

На правах рукописи

Падалко Дмитрий Андреевич

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

Специальность 05.09.03 –
«Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» на кафедре электротехнических комплексов и материалов Энергетического института.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Гарганеев Александр Георгиевич

Официальные оппоненты: **Халютин Сергей Петрович**, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Академии электротехнических наук Российской Федерации, ООО «Экспериментальная мастерская НаукаСофт», генеральный директор.

Рулевский Виктор Михайлович, кандидат технических наук, Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) научно-исследовательский институт автоматики и электромеханики (НИИ АЭМ), директор.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск.

Защита диссертации состоится 1 марта 2017 г. в 15.00 на заседании диссертационного совета Д 212.269.11 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, д. 7, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО «Национального исследовательского Томского политехнического университета» по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 55 и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/2801/worklist>

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Учёный секретарь
диссертационного
совета Д 212.269.11

_____ Ю.Н. Дементьев

Актуальность темы исследования. Наиболее распространенной электрической машиной, используемой в большинстве технологических комплексов и установок, является асинхронная машина (АМ) с короткозамкнутым ротором. Высокая надежность, обеспечиваемая отсутствием щеточно-коллекторного узла, простота обслуживания, хорошие эксплуатационные характеристики, массо-габаритные показатели и низкая стоимость способствовали ее распространению во многих отраслях промышленности. Однако, использование данного электромеханического преобразователя наиболее часто связано с двигательным режимом работы. Несмотря на преимущества АМ относительно прочих машин, АМ в генераторном режиме используется редко и зачастую там, где качество и стабильность параметров выходного напряжения имеет второстепенное значение.

Причинами, сдерживающими применение АМ в генераторных установках, являются: необходимость источника реактивно-емкостной энергии и сложность стабилизации (регулирования) генерируемого напряжения. Наиболее часто в качестве схемы возбуждения АМ используется батарея конденсаторов, способствующая переходу электрической машины в генераторный режим. Значительные габариты, высокая стоимость схемы возбуждения и трудности стабилизации параметров выходного напряжения препятствовали распространению АМ в качестве генератора.

Степень разработанности темы исследования. В начале XXI века вопрос удешевления и уменьшения источника реактивной энергии был частично решен, когда были созданы высокоэффективные пленочные самовосстанавливающиеся конденсаторы серий К78-98, СВВ 60, массо-габаритные показатели которых стали значительно лучше предыдущих серий. Схемы стабилизации напряжения и частоты асинхронного генератора (АГ) предложены: В.И. Березиным, Н.М. Перельмутером, Т.И. Ардашниковым; В.А. Симатовым, М.П. Галкиным и др. Разработанные устройства стабилизации обеспечивали высокую степень стабилизации амплитуды и частоты генерируемого напряжения в широких диапазонах изменения нагрузки и скорости вращения ротора, однако отличались вышеуказанными недостатками. Принцип действия предложенных схем заключался в наличии избыточной реактивной мощности, комбинированном подключении конденсаторов и дросселей насыщения. Такие схемы не только увеличивают габариты, стоимость, но и снижают надежность систем генерирования из-за большого числа конструктивных элементов.

Развитие элементной базы и схемотехники управления полупроводниковых преобразователей (ППП) на основе автономных инверторов напряжения (АИН) позволяют в настоящее время в полной мере решить вопросы, ограничивающие применение АМ в генераторных установках.

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 и многие другие. В их работах поднимаются вопросы определения трактовки явления самовозбуждения, математического описания переходного и стационарного режимов работы АГ, определению условий и границ самовозбуждения, стабилизации амплитуды и частоты генерируемого напряжения, оценки необходимого значения фазной емкости, возбуждению от ППП. Существующие разногласия толкования физического принципа возбуждения АМ не позволяют однозначно дать методические рекомендации и предложения, гарантирующие стабильное возбуждение и устойчивую работу во всем диапазоне мощности АГ.

На основании изложенного можно сделать вывод, что вопросы толкования физического процесса, определения условий, границ возбуждения АГ с различными типами возбудителей, а также способов регулирования параметров генерируемого напряжения не решены в полной мере и являются актуальными.

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.

Идея работы состоит в применении регулируемого инверторного возбуждения АМ на основе явления параметрического резонанса мехатронной системы “АМ – АИН”.

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.

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, способствуют 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.

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.; 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 журнальных изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве образования и науки Российской Федерации для соискателей ученых степеней.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении указана проблематика и обоснована актуальность изучения систем генерирования электроэнергии на базе АМ и создания МСГ с возбуждением от ППП. Сформулированы цель и задачи работы, приведены используемые методы исследования. Указаны положения, выносимые на защиту, представлены сведения о научной значимости и практической ценности работы. Приведен обзор содержания работы.

В первой главе отмечена необходимость создания надежных систем генерирования на автономных объектах с учетом специфики их работы. Выполнено сравнение и анализ генераторов, построенных на электрических машинах различных типов, отмечены преимущества АГ и причины, препятствующие его распространению: необходимость реактивно-емкостного источника энергии, сложность стабилизации параметров выходного напряжения при вариации величины нагрузки и частоты вращения ротора.

