия ТРТУ. –2006. – № 3. – С. 202–207.
95. Медведев, М.Ю. Оценка возмущений в процессе автоматического регулирования синхронного генератора / М.Ю. Медведев, В.А. Шевченко // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 4. – С. 613–617.

96. Нетушил, А.В. К расчету режимов самовозбуждения автономного асинхронного генератора / Нетушил А.В. // Электричество. – 1978. – № 4. – С. 52–54.
97. Нетушил, А.В. Самовозбуждение асинхронного генератора / А.В. Нетушил, С.П. Бояр-Созонович, А.В. Китаев // Изв. вузов. Электромеханика. – 1981. – № 6. – С. 613–617.
98. Нетушил, А.В., Листвии В.С. Автономный асинхронный генератор как нелинейная автоколебательная система / А.В. Нетушил, В.С. Листвии // Изв. вузов Электромеханика. – 1977. – № 5. – С. 500–505.
99. Новиков, А.В., Кюрегян С.Г. Емкостное самовозбуждение асинхронного генератора / А.В. Новиков, С.Г. Кюрегян // Изв. вузов. Электромеханика. – 1967. – № 2. – С. 173–179.
100. Оберган, Э. Ф. Синхронный генератор с регулированием частоты посредством полупроводникового коллектора / Э. Ф. Оберган, А. И. Скороспешкин // Известия Томского политехнического института [Известия ТПИ]. – 1966 г. –Т. 145: Электрические машины. – С. 104–111.
101. Обухов, С.Г. Характеристики синхронного генератора, работающего в составе инверторной дизельной электростанции / С.Г.Обухов, Н.Ю. Сипайлова, И.А. Плотников, А.Г. Сипайлов // Известия вузов. Электромеханика / Южно-Российский государственный технический университет [ЮРГТУ (НПИ)]. – 2012. – № 5. – С. 41–45.
102. Падалко, Д.А. Методология способов анализа электромеханических систем / Д.А. Падалко // Вестник Кузбасского государственного технического университета: научно-технический журнал. – 2016. – № 1. – С. 104–110.
103. Падалко, Д.А. Явление параметрического резонанса в асинхронных генераторах / Д.А. Падалко // Электротехнические системы и комплексы / Магнитогорский государственный технический университет. – 2016. – № 3 (32). – С. 10–14.
104. Папалекси, Н.Д. Эволюция понятия резонанса / Н.Д. Папалекси // Успехи физических наук. – 1947г. – № 4 – С. 447–460.

105. Пат. 469200 Российская федерация, М. Кл. H02P9/46. Устройство для автоматической стабилизации напряжения автономного асинхронного генератора / Галкин М.П., Симатов В.А.; заявитель и патентообладатель: Галкин М.П., Симатов В.А.; – № H02P9/46; заявлен. 30.04.1975; опубл. 22.07.1975.
106. Паутов, Д.Н. Сварочный асинхронный самовозбуждающийся генератор с двумя распределенными обмотками на статоре: диссертация канд. тех. наук: 05.09.01 / Паутов Дмитрий Николаевич. – Тюмень, 2010. – 118 с.
107. Пережиров, Ю.И. Асинхронный трехфазный генератор импульсной мощности: диссертация канд. тех. наук: 05.09.03 / Пережиров Ю.И. – Томск, 1974. – 196 с.
108. Попов, А.Ю. Асинхронный генератор с улучшенными эксплуатационно-техническими характеристиками для автономных систем электроснабжения: диссертация канд. тех. наук: 05.09.03 / Попов Андрей Юрьевич. – Краснодар, 2012. – 157 с.
109. Постников. И.М. Обобщенная теория и переходные процессы электрических машин: учебник для вузов / И.М. Постников. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1975. – 319 с.: ил.
110. Пустоветов, М.Ю. Математическая и компьютерная модели асинхронного двигателя в трехфазной системе координат / М.Ю. Пустоветов // Электричество. – 2013 – № 7. – С. 41–46.
111. Пятибратов, Г.Я. Математические модели и идентификация электромеханических систем / Г.Я. Пятибратов, Д.В. Барыльник, Н.А. Сухенко – Новочеркасск: ЮРГПУ, 2014. – 76 с.
112. Пятибратов, Г.Я., Барыльник Д.В. Моделирование электромеханических систем: учеб. пособие / Г.Я. Пятибратов, Д.В. Барыльник. – Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т. – Новочеркасск: ЮРГПУ, 2013. –103 с.
113. Решетов, С. А. Электрооборудование воздушных судов : учеб. для вузов гражд. авиации / С. А. Решетов, Н. Г. Попович, С. П. Кононов; под ред. С. А. Решетова. – М.: Транспорт, 1991. – 318 с.: ил.

114. Романов, Ю.А. Анализ работы асинхронного ударного генератора с применением АВМ / Ю.А. Романов, Г.А. Сипайлов // Известия ТПИ. – 1971 – Т. 212. – С. 43–48.
115. Свит, П.П. Определение параметров схем замещения асинхронных двигателей небольшой мощности / П.П. Свит, Б.В. Семкин // Ползуновский альманах. – 2004г. – № 3 – С. 96–99.
116. Сергиенко, С. А. Метод расчет статических характеристик асинхронного генератора с емкостным возбуждением / С. А. Сергиенко, Ю. В. Зачепа // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2012. – № 5. – С. 57–66.
117. Сеницын, А.В. Асинхронный генератор на две частоты тока для мобильных установок сельскохозяйственного производства: диссертация канд. тех. наук: 05.20.02 / Сеницын Андрей Васильевич. – Краснодар, 2008. – 170 с.
118. Сипайлов, Г. А. Некоторые особенности конденсаторного самовозбуждения однофазных асинхронных машин / Г. А. Сипайлов, Ю. А. Романов, Ю. И. Пережиров // Известия Томского политехнического института. – 1973. – Т. 265: Электрические машины и аппараты. – С. 33–37.
119. Сипайлов, Г.А. Математическое моделирование электрических машин / Сипайлов Г.А., Лоос А.В. – М.: Высшая школа, 1980. – 176 с.
120. Сипайлов, Г.А. Некоторые особенности моделирования импульсного режима работы трехфазного асинхронного генератора / Г. А. Сипайлов // Известия Томского политехнического института [Известия ТПИ]. – 1974. – Т. 284: Электрические машины. – С. 20–25.
121. Соболев, А.Н. Защита автономных асинхронных генераторов сельскохозяйственного назначения от витковых коротких замыканий: диссертация канд. тех. наук: 05.20.02 / Соболев Александр Николаевич. – Краснодар, 2010. – 153 с.
122. Соловьева, Е.П. Качественное исследование дифференциальных уравнений асинхронных электрических машин: диссертация канд. тех. наук: 01.01.02 / Соловьева Елена Павловна. – СПб., 2012. – 117 с.

123. Сыромятников, И.А. Режимы работы асинхронных двигателей: учебник для вузов / И.А. Сыромятников. – М: Госэнергоиздат, 1950. – 239 с.: ил.
124. Тазов, Г.В. Автоматизированное проектирование электрических машин малой мощности: учебное пособие для вузов / Г.В. Тазов, В.В. Хрущев. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 336 с.: ил.
125. Тарпанов, И.А. Автономные асинхронные генераторные комплексы переменной частоты вращения: диссертация канд. тех. наук: 05.09.03 / Тарпанов Илья Александрович. – Нижний Новгород, 2012. – 120 с.
126. Уайт, Д. Электромеханическое преобразование энергии / Д. Уайт, Г. Вудсон – М.: Издательство “Энергия”, 1964. – с. 528.
127. Усольцев, А.А. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по справочным данным [электронный ресурс] / Усольцев А.А. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – Режим доступа: http://ets.ifmo.ru/usolzev/wopros/op_ad.pdf
128. Фельзинг, А.П. Автономный источник питания / А.П. Фельзинг, Ю.В. Зубков, М.И. Гроссман // Электрические машины специального назначения: сборник научных статей. – Куйбышев: КПТИ, 1985. – С. 97–104.
129. Фильц, Р. В. Дифференциальные уравнения напряжений насыщенных неявнополюсных машин переменного тока / Р. В. Фильц // Изв. вузов. Электротехника. – 1966. – № 11. – С. 1195 – 1203.
130. Фильц, Р. В. Математические основы теории электромеханических преобразователей Р. В. Фильц. – Киев: Наукова думка, 1979. – 208 с.
131. Харитонов, С.А. К вопросу стабилизации напряжения синхронного генератора с постоянными магнитами при переменной частоте вращения/ Харитонов С.А., Симонов Б.Ф., Коробков Д.В., Макаров Д.В // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012. – № 4. – С. 102–115.
132. Харитонов, С.А. Стабилизация напряжения синхронного генератора с постоянными магнитами при переменной нагрузке / Харитонов С.А., Коробков Д.В., Макаров Д.В., Гарганеев А.Г. // Доклады Томского

- государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2012. – № 1. – С. 139–146.
133. Хейгеман, Л. Прикладные итерационные методы / Л. Хейгеман, Д. Янг – М.: Мир, 1986. – 438с.
134. Цукублин, А.Б. Вентильные электрические машины: учебное пособие / А.Б. Цукублин, Б.В. Лукутин – Томск: изд. ТПИ им. С.М. Кирова, 1984. – 94 с.
135. Чернышев, А. С. Разработка источника бесперебойного питания на базе асинхронной машины с инерционным накопителем энергии: автореферат, дис. канд. техн. Наук / Чернышев Александр Савельевич – М., 1988. – 20с.
136. Чучалин, А. И. Исследования импульсного индукторно-компрессионного генератора / А. И. Чучалин, И. О. Муравлев, И. А. Сафьянников // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. – 2004. – Т. 307, № 3. – С. 126–131.
137. Шевченко, В.В. Анализ возможности использования разных типов генераторов для ветроэнергетических установок с учетом диапазонов мощности / В.В. Шевченко, Я.Р. Кулиш // Вестник НТУ ХПИ. – 2013. – № 65. – С. 1–9.
138. Шрейнер, Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р. Т. Шрейнер. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
139. Штанов, А.Н. Асинхронные вентильные генераторы для малых гидроэлектростанций / А.Н. Штанов, Н.В. Мотовилов, Ю.И. Нашницын // Электрические машины специального назначения: сборник научных статей. – Куйбышев: КПТИ, 1985.– С. 88–96.
140. Щумов, Ю. Н. К расчету внешних характеристик автономного асинхронного генератора / Ю.Н. Щумов // Изв. вузов. Электромеханика. – 1978. – № 7. – С. 787–789.
141. Эпштейн, И. И. Автоматизированный электропривод переменного тока / И. И. Эпштейн. – М.: Энергоиздат, 1982. – 192 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Листинг функции системы дифференциальных уравнений (32) АМ

```
function dy = modelAD2(t,y)
dy = zeros(10,1); % вектор

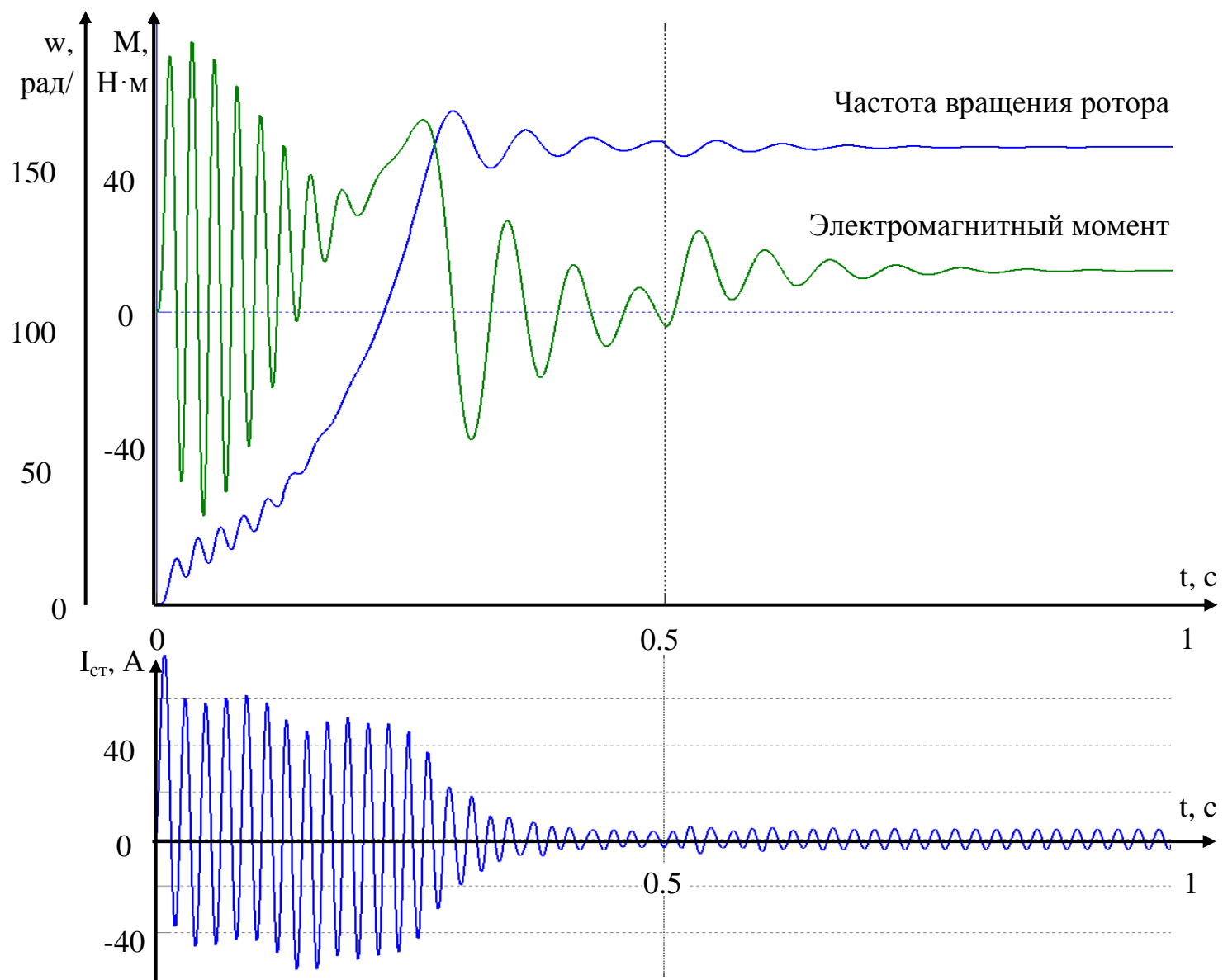
% задаем параметры АГ
Rr; % активное сопротивление ротора;
Rs; % активное сопротивление статора;
Xs; % индуктивное сопротивление обмоток статора
Xr; % индуктивное сопротивление обмоток ротора
Xm; % индуктивность намагничения
wr; % угловая скорость
J; % момент инерции АГ
D; % полный коэффициент рассеяния
Ua; % альфа Напряжение
Ub; % бетта Напряжение
Mmex; % Внешний тормозящий момент
% окончание задания параметров
t_nabp = 0.5 ; % Время наброса статического момента
tspan = 0:0.001: 1.5; % Время начала расчета. Шаг вывода.

dy(1) = Ua- Rs*y(5); % y1 - альфа потокосцепление
dy(2) = Ub- Rs*y(6); % y2 - бетта потокосцепление
dy(3) = -Rr*y(7)+wr*y(4); %y3 - альфа потокосцепление ротора
dy(4) = -Rr*y(8)-wr*y(3); %y4 - бетта потокосцепление ротора
dy(5) = y(1)/(Xs*D) - Xm*y(3)/(D*Xr*Xs); %y5 - альфа ток статора
dy(6) = y(2)/(Xs*D) - Xm*y(4)/(D*Xr*Xs); %y5 - бетта ток статора
dy(7) = y(3)/(Xr*D) - Xm*y(1)/(D*Xr*Xs); %y5 - альфа ток ротора
dy(8) = y(4)/(Xr*D) - Xm*y(2)/(D*Xr*Xs); %y5 - бетта ток ротора
dy(9) = (y(10) - Mmex)/J; %y9 - скорость
dy(10) = 3*Xm*(y(7)*y(6)-y(5)*y(8))/2; % y10 - электромеханический
момеНТ
end
```

Выполняемые команды

```
options = odeset('RelTol',1e-4,'AbsTol',[1e-4 1e-4 1e-5 1e-4 1e-4 1e-5
5 1e-4 1e-4 1e-5 1e-5]); % Задание точности
[T,Y] = ode45(@modelAD2,[0 5],[0 0 0 0 0 0 0 0 0 0],options); %
Начальные условия
plot(T,Y(:,1),'-',T,Y(:,2),'-
',T,Y(:,3),'.',T,Y(:,4),'.',T,Y(:,5),'.',T,Y(:,6),'.',T,Y(:,7),'.',T,
Y(:,8),'.',T,Y(:,9),'.',T,Y(:,10),'.'); % Вывод результата
```


Результат решения системы ДУ асинхронной машины



ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Листинг функции системы дифференциальных уравнений (36)

АГ с конденсаторным возбуждением

```
function dy = modelAG(t,y)
dy = zeros(9,1); % вектор

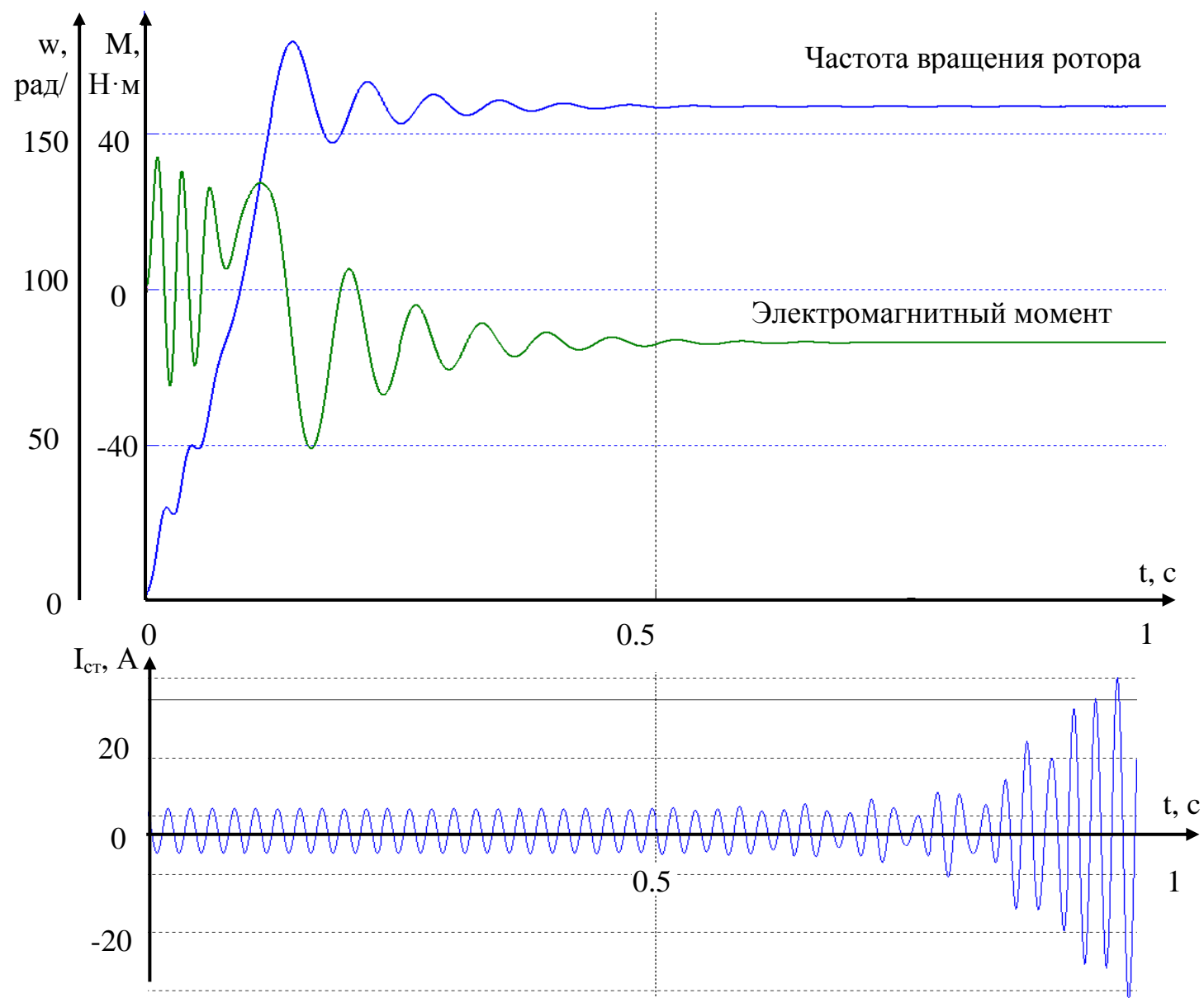
% задаем параметры АГ
rs; % Сопротивление статора
rr;% сопротивление ротора
Tr; % Относительный параметр реактивного сопротивления
Rset; %Сопротивление сети
Wdpt; %Угловая скорость якоря (Скорость вращения ДПТ)
Ls; % индуктивное сопротивление обмоток статора
w; %угловая скорость
p; %число полюсов
kr; % коэффициент
rn; % сопротивление нагрузки
C; % емкостное сопротивление конденсатора
ica; % альфа ток конденсатора
icb; % бетта ток конденсатора
Jag;% момент инерции АГ
% окончание задания параметров

dy(1) = (y(5)/Ls - rs*y(4)/Ls + kr*y(3)/(Ls*Tr) + kr*p*w*y(4)/Ls);
%y3 - альфа ток статора
dy(2) = (y(6)/Ls - rs*y(2)/Ls + kr*y(4)/(Ls*Tr) - kr*p*w*y(3)/Ls);
%y4 - бетта ток статора
dy(3) = kr*rr*y(1) - (y(3)/Tr) - p*w*y(4); %y5 - альфа
потокосцепление ротора
dy(4) = kr*rr*y(2) - (y(4)/Tr) + p*w*y(3); %y6 - бетта
потокосцепление ротора
dy(5) = (ica - y(1))*rn/C; %y7-альфа напряжение статора
dy(6) = (icb - y(2))*rn/C; %y8-бетта напряжение статора
dy(7) = kr*(y(3)*y(2) - y(4)*y(1))/(Jag); %y9 - выражение момента
end
```

Выполняемые команды

```
options = odeset('RelTol',1e-4,'AbsTol',[1e-4 1e-4 1e-5 1e-4 1e-4
1e-5 1e-4 1e-4 1e-5]); % Задание точности
[T,Y] = ode45(@modelAG,[0 20],[0 0 0 0 0 0 0],options); %
Начальные условия
plot(T,Y(:,1),'-',T,Y(:,2),'-
.',T,Y(:,3),'.',T,Y(:,4),'.',T,Y(:,5),'.',T,Y(:,6),'.',T,Y(:,7),'.'
') % Вывод результата
```

Результат решения системы ДУ АГ



ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Упрощенные выражения передаточной функции и полного сопротивления АГ (рисунок 2.10)

$$W_{nep} = \frac{Sk \cdot (R_m + L_m \cdot w \cdot i) \cdot (R_H - C \cdot L_s \cdot R_H \cdot w^2 + L_s \cdot w \cdot i) \cdot i}{Z'}$$

где

$$Z' = L_m R_r w - R_r R_m i + L_s \cdot R_r \cdot w + L_m \cdot R_H \cdot Sk \cdot w + L_r \cdot R_H \cdot Sk \cdot w + L_s \cdot R_m \cdot Sk \cdot w + i \cdot C \cdot L_m \cdot R_H \cdot R_r \cdot w^2 + C \cdot R_H \cdot R_r \cdot R_m \cdot w - \\ - C \cdot R_H \cdot L_r \cdot L_m \cdot w^3 \cdot Sk - C \cdot R_H \cdot L_s \cdot L_m \cdot w^3 \cdot Sk - i \cdot R_H \cdot R_m \cdot Sk + i \cdot C \cdot R_H \cdot L_r \cdot R_m \cdot w^2 \cdot Sk - i \cdot R_H \cdot R_r + i \cdot L_m \cdot L_s \cdot Sk \cdot w^2 + \\ + i \cdot L_r \cdot L_s \cdot Sk \cdot w^2 + i \cdot C \cdot L_s \cdot R_H \cdot R_r \cdot w^2 + i \cdot L_m \cdot L_r \cdot Sk \cdot w^2 + i \cdot C \cdot L_s \cdot R_H \cdot R_m \cdot Sk \cdot w^2$$

$$Z_{vh} = \frac{L_m \cdot R_r \cdot w - i \cdot R_r \cdot R_m + L_s \cdot R_H \cdot w + L_m \cdot R_H \cdot Sk \cdot w + L_r \cdot R_m \cdot Sk \cdot w + L_s \cdot R_m \cdot Sk \cdot w + i \cdot C \cdot L_m \cdot R_H \cdot R_r \cdot w + C \cdot R_m \cdot R_H \cdot R_r \cdot w}{Sk \cdot (L_m \cdot w - R_m \cdot i + L_s w + C \cdot R_H \cdot R_m \cdot w + i \cdot C \cdot L_m \cdot R_H \cdot w^2 - R_H \cdot i + i \cdot C \cdot L_s \cdot R_H \cdot w^2)} + \\ + \frac{-C \cdot L_m \cdot R_H \cdot L_r \cdot w^3 \cdot Sk - C \cdot L_m \cdot R_H \cdot L_s \cdot w^3 \cdot Sk - C \cdot L_s \cdot R_H \cdot L_r \cdot w^3 \cdot Sk - i \cdot R_H \cdot R_m \cdot Sk + i \cdot C \cdot R_m \cdot R_H \cdot L_r \cdot w^2 \cdot Sk - i \cdot R_r \cdot R_H}{Sk \cdot (L_m \cdot w - R_m \cdot i + L_s w + C \cdot R_H \cdot R_m \cdot w + i \cdot C \cdot L_m \cdot R_H \cdot w^2 - R_H \cdot i + i \cdot C \cdot L_s \cdot R_H \cdot w^2)} + \\ + \frac{i \cdot L_m \cdot L_s \cdot w^2 \cdot Sk + i \cdot L_r \cdot L_s \cdot w^2 \cdot Sk + i \cdot C \cdot L_s \cdot R_H \cdot R_r \cdot w^2 - i \cdot L_r \cdot L_m \cdot Sk \cdot w^2 + i \cdot C \cdot R_m \cdot R_H \cdot L_s \cdot w^2 \cdot Sk}{Sk \cdot (L_m \cdot w - R_m \cdot i + L_s w + C \cdot R_H \cdot R_m \cdot w + i \cdot C \cdot L_m \cdot R_H \cdot w^2 - R_H \cdot i + i \cdot C \cdot L_s \cdot R_H \cdot w^2)}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Действительная и мнимая часть входного сопротивления

$$\begin{aligned}
 \text{Im}(Z_{vh}) = & \frac{w(C^2 L_m^2 L_s R_H^2 w^4 + L_r C^2 L_m^2 R_H^2 w^4 + C^2 L_m L_s^2 R_H^2 w^4 + 2L_r C^2 L_m L_s R_H^2 w^4 + L_r C^2 L_s^2 R_H^2 w^4 + C^2 R_m^2 L_s R_H^2 w^2 + L_r C^2 R_m^2 R_H^2 w^2}{C^2 L_m^2 R_H^2 w^4 + 2C^2 L_m L_s R_H^2 w^4 + C^2 L_s^2 R_H^2 w^4 + C^2 R_H^2 R_m^2 w^2 - 2CL_m R_H^2 w^2 - 2CL_s R_H^2 w^2 + w^2 (L_m + L_s)^2 + (R_H + R_m)^2} + \\
 & + \frac{-CL_m^2 R_H^2 w^2 - 2CL_m L_s R_H^2 w^2 - 2CL_m L_r R_H^2 w^2 - 2CL_r L_s R_H^2 w^2 - CR_H^2 R_m^2 + L_m^2 L_s w^2 + L_m^2 L_r w^2 + L_s^2 L_m w^2 + 2L_r L_m L_s w^2}{C^2 L_m^2 R_H^2 w^4 + 2C^2 L_m L_s R_H^2 w^4 + C^2 L_s^2 R_H^2 w^4 + C^2 R_H^2 R_m^2 w^2 - 2CL_m R_H^2 w^2 - 2CL_s R_H^2 w^2 + w^2 (L_m + L_s)^2 + (R_H + R_m)^2} + \\
 & + \frac{L_m R_H^2 + L_r L_s^2 w^2 + L_s R_m^2 + L_r R_H^2 + 2L_r R_H R_m + L_r R_m^2}{C^2 L_m^2 R_H^2 w^4 + 2C^2 L_m L_s R_H^2 w^4 + C^2 L_s^2 R_H^2 w^4 + C^2 R_H^2 R_m^2 w^2 - 2CL_m R_H^2 w^2 - 2CL_s R_H^2 w^2 + w^2 (L_m + L_s)^2 + (R_H + R_m)^2} \\
 \\
 \text{Re}(Z_{vh}) = & \frac{R_r C^2 L_m^2 R_H^2 w^4 + 2R_r C^2 L_m L_s R_H^2 w^4 + Sk \cdot C^2 L_s^2 R_H^2 w^4 + R_r C^2 L_s^2 R_H^2 w^4 + R_r C^2 R_m^2 R_H^2 w^2 - 2R_r CL_m R_H^2 w^2 - 2Sk \cdot CL_s R_H^2 R_m^2 w^2}{Sk \cdot (C^2 L_m^2 R_H^2 w^4 + 2C^2 L_m L_s R_H^2 w^4 + C^2 L_s^2 R_H^2 w^4 + C^2 R_m^2 R_H^2 w^2 - 2CL_m R_H^2 w^2 - 2C^2 L_s R_H^2 w^2 + w^2 (L_m + L_s)^2 + (R_H + R_m)^2)} + \\
 & + \frac{-2R_r CL_s R_H^2 w^2 + Sk \cdot L_m^2 R_H w^2 + R_r L_m^2 w^2 + 2R_r L_m L_s w^2 + Sk \cdot L_s^2 R_m w^2 + R_r L_s^2 w^2 + Sk \cdot R_H^2 R_m + R_r R_H^2 + Sk \cdot R_m^2 R_H + 2R_r R_H R_m + R_r R_m^2}{Sk \cdot (C^2 L_m^2 R_H^2 w^4 + 2C^2 L_m L_s R_H^2 w^4 + C^2 L_s^2 R_H^2 w^4 + C^2 R_m^2 R_H^2 w^2 - 2CL_m R_H^2 w^2 - 2C^2 L_s R_H^2 w^2 + w^2 (L_m + L_s)^2 + (R_H + R_m)^2)}
 \end{aligned}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Краткое описание метода определения резонансных частот из частотного метода

Условие: $\varphi = \arctan\left(\frac{Im}{Re}\right) = 0^0$, выполняется при следующих условиях: $Im = 0$, $Re = \infty$. Из рисунков 2.11 и 2.13 следует, что действительная часть ни на одной из частот не достигнет значения ∞ . Таким образом, определение точек отсутствия фазового сдвига должно производиться из выражений мнимых частей. Данные выражения представляют собой сложные полиномы дробного вида. Достижение мнимой части нулевого значения $Im = 0$, возможно при достижении числителя нулевого значения или знаменателя значения ∞ . Эмпирически было определено, что знаменатель стремиться к бесконечности только при $w \rightarrow \infty$.