Приведен обзор отечественных и зарубежных теоретических и экспериментальных исследований по вопросам толкования процесса самовозбуждения, методологии изучения электромеханических систем генерирования и фактического применения АГ в промышленности, транспорте и сельском хозяйстве. Выполнен критический анализ имеющихся трактовок явления самовозбуждения АГ. Процесс самовозбуждения представлен через понятие параметрического резонанса – явления нарастания амплитуды напряжения при изменении реактивного элемента с частотой, кратной частоте собственных колебаний. Отклонен факт остаточной намагниченности как обязательного фактора для начала процесса возбуждения. Произведен анализ существующих методов возбуждения АМ и выражений расчета фазной емкости при конденсаторном возбуждении. Явление самовозбуждения представлено через динамическую неустойчивость АГ, когда ограничение роста амплитуды напряжения связано с насыщением магнитной системы электрической машины. Рассмотрено использование алгебраических и частотных методов исследования устойчивости/неустойчивости АГ для определения условий самовозбуждения и решения задачи о предельной нагрузке.

Вторая глава посвящена используемым в работе методам исследования, применение которых позволяет комплексно изучить объект исследования, определить условия возбуждения и устойчивость работы. На основе принятых допущений производится разработка математических и имитационных моделей АГ с конденсаторным и инверторным возбуждением.

Впервые представлено использование метода теории автоматического управления для анализа электромеханических систем генерирования на примере АГ с конденсаторным возбуждением (рис. 1.а) и генератора постоянного тока параллельного возбуждения (рис. 1.б).

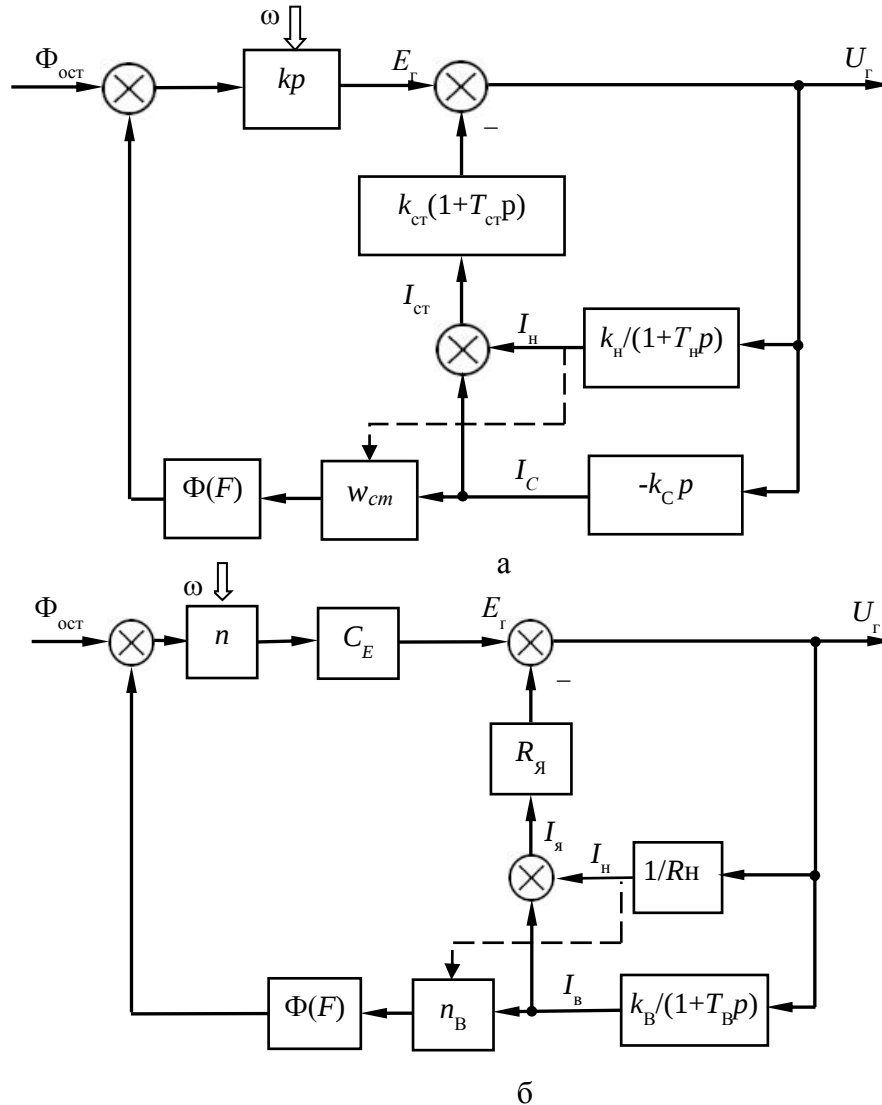


Рисунок 1. Структурные схемы с позиции ТАУ: а – АГ, б – ГПТ

Идентичность полученных в общем виде условий баланса амплитуд в генераторах различного типа, на примере генератора постоянного тока (ГПТ) и АГ, свидетельствует о физической общности и аналогичности процессов самовозбуждения. Условие возбуждения АГ определяется выражением (1), а применительно к условию работы на активно-реактивную нагрузку выражение преобразуется в вид (2).

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

где $r_{\text{ст}}$, $L_{\text{ст}}$ – активное и индуктивное сопротивление статора АМ; $R_{\text{н}}$, $L_{\text{н}}$ – активное и индуктивное сопротивление нагрузки; $C_{\text{АГ}}$ – постоянный коэффициент, характеризующий генератор; C – емкость фазного конденсатора; $w_{\text{рот}}$ – скорость вращения ротора; $\omega_{\text{ст}}$ – число витков статорной обмотки; R_m – магнитное сопротивление ветви «индуктор–воздушный зазор–якорь».

$$\frac{X_{\text{АГ}} + X_{\sigma}}{X_c} \geq 1 + \frac{X_{\sigma}}{Z_{\text{н}}} \quad (2)$$

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 $E_{\text{Г}} = f(i_c)$; X_{σ} – реактивное сопротивление рассеяния статора АМ; X_c – реактивное сопротивление возбуждающего конденсатора; $Z_{\text{н}}$ – полное сопротивление нагрузки.