Выражение	числителя	мнимой	части	входного	сопротивления:
$w(C^2 L_m^2 L_s R_n^2 w^4 + L_r C^2 L_m^2 R_n^2 w^4 + C^2 L_m L_s^2 R_n^2 w^4 + 2L_r C^2 L_m L_s R_n^2 w^4 + L_r C^2 L_s^2 R_n^2 w^4 + C^2 R_m^2 L_s R_n^2 w^2 +$ $+ L_r C^2 R_m^2 R_n^2 w^2 - CL_m^2 R_n^2 w^2 - 2CL_m L_s R_n^2 w^2 - 2CL_m L_r R_n^2 w^2 - 2CL_r L_s R_n^2 w^2 - CR_n^2 R_m^2 + L_m^2 L_s w^2 + L_m^2 L_r w^2 +$ $+ L_s^2 L_m w^2 + 2L_r L_m L_s w^2 + L_m R_n^2 + L_r L_s^2 w^2 + L_s R_m^2 + L_r R_n^2 + 2L_r R_n R_m + L_r R_m^2) = 0$					

Данное выражение имеет три решения:

$$\left\{ \begin{array}{l} w_1 \rightarrow \frac{1}{\sqrt{C \cdot L_m}}, \\ w_2 \rightarrow \frac{L_m + L_s + L_r}{\sqrt{C \cdot L_m^2 (L_s + L_r)}}, \\ w_3 = 0. \end{array} \right.$$

Третий корень не представляет интереса, т.к. соответствует постоянному току.

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

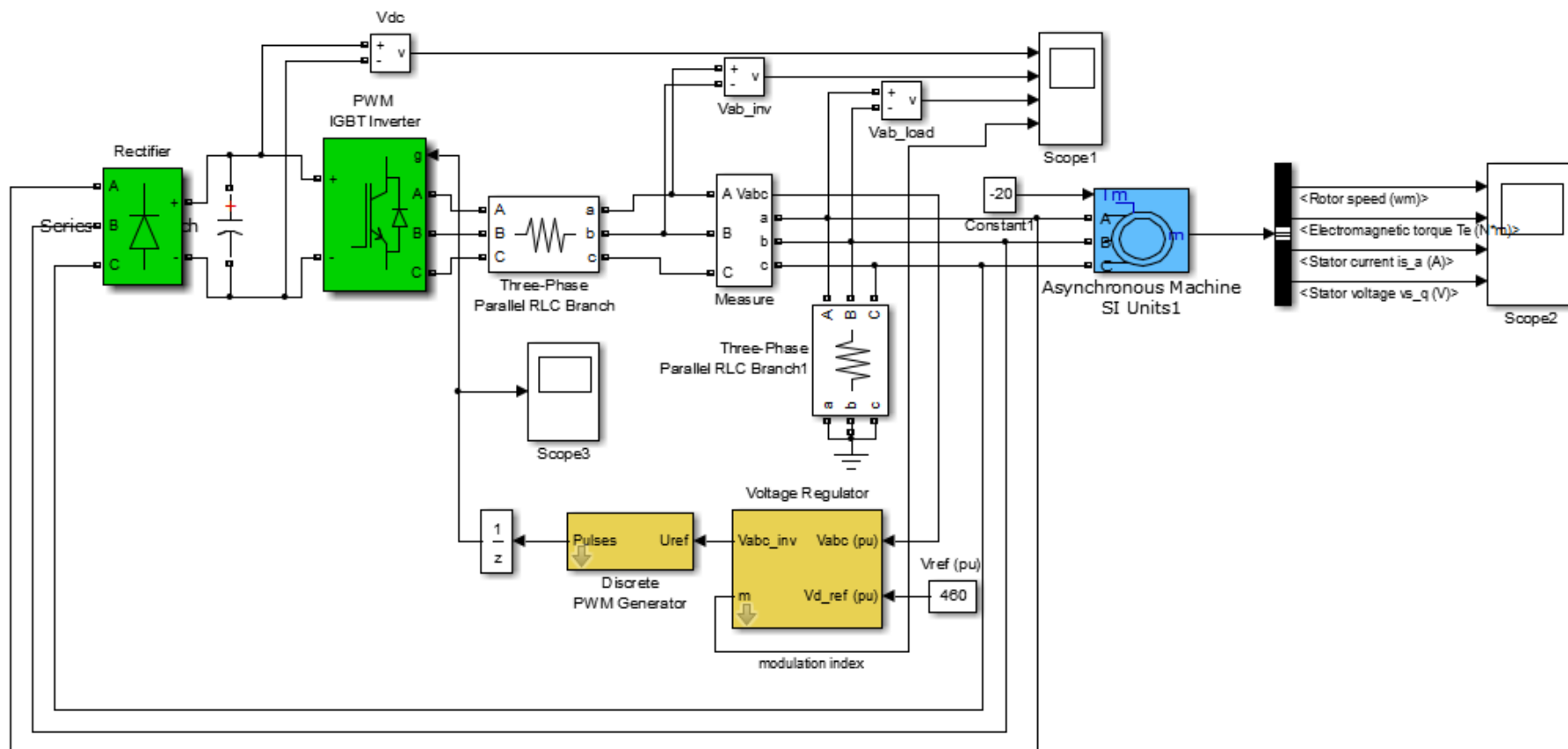
Имитационные модели АГ для различных режимов работы

Таблица обозначений для представленных моделей

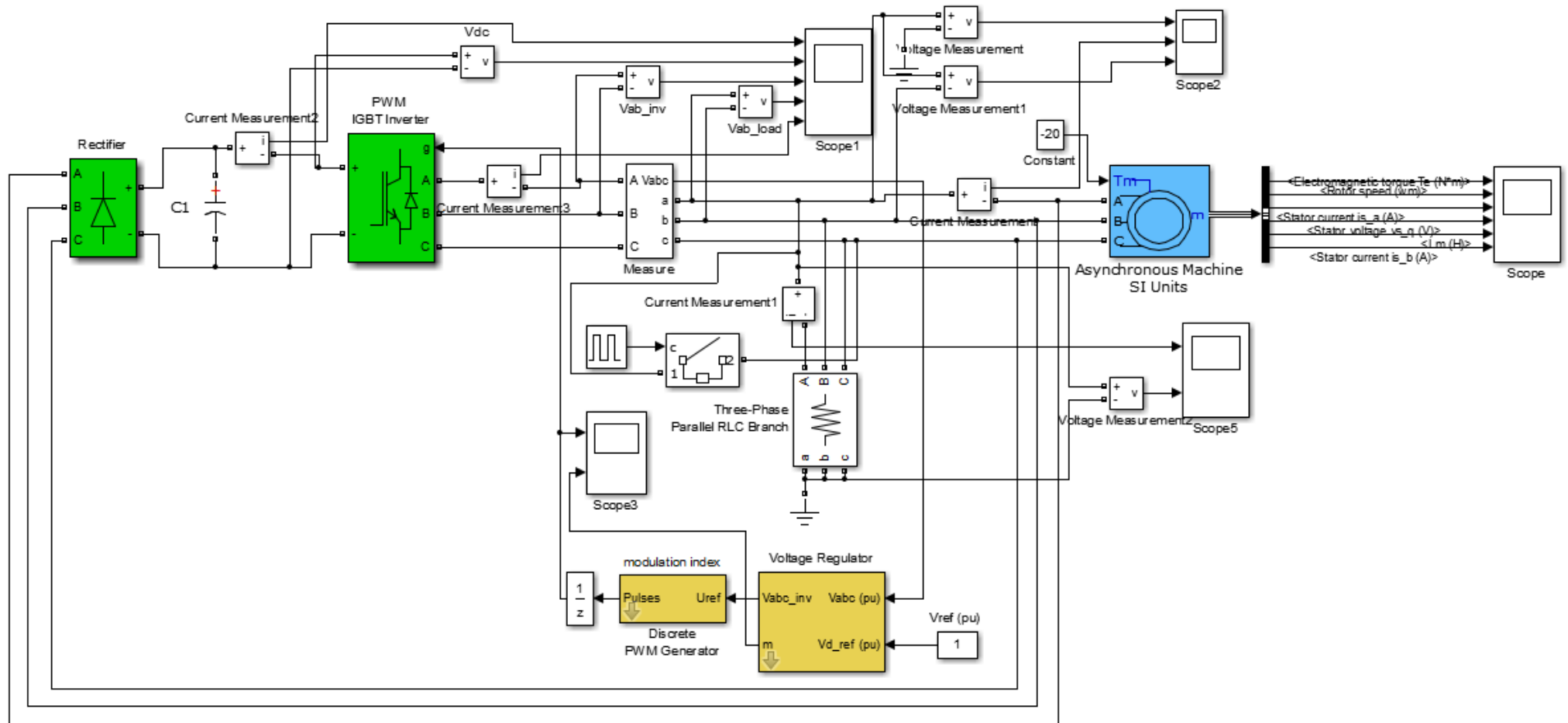
<i>Rectifier</i>	<i>IGBT Inverter</i>	<i>Measure</i>	<i>Asynchronous Machine</i>	<i>Three-Phase Parallel RLC Branch</i>	<i>Voltage Regulator</i>	<i>Discrete PWM Generator</i>	<i>Current/Voltage Measurement</i>	<i>Scope</i>
Выпрямитель	Инвертор на IGBT транзисторах	Измерительный блок	Асинхронная машина	Трехфазная параллельная нагрузка	Регулятор напряжения	Генератор ШИМ	Амперметр/Вольтметр	Осциллограф
<i>Rotor speed</i>	<i>Electromagnetic torque</i>	<i>Stator Current</i>	<i>Stator Voltage</i>	<i>Modulation index</i>	<i>Vdc</i>	<i>Vab_inv/Vab_load</i>	<i>Vref</i>	<i>Constant</i>
Скорость вращения ротора	Электромагнитный момент	Ток статора	Напряжение статора	Индекс модуляции	Напряжение звена постоянного тока	Фазное напряжение инвертора/нагрузки	Требуемое значение напряжения	Постоянная