Представленные выражения позволяют определить необходимую фазную емкость и критическое сопротивление нагрузки (3), приводящее к срыву генерации:

$$Z_{\text{н}} \geq \frac{X_{\sigma} \cdot X_c}{X_{\text{АГ}}(Z_{\text{н}}) + X_{\sigma} - X_c} \quad (3)$$

Приводятся выражения систем дифференциальных уравнений (СДУ) АГ и ППП, пояснены характерные трудности учета нелинейностей насыщения АМ и работы ППП. Результат решения СДУ приведен в ПРИЛОЖЕНИЯХ диссертационной работы.

Анализ условия баланса фаз и устойчивости работы АГ выполнен частотным методом на основе анализа характера передаточной функции $W_{\text{пер}}$ и полного сопротивления Z_{vh} (рис. 2) системы «АГ-батарея конденсаторов».

$$Z_{\text{vh}} = Z_1 + Z_2 = \frac{R_s}{S_k} + X_s \cdot i - \frac{(R_m + X_m \cdot i) \cdot (R_{\text{н}} X_c - R_{\text{н}} X_r + X_r X_c \cdot i) \cdot i}{R_{\text{н}} (R_m - i(X_c + X_m + X_r)) - X_c (R_m \cdot i + X_r + X_m)}$$

$$W_{\text{пер}} = \frac{(R_m + X_m \cdot i)(R_{\text{нагр}} X_c - X_r \cdot R_{\text{нагр}} + X_r X_c \cdot i)}{i \left(\frac{R_r}{S_k} - \frac{(R_m + X_m \cdot i) \cdot (R_{\text{нагр}} X_c - R_{\text{нагр}} X_1 + X_1 X_c \cdot i)}{R_{\text{н}} (R_m - i(X_c - X_m - X_r)) - X_c (R_m \cdot i + X_s + X_m)} + X_r \cdot i \right) X^*} \quad (4)$$

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

Оценка частотных характеристик позволяет понять, что имеется две характерные точки в окрестности, которых возможно возникновение процесса возбуждения.

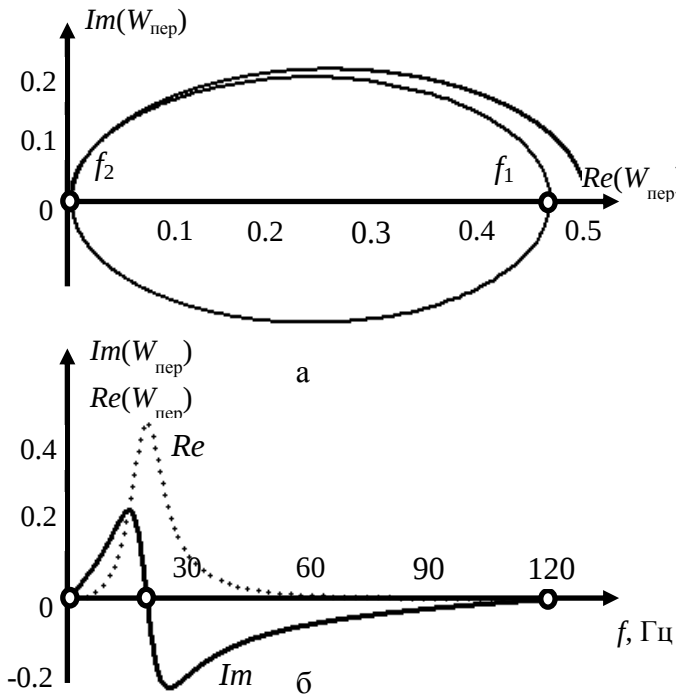


Рисунок 2. Частотные характеристики $W_{\text{пер}}$: а – годограф передаточной функции, б – действительная и мнимая части $W_{\text{пер}}$

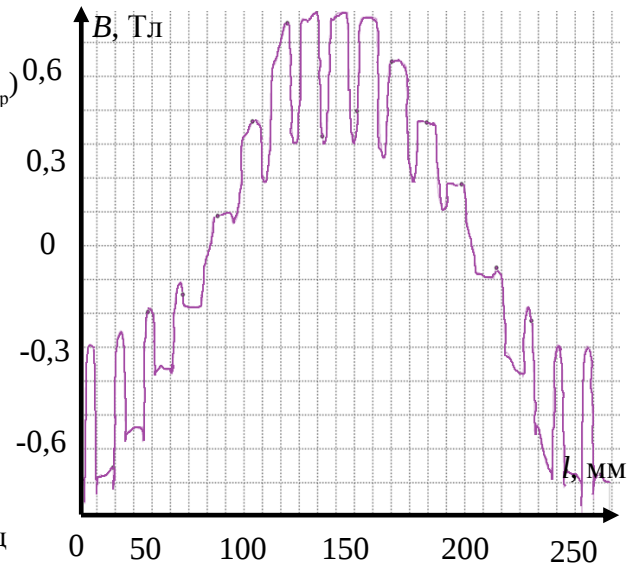


Рисунок 3. Магнитная индукция АМ с диэлектрическим клином по длине воздушного зазора

Выполнено решение обратной задачи: из выражения мнимой части передаточной функции определить частоты, не имеющие фазового сдвига. Полученное решение имеет пару выражений, соответствующих физическим принципам возбуждения АГ, согласно которым частоты, не имеющие фазового сдвига, определяются резонансным явлением в контуре АМ – батарея конденсаторов.

$$\begin{cases} f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{C \cdot L_m}}, \\ f_2 = \frac{L_m + L_s + L_r}{2\pi\sqrt{C \cdot L_m^2 (L_s + L_r)}}. \end{cases} \quad (5)$$

Из приведенных выражений устойчивое возбуждение возможно только на частоте f_1 , определяемой индуктивностью намагничивающего контура АМ и величиной фазной емкости.