Приведенные схемы модели МСГ и осциллограммы состояния при различных параметрах и режимах нагрузки позволяют исследовать статические, динамические, аварийные режимы работы. Характеристики указывают на динамическую устойчивость МСГ к подключению нагрузки, изменение импульсов ШИМ для поддержания стабильных параметров АГ и т.д.

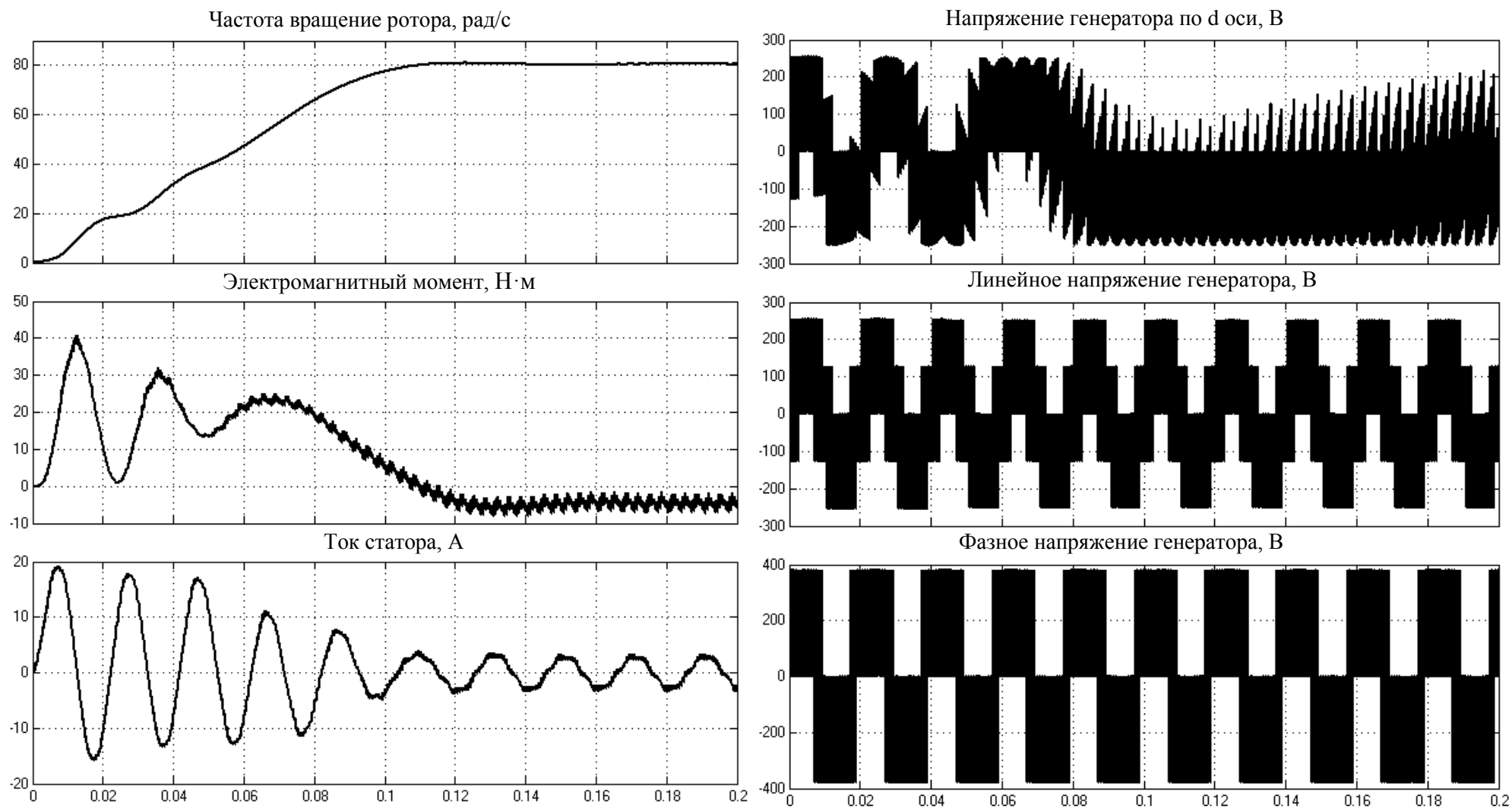
Модель мехатронной системы генерирования на базе асинхронного генератора



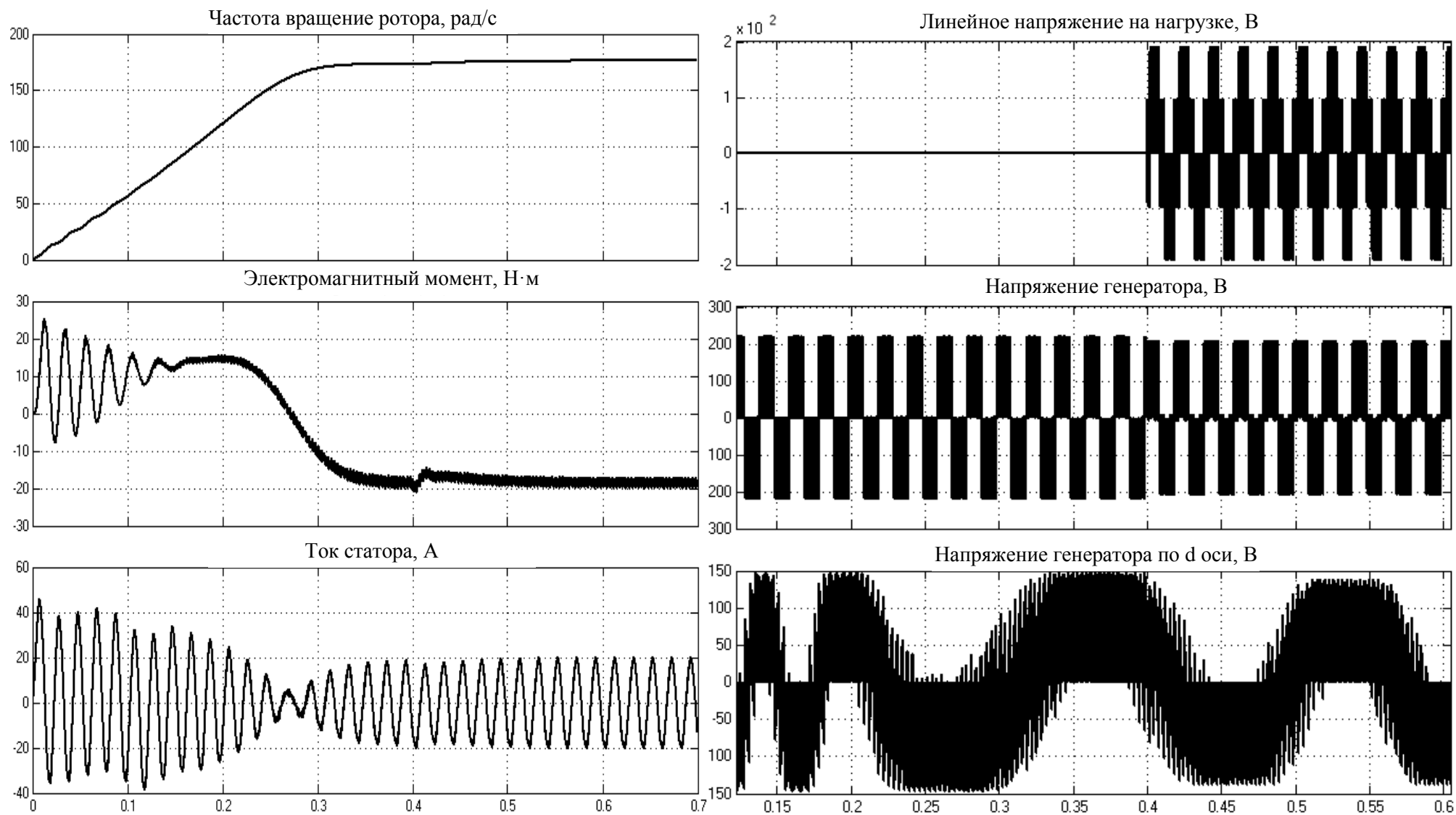
Модель асинхронного генератора с инверторным возбуждением для аварийного режима работы
(межфазного замыкания)