В третьей главе показана причина, способствующая явлению параметрического резонанса в генераторе на базе АМ – пульсация магнитной индукции по длине расточки статора (рис. 3).

Из условия нарастающих колебаний (6) параметрического резонанса, полученное Н.Д. Бирюком, выявлено, что присутствующая пульсация магнитной индукции является достаточной для явления самовозбуждения АМ.

$$\Delta C > \frac{\pi \cdot C}{Q}, \Delta L > \frac{\pi \cdot L}{Q} \quad (6)$$

где Q – добротность контура L - C .

Предложена модель явления параметрического резонанса (рис. 4), изучено влияние кратности частот изменения величины реактивного элемента и собственных колебаний напряжения системы генерирования, а также величины скважности на процесс нарастания колебаний. Ограничение нарастания колебаний достигается при равенстве величины энергии, вкладываемой за период в контур, и потерями на активном сопротивлении статора.

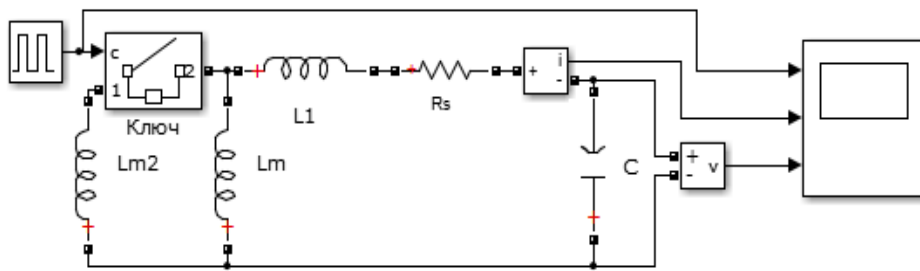


Рисунок 4. Модель процесса параметрического резонанса

Предложены уточненные выражения, определяющие величину фазной емкости C и реактивной мощности W_{Cp} , учитывающие не только частоту вращения ротора, но и особенности электрической машины.

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

$$W_{Cp} = 0,314 \cdot U^2 \frac{(1-s(R_{нагр}))^2 \cdot 10^{-4}}{\pi^2 L_m (1-\sin \varphi)}, \quad (7)$$

где s – величина скольжения; p – число пар полюсов;

n – частота вращения ротора; U – напряжение на конденсаторе;

L_m – индуктивность намагничивающего контура.

Приведенное сравнение расчетных и экспериментальных величин (рис. 5) показывает, что для режима холостого хода максимальное отклонение результатов составило: для $\Delta C = 9.7\%$, в режиме номинальной нагрузки при

$\cos\varphi = 1$ $\Delta C = 10\%$, а для режима номинальной нагрузки при $\cos\varphi = 0,8$ $\Delta C = 8,8\%$, что зачастую нивелируется выбором емкости из стандартизованных рядов номинальных величин конденсаторов. Максимальное отклонение приходится на минимальную мощность электрической машины, с ростом мощности отклонение сокращается до 4%.

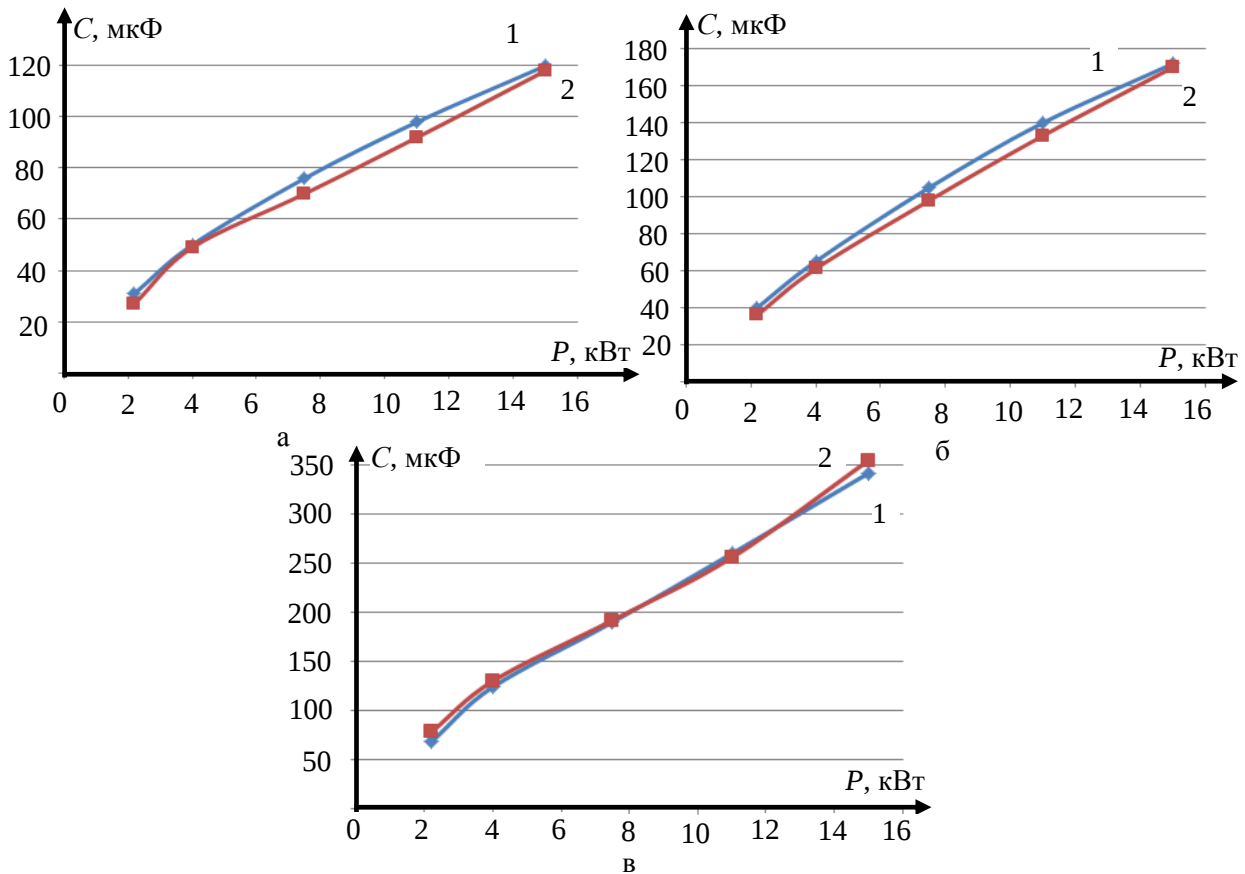


Рисунок 5. Зависимость фазной емкости для самовозбуждения АГ
а – на холостом ходу; б – на номинальную активную нагрузку;
в – на номинальную активно-индуктивную нагрузку $\cos\varphi = 0,8$:
1 – экспериментальная кривая, 2 – расчётная кривая

Представлена имитационная модель мехатронной системы генерирования электроэнергии на базе АМ (рис. 6). Энергия, способствующая возбуждению, хранится в блоке аккумуляторной батареи или конденсаторе звена постоянного тока, из которого формируется переменное напряжение. Использование устройства, способного запасать и хранить энергию для дальнейшего преобразования, в совокупности с наличием выпрямителя, позволяющего наращивать или поддерживать напряжение звена постоянного тока неизменным, позволяет считать данную систему генерирования автономной.

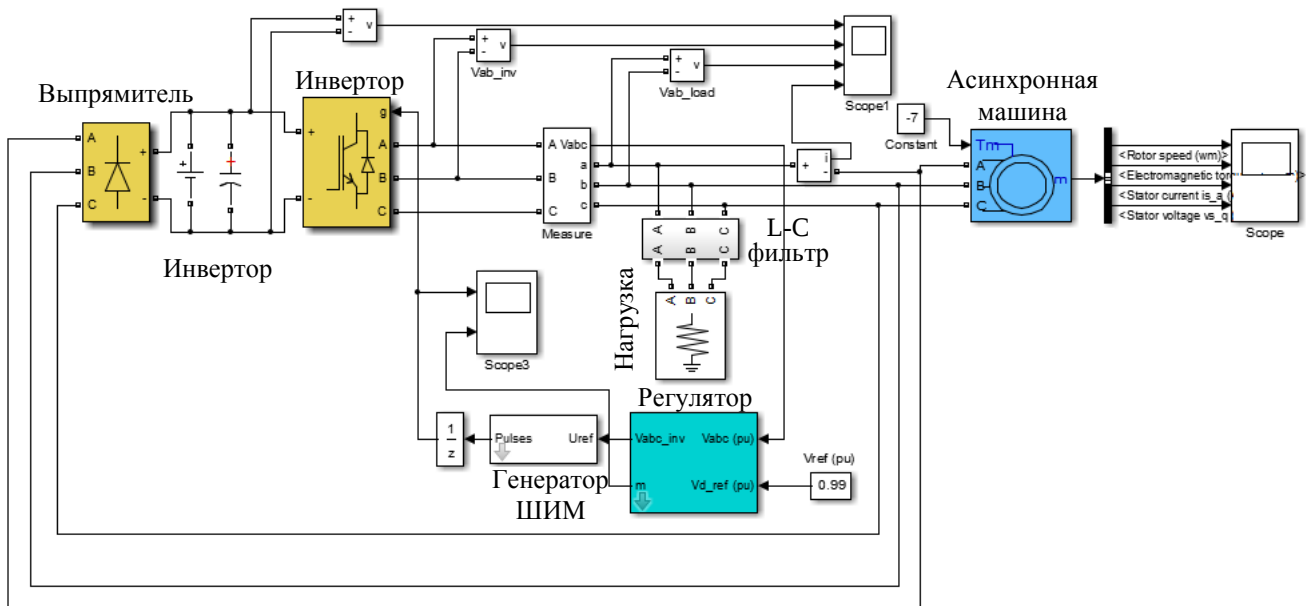


Рисунок 6. Модель асинхронного генератора с инверторным возбуждением

Модель имеет пропорционально – интегральный регулятор напряжения, управляющий величиной выдаваемой инвертором реактивной мощности для поддержания амплитуды и частоты напряжения на зажимах генератора (рис. 7).