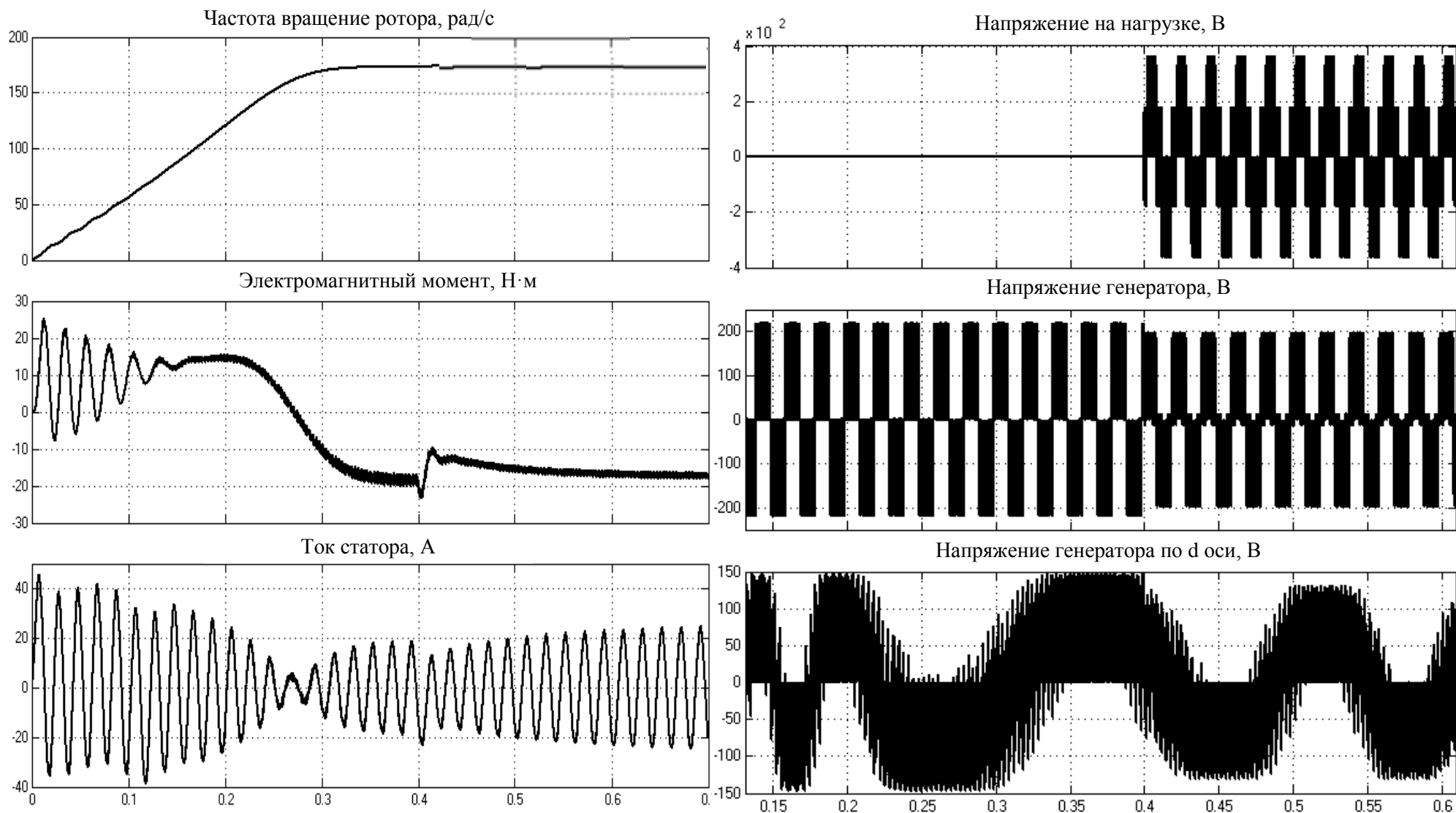
Осциллограммы работы МСГ (на базе АИР90L4У3) при 50 % номинальной нагрузке



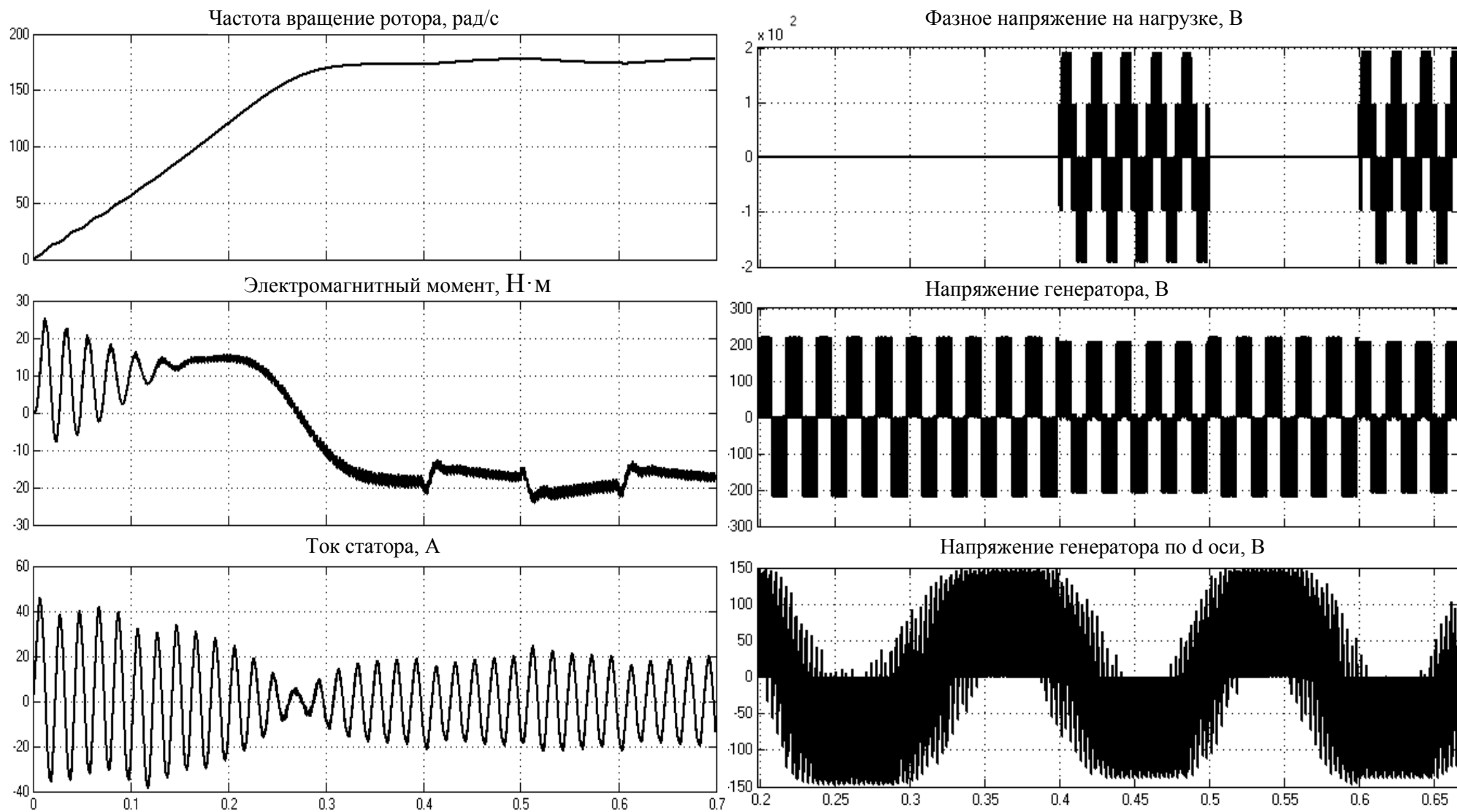
Осциллограммы работы МСГ (на базе АИР160S4) при подключении 50 % номинальной нагрузки в момент времени 0,4 с



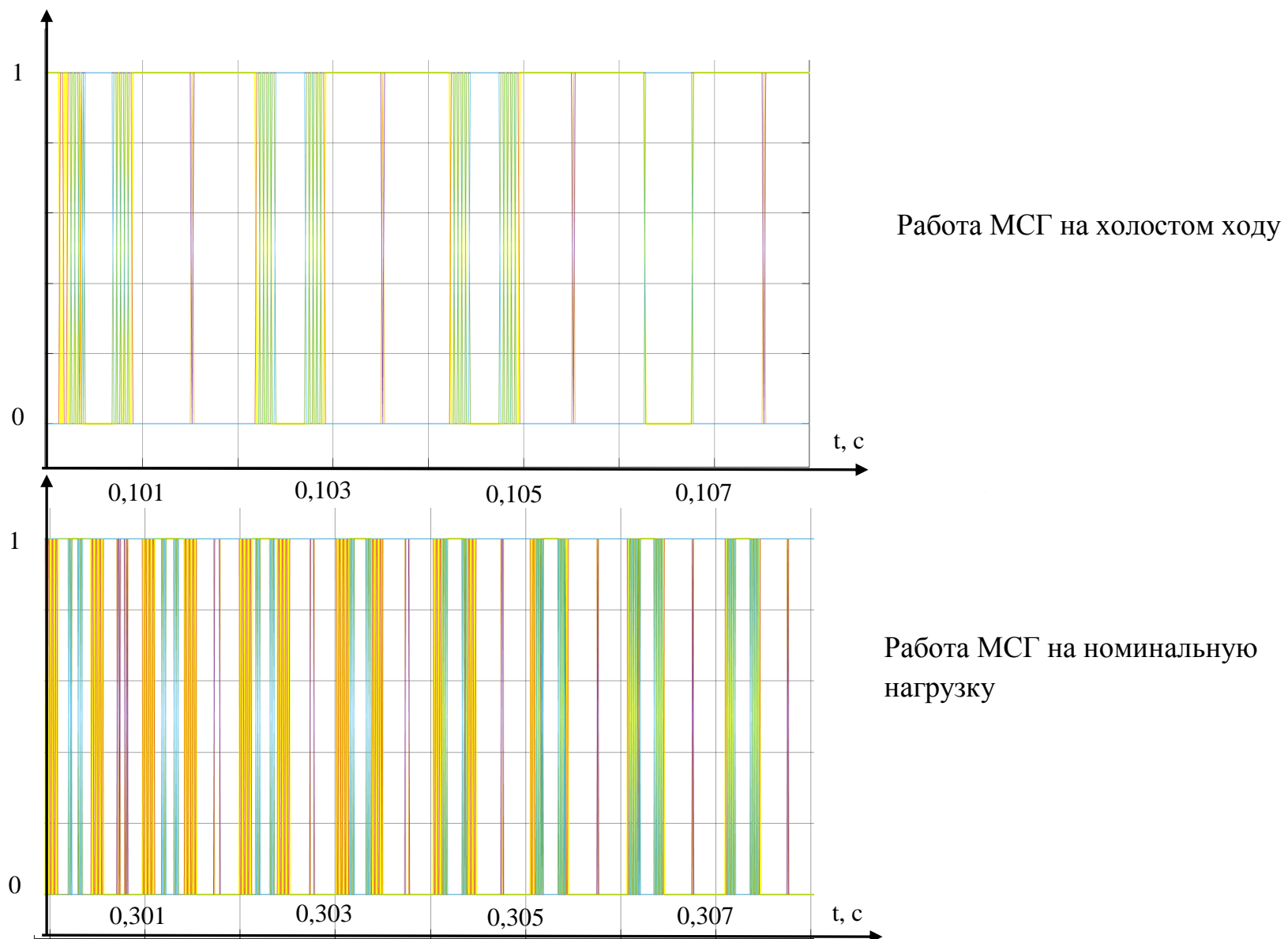
Осциллограммы работы МСГ (на базе АИР160S4) при подключении 150 % номинальной нагрузки в момент времени 0,4 с



Осциллограммы работы МСГ (на базе АИР160S4) при периодическом включении номинальной нагрузки



Управляемые ШИМ импульсы в зависимости от режима работы генератора



ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Листинг программы расчета параметров схемы замещения АМ через номинальные паспортные данные

```

Pn = 2200;           %Номинальная мощность, Вт
U1 = 380;           %Номинальное линейное напряжение, В
Uf = U1/sqrt(3);    %Номинальное фазное напряжение, В
KPD = 0.8;          %Номинальный КПД, о.е.
cosf = 0.8;         %Номинальный коэффициент мощности, о.е.
2P = 2;             %Число пар полюсов
S = 0.07;           %Скольжение, о.е.
Ki = 7;             %Кратность пускового тока
Kp = 1.8;           %Кратность пускового момента
Km = 2.2;           %Кратность максимального момента
J = 0.029;         %Момент инерции двигателя, кг*м2
pf = 0.5;           %Коэффициент загрузки двигателя, о.е.
Ppf = Pn * pf;      %Номинальная мощность при нагрузке 50%, Вт
KPD_pf = 0.65;      %КПД при нагрузке 25 или 50%, о.е.
cosf_pf = 0.65;     %коэффициент мощности при нагрузке 50%, о.е.
w0 = 2*pi*50;       %Скорость холостого хода, рад/с
wn = (1-S)*w0/2P;   %Номинальная скорость, рад/с
Mn = Pn / wn;       %Номинальный момент, Нм
Mp = Mn*Kp;         %Пусковой момент, Нм
Is = Pn/3/Uf/KPD/cosf; %Номинальный ток статорной обмотки, А
Ik = Is*Ki;         %Пусковой ток, А
Is_pf = Pn/3/Uf/KPD_pf/cosf_pf*pf; %Ток статора при нагрузке 50%, А
I0_br = pf*(1-S) / (1-pf*S);
I0num = Is_pf^2-(I0_br*Is)^2;
I0den = 1-I0_br^2;
I0 = sqrt(I0num/I0den); %Ток холостого хода, А
beta = 1.2;         %Предварительный коэффициент жесткости
C1 = 1 + I0/(2*Ki*Is); %Конструктивный коэффициент, C1 = 1+X1/Xm
Sk_br = 1-2*S*beta*(Km-1);
Sk_drob = (Km + sqrt(Km^2-Sk_br) ) / Sk_br;
Sk = S * Sk_drob;   %Расчет критического скольжения
f0 = 87 / 180*pi;
Iscos = Is*cosf;
I0cos = I0*cos(f0);
A0 = (Iscos-I0cos) / Uf;
A1 = 3*Uf^2 * (1-S) / (2*C1*Km*Pn);
B = 1/S + 1/Sk-2*A0*A1/S;
C = 1/(S*Sk)-A0*A1*(1/S^2 + 1/Sk^2);
Dis = sqrt(B^2-4*C);
Xbeta1 = (-B + Dis)/2;
Xbeta2 = (-B-Dis)/2;
beta = Xbeta1;     %Уточнённый коэффициент жесткости
R21 = A1 / (beta + 1/Sk) / C1; %Активное сопротивление роторной
цепи, Ом
R1 = C1*beta*R21;  %Активное сопротивление статорной цепи, Ом
Xn = sqrt((R21/Sk)^2-R1^2); %Полное индуктивное сопротивление, Ом

```

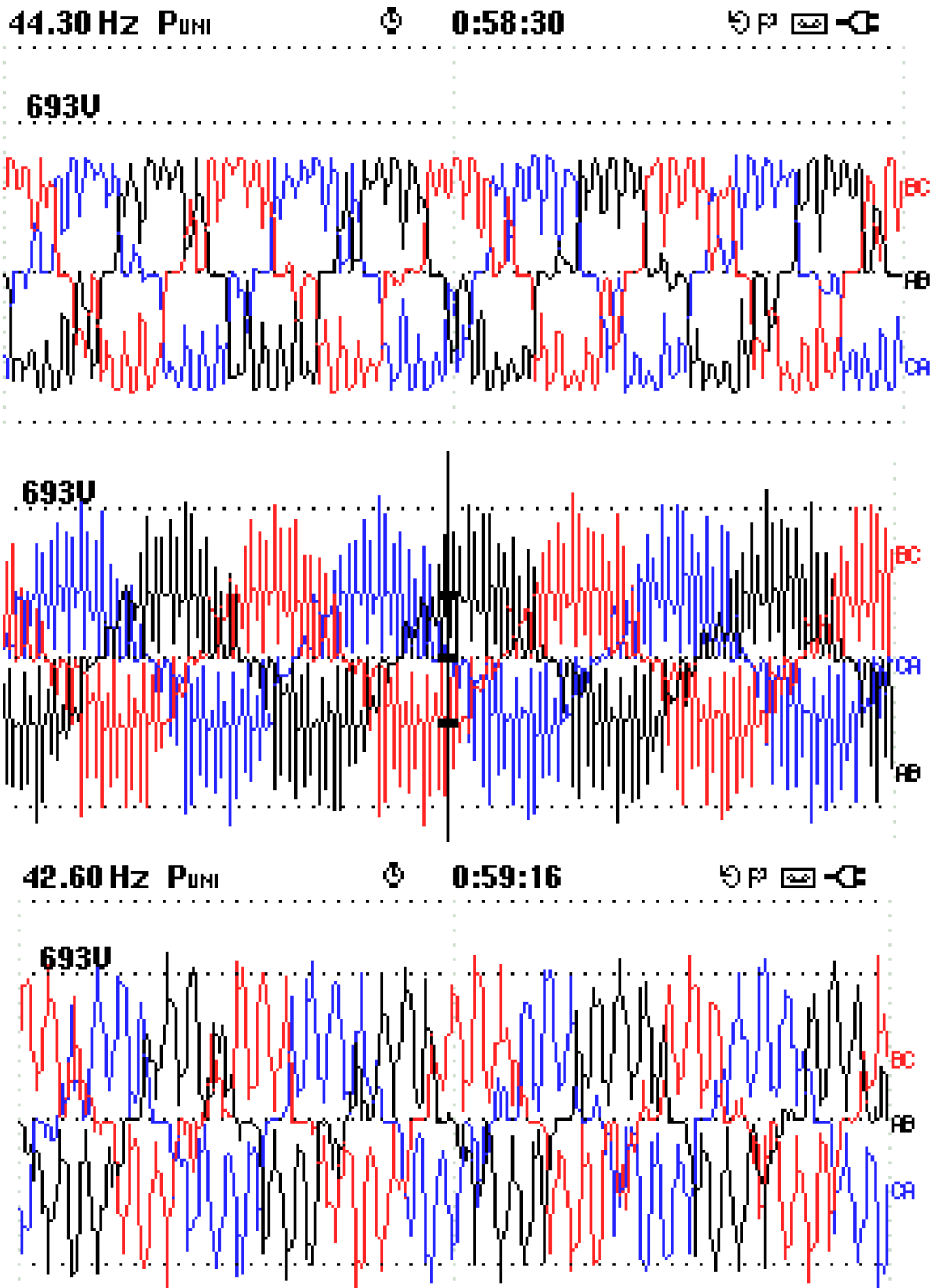
```

X1 = 0.41*Xn;           %Индуктивное сопротивление статорной цепи, Ом
X21 = 0.56*Xn;         %Индуктивное сопротивление роторной цепи, Ом
e11 = (Uf*cosf-R1*Is);
e12 = (Uf*0.54-X1*Is);
E1 = sqrt(e11^2 + e12^2); %ЭДС ветви намагничивания, В
Xm = E1 / I0;          %Индуктивное сопротивление ветви намагничивания, Ом
L1s = X1 / w0;         %Индуктивность статорной цепи, Гн
Lrs = X21 / w0;        %Индуктивность роторной цепи, Гн
Lm = Xm / w0;          %Индуктивность ветви намагничивания, Гн
ps1 = (1/kpd)-1;
dPn = Pn*ps1-0.004*Pn/KPD; %Суммарные потери при работе в номин.
режиме, Вт
ps2 = (1/kpd_pf)-1;
dPpf = Ppf*ps2-0.005*Ppf/KPD_pf; % Суммарные потери при работе с
нагрузкой 25/50%, Вт
Rv = (dPn-dPpf) / 3 / (Is^2+Is_pf^2); %Величина переменных потерь,
Ом
dPv = 3*Is^2*Rv;%Суммарные переменные потери, Вт
P0 = dPn-dPv; %Величина постоянных потерь, Вт
Pmex = 0.32*P0; %Величина механических потерь, Вт
I2p = 0.965*Ki*Is; %Приведенный ток фазы ротора в режиме КЗ, А
R21p = Km*(Pn*(1+0.004/kpd)+Pmex)/3/(1-S) / I2p^2; %Активное
сопротивление роторной цепи в режиме КЗ, Ом
Xp = sqrt( (Uf/I2p)^2-(R1 + C1*R21p)^2 ); %Полное индуктивное
сопротивление в режиме КЗ, Ом
X1p = X1 * (Xp/(X1+C1*X21)); %Индуктивное сопротивление статора в
режиме КЗ, Ом
X21p = (Xp-X1p)/C1; %Индуктивное сопротивление ротора в режиме КЗ,
Ом
s = [1:-0.002:S]; %Пределы изменения скольжения
num1 = 0.0185*s-0.375*s.^2 + s.^2.*sqrt(s); den1 = 0.035 +
0.612*s.^2.*sqrt(s);
num2 = 0.0358-0.5560*s.^2 + s.^2.*sqrt(s); den2 = 0.0187-
0.0151*s.^2 + 0.446*s.^2.*sqrt(s);
f1 = num1 ./ den1; %Функция, полученная аппроксимацией
% усреднённых зависимостей
f2 = num2 ./ den2; %Функция, полученная аппроксимацией
% усреднённых зависимостей
Ra = (R21-R21p*f1(930)) ./ (1-f1(930)); %Приведенное активное
сопротивление ротора в номинальном режиме, Ом
Rb = (R21p-R21)./(1-f1(930)); %Приведенное активное сопротивление
ротора в момент пуска, Ом
Xa = (X21-X21p*f2(930)) ./ (1-f2(930)); %Приведенное индуктивное
сопротивление ротора в номинальном режиме, Ом
Xb = (X21p-X21)./(1-f2(930)); % Приведенное индуктивное
сопротивление ротора в момент пуска, Ом
R21n = Ra + Rb .* f1; %Значение активного сопротивление роторной
цепи, Ом
X21n = Xa + Xb .* f2; %Значение индуктивного сопротивление
роторной цепи, Ом

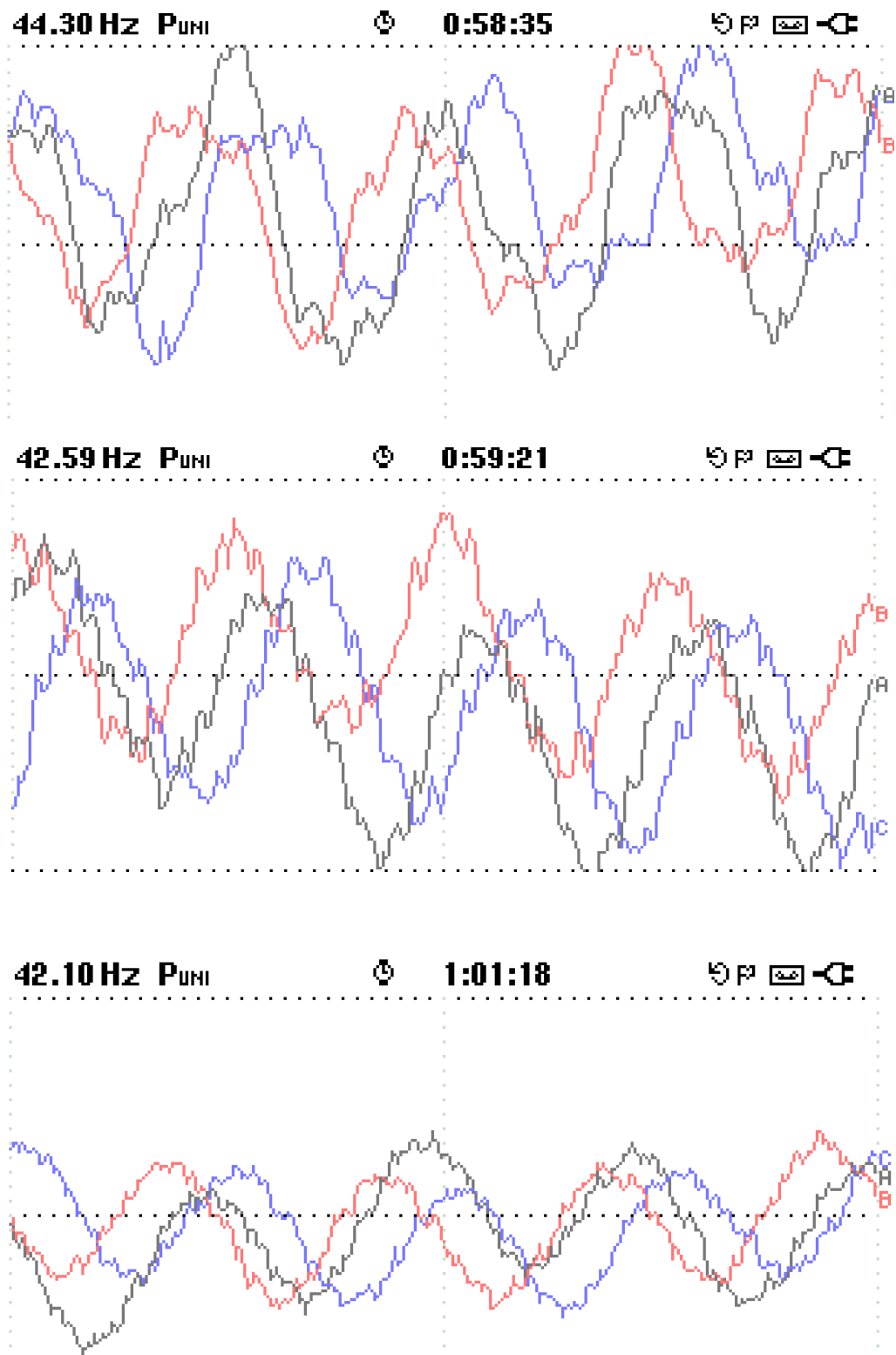
```