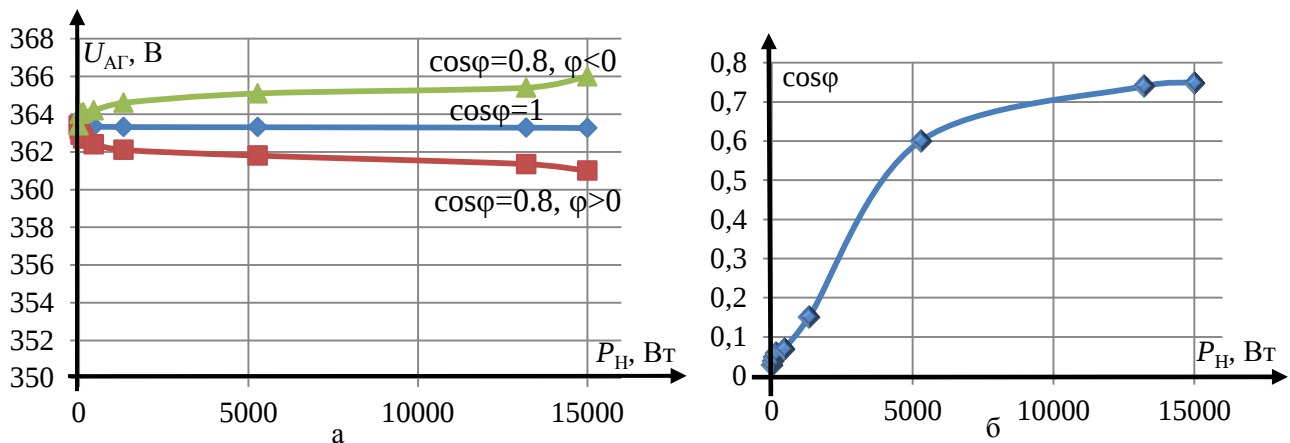


Рисунок 7. а – внешние характеристики замкнутой МСГ;

б – график зависимости коэффициента мощности от величины нагрузки

Регулятор напряжения поддерживает на номинальном уровне амплитуду генерируемого напряжения, жесткость характеристики обеспечивается изменением скважности импульсов ШИМ - контроллера и фазового сдвига тока возбуждения (рис. 7). Работа на активную и активно-индуктивную нагрузку характеризуется снижением амплитуды выходного напряжения, в том числе за счет размагничивающих явлений АМ. В разомкнутой системе наблюдается уменьшение частоты генерируемого напряжения по причине увеличения индуктивности намагничивающего контура L_m из-за уменьшения насыщения машины (рис. 8) и сдвига рабочей точки на кривой намагничивания. Стабилизация амплитуды генерируемого напряжения приводит к увеличению

намагничивающего тока и, как следствие, к уменьшению индуктивности электрической машины L_m . Таким образом, регулирование двух параметров выходного напряжения (амплитуды и частоты напряжения) происходит за счет наличия одной обратной связи, посредством оценки отклонения фазного напряжения от эталонной величины и перестройки резонансной частоты колебательного контура.

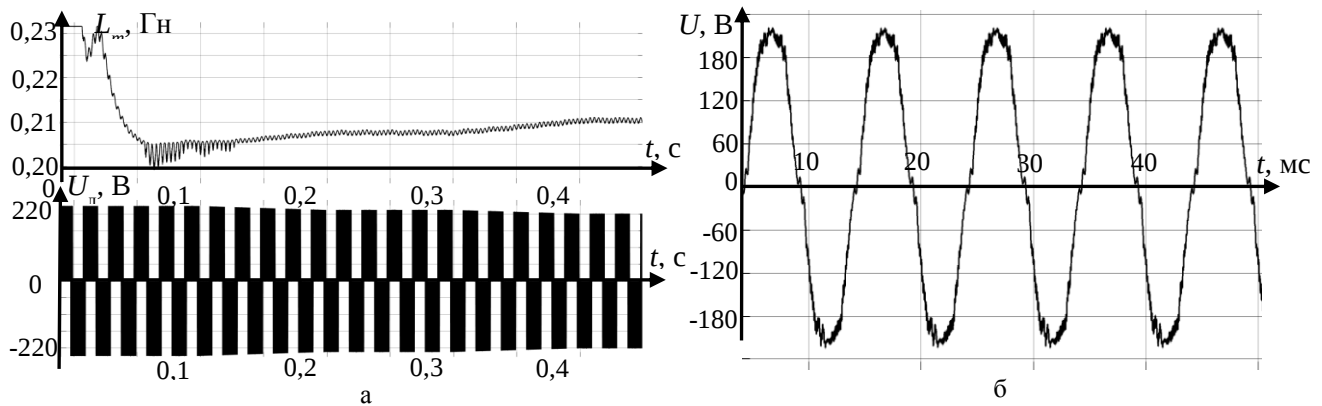


Рисунок 8. Характеристики МСГ: а – индуктивность намагничивающего контура и линейное напряжение в разомкнутой системе; б – напряжение МСГ после L - C фильтра

Проведена оценка характеристик СГЭЭ в стационарных, динамических и аварийных режимах работы. Определена устойчивость работы генератора к подключению нагрузки (рис. 9), осуществимость стабилизации напряжения и частоты и использования L - C фильтра (рис. 8). Показана способность МСГ при кратковременной перегрузке использовать инвертор в качестве источника активной энергии и прекращать генерацию при межфазных коротких замыканиях.

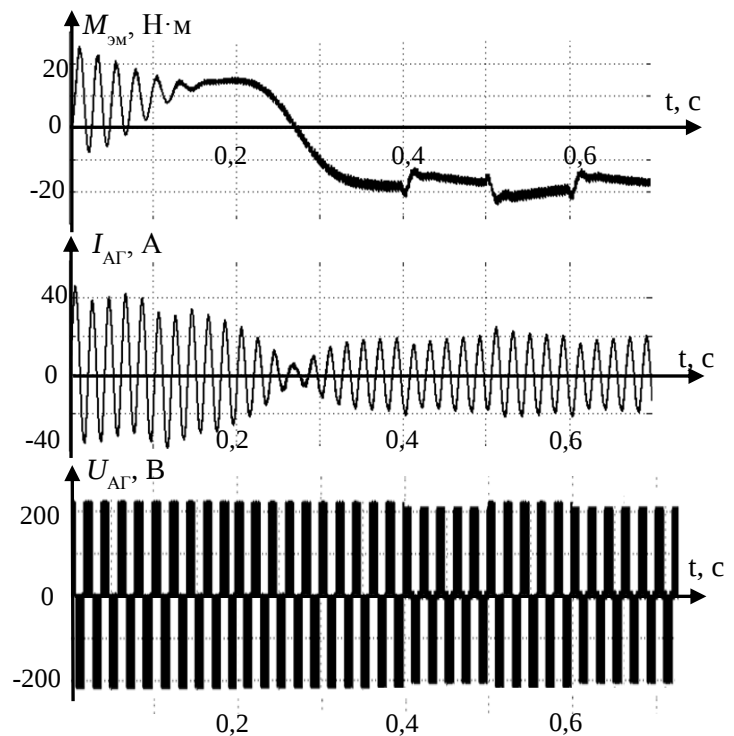
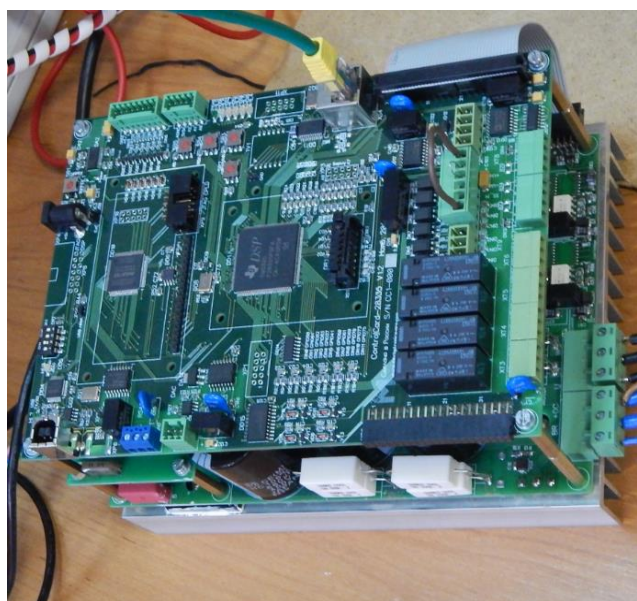
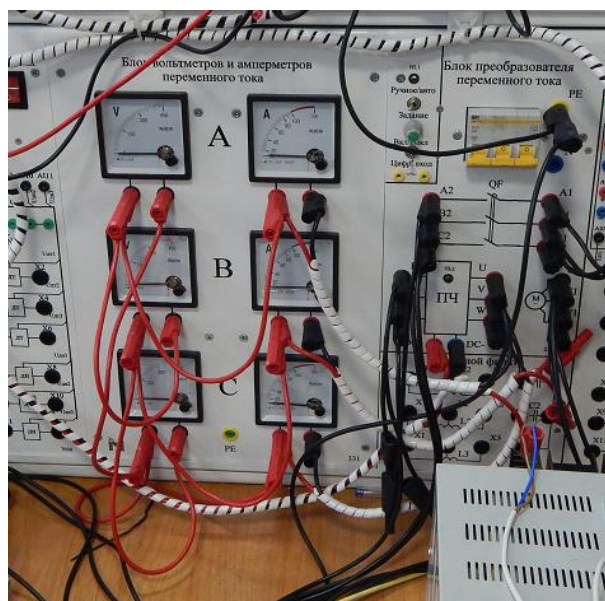


Рисунок 9. Характеристики МСГ при периодическом подключении нагрузки: а – электромагнитный момент; б – ток генератора; в – напряжение генератора

В четвертой главе приведены принцип действия и алгоритм работы разработанных экспериментальных установок генерирования электроэнергии с ППП (рис. 10). Описаны используемые электрические машины, частотные преобразователи и измерительные устройства.



а



б

Рисунок 10. Внешний вид экспериментальной установки ДПТ-АГ
а – частотный преобразователь $DC-AC$; б – панель стенда

Исследована работа экспериментальных установок при различной величине нагрузки. Для компенсации размагничивающей реакции АМ, поддержания стабильного напряжения на зажимах статора при подключении активной нагрузки производилась регулировка тока инвертора (рис. 11).

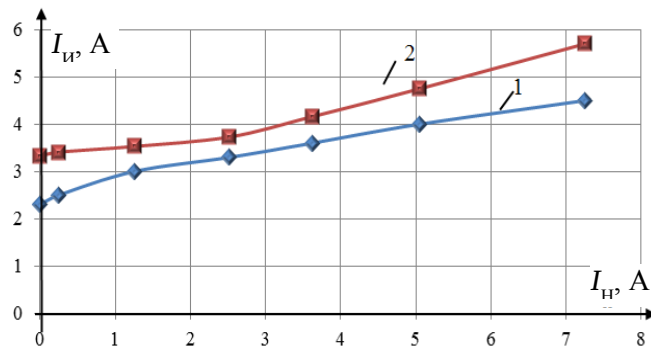


Рисунок 11. Регулировочная характеристика МСГ на базе АМ:

1 – экспериментальная кривая; 2 – расчетная кривая

Представлены результаты работы имитационной и экспериментальной систем. Проверка результатов была произведена по величинам генерируемого тока, вращающего момента, потребляемой реактивной мощности (рис. 12) и коэффициенту мощности от величины нагрузки.