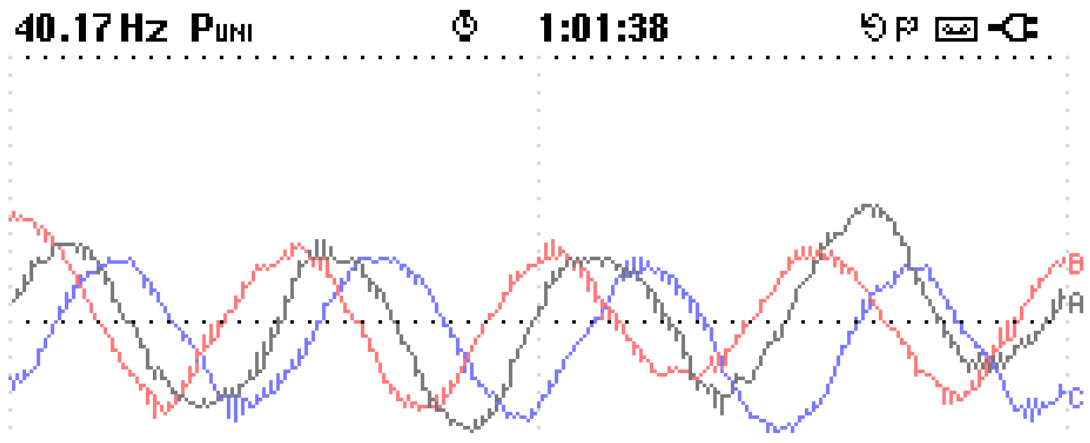
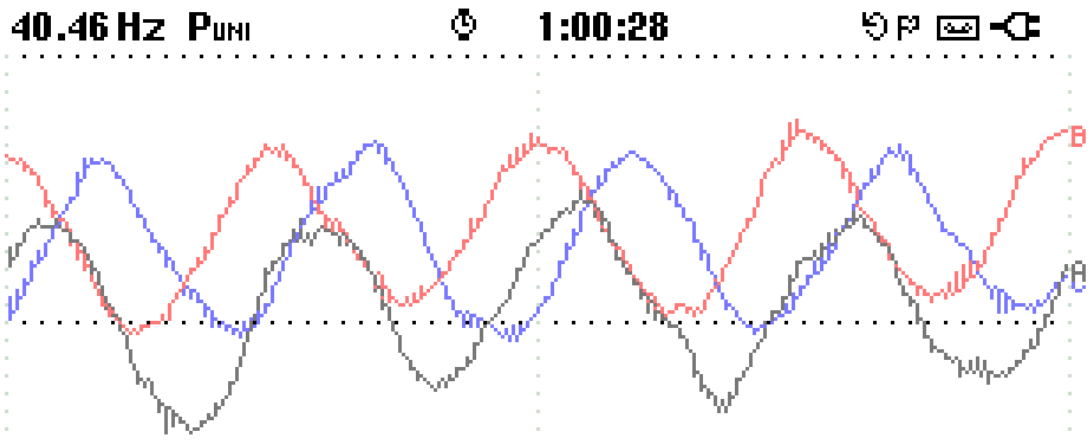

ПРИЛОЖЕНИЕ 8

Осциллограммы напряжения при различной степени возбуждения



Осциллограммы токов при различной степени возбуждения





ПРИЛОЖЕНИЕ 10

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по образовательной деятельности НИ ТПУ

Ю. С. Боровиков

Ю.С. Боровиков

«21» октября 2016г.

АКТ внедрения результатов диссертационной работы

Падалко Дмитрия Андреевича на тему:

«Электромагнитные процессы генерирования электроэнергии в мехатронной системе с асинхронной машиной»

в учебный процесс Национального исследовательского Томского политехнического университета

Настоящий акт подтверждает, что результаты диссертационной работы Падалко Д.А. «Электромагнитные процессы генерирования электроэнергии в мехатронной системе с асинхронной машиной» переданы и используются на кафедре «Электротехнические комплексы и материалы» (ЭКМ) Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета в виде:

1. Математической модели мехатронной системы генерирования на базе асинхронной машины для изучения и исследования переходных, установившихся и аварийных режимов работы.
2. Предложенных методов анализа условий баланса фаз и баланса амплитуд систем генерирования на электрических машинах различного типа.

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе при подготовке бакалавров 13.03.02 и магистров 13.04.02 направления (Электроэнергетика и электротехника) по профилям подготовки «Электрооборудование летательных аппаратов» и «Электротехнические комплексы автономных объектов» по дисциплинам: «Системы энергоснабжения летательных аппаратов», «Мехатронные системы летательных аппаратов», «Мехатроника автономных объектов», «Учебно-исследовательская работа студентов», «Творческий проект», что позволяет повысить качество подготовки выпускников.

Зав. кафедрой ЭКМ ЭНИН
д.т.н., профессор

А.Г. Гарганеев
20.10.16 А.Г. Гарганеев