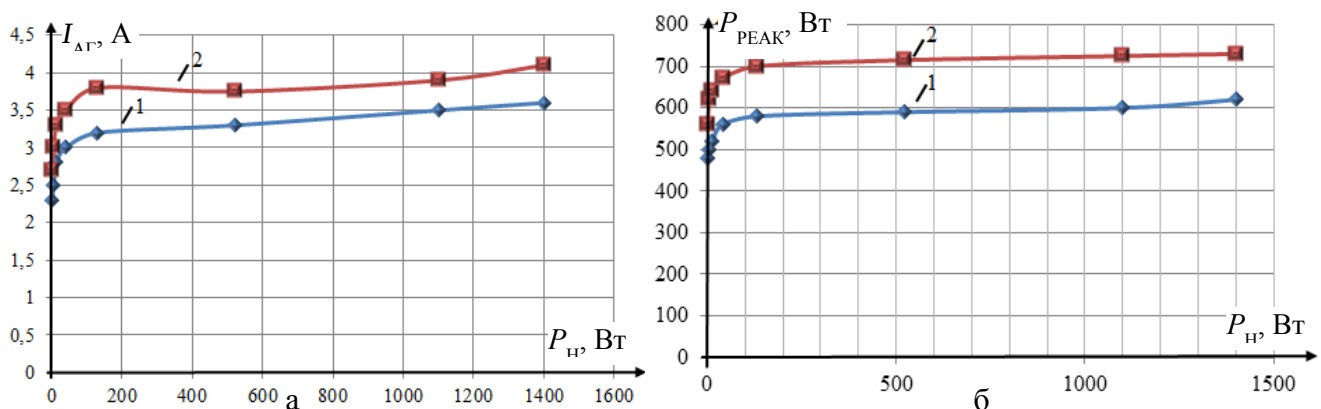


Рисунок 12. Рабочие характеристики: а – зависимость тока генератора от нагрузки АГ;

б – зависимость потребляемой реактивной энергии от нагрузки АГ

1 – экспериментальная кривая; 2 – расчетная кривая

Проведен анализ полученных результатов. Результаты экспериментального исследования рабочих характеристик соответствуют имитационному моделированию. Отклонение остается практически неизменным во всем диапазоне мощности, что свидетельствует о возможности применения разработанной имитационной модели для анализа поведения системы. В связи с аддитивным характером отклонений относительная величина уменьшается с ростом величины нагрузки и находится в диапазоне от 13 до 20%.

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.

Основные результаты работы, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. 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.
2. 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.
3. Падалко, Д.А. Методология способов анализа электромеханических систем / Д.А. Падалко // Вестник Кузбасского государственного технического университета: научно-технический журнал. – 2016. – № 1. – С. 104–110.
4. 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.

Другие наиболее важные публикации по теме диссертации:

5. Гарганеев, А.Г. Условия самовозбуждения электромашиных генераторов с позиции теории автоматического управления / А. Г. Гарганеев, Д. А. Падалко // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит: общегосударственный научно-производственный и информационный журнал / Харьковский политехнический институт (ХПИ). – 2013. – Специальный выпуск Т. 2, № 8 (114). – С. 187–189.

6. Garganeev, Alexander G. Principles of electric power generation based on the self-excited electrical machines using the perspectives of the automatic control theory / A. G. Garganeev, D. A. Padalko // Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM) : 14th International Conference of Young Specialists, 1–5 July 2013, Novosibirsk. – [S. l.]: IEEE, 2013. – P. 319–321.

7. Падалко, Д. А. Системы электроснабжения на основе электрических машин с самовозбуждением / Д. А. Падалко, А. Г. Гарганеев // Вісник Національного технічного університету "ХПІ": збірник наукових праць тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях / Харьковский политехнический институт (ХПИ). – 2013. – № 18 (991). – С. 28–33.

8. Падалко, Д. А. Условия самовозбуждения автономных систем генерирования электроэнергии с позиции теории автоматического управления / Д. А. Падалко // Современная техника и технологии: сборник трудов XX международной научно-практической конференции, г. Томск / НИ ТПУ . – 2014. – Т. 1. – С. 35–36.

9. Padalko, Dmitry A. Resonance Phenomen Analysis in Induction Generator / D. A. Padalko, A. G. Garganeev, P.V. Tyuteva // Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM) : 17th International Conference of Young Specialists, 30 June - 4 July 2016, Novosibirsk. – IEEE, 2016. – P. 532–535.

Личный вклад автора. Автор диссертационной работы принимал непосредственное участие в теоретических исследованиях условий самовозбуждения АГ и ГПТ, а также режимов работы МСГ, разработке, планировании и проведении экспериментальных исследований, анализе полученных данных, написании текстов статей и докладов. Восемь работ написаны автором единолично. В работах, написанных в соавторстве, автору принадлежат: имитационная модель асинхронного генератора [1,2], математические выражения условий возбуждения АГ [5], моделирование системы регулирования напряжения, модель и метод исследования параметрического контура [1, 6].