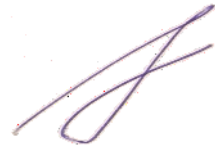


На правах рукописи



ХАРИТОНОВ АНДРЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

**АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2021

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

Научный руководитель: **Золотухин Юрий Николаевич**,
доктор технических наук, старший научный сотрудник,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт автоматизации и электротехники Сибирского
отделения Российской академии наук, лаборатория нечетких
технологий, главный научный сотрудник.

Официальные оппоненты: **Панфилов Дмитрий Иванович**,
доктор технических наук, профессор, Акционерное
общество «Научно-технический центр Федеральной
сетевой компании Единой энергетической системы»,
дирекция, научный руководитель;

Смоленцев Николай Иванович,
кандидат технических наук, доцент, Федеральное
государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Сибирский государственный
университет телекоммуникаций и информатики», кафедра
Технической электроники, доцент, помощник ректора по
научной работе.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет» (г. Томск)

Защита диссертации состоится «22» декабря 2021 года в 13 часов на заседании
диссертационного совета Д212.173.04 при Федеральном государственном бюджетном
образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный
технический университет» по адресу 630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20, I
корпус, конференц-зал.

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

Автореферат разослан «__» ноября 2021 г.

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



Максим Александрович Дыбко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Последние десятилетия основные тенденции в развитии авиационных систем электроснабжения определяются реализацией концепции «Более Электрического Самолёта» - «БЭС». Основными из них являются: повышение мощности каналов генерирования, максимальное значение мощности системы электроснабжения летательных аппаратов (СЭС ЛА) на дальне магистральных самолётах может достигать единиц МВт; стремление совмещать в одном агрегате различные функции, например, режимы генерирования электроэнергии и электростартерного запуска авиационных двигателей; переход на более высокое значение величин напряжений; отказ от системы стабилизации оборотов; использование в системах генерирования переменного тока переменной частоты.

Степень разработанности темы исследования. Разработке бортовых систем электроснабжения для БЭС посвящено достаточно много известных работ таких научных школ как МАИ, МЭИ, НГТУ, УГАТУ, МГТУ ГА, ТПУ, НТУ ХПИ, НТУ КПИ АО «АКБ Якорь», АО «Технодинамика», АО «Аэроэлектромаш» направленных на создание теоретических основ построения систем электроснабжения, методов анализа и синтеза силовых схем, систем и алгоритмов управления. Различные аспекты теоретического и практического плана построения систем электроснабжения и отдельных её элементов для автономных объектов нашли отражение в трудах В.Г. Андреева, И.И. Алексеева, Н.И. Бородина, Г.В. Грабовецкого, А.Г. Гарганеева, А.О. Давидова, Б.С. Зечихина, Г.С. Зиновьева, Ю.М. Инькова, В.В. Иванцова, Ф.Р. Исмагилова, В.А. Калия, Д.Л. Калужского, К.Л. Ковалева, Ю.И. Конева, С.Ф. Коняхина, Д.В. Коробкова, Н.Н. Лаптева, А.В. Левина, И.И. Лукина, С.М. Мусина, Г.С. Мыцыка, И.В. Нежданова, С.П. Халютин, С.А. Харитонов, В.А. Цишевского, Е.Е. Чаплыгина, М.М. Юхнина, Э.М. Чехета и многих других.

По данным исследований реализация концепции БЭС применительно к среднемагистральному самолёту позволит получить: снижение потребления топлива – 8–12 %; снижение полной взлётной массы – 6–10 %; снижение прямых эксплуатационных расходов – 5–10 %; снижение стоимости жизненного цикла – 3–5 %; увеличение среднего налёта на отказ – 5–6 %; снижение времени технического обслуживания – 4–4,5 %. Достижение указанной эффективности БЭС сопряжено с созданием перспективных систем электроснабжения, удовлетворяющим всем вышеуказанным тенденциям.

В диссертационной работе исследуется базовый элемент одной из таких систем, а именно система электроснабжения постоянного тока (СЭС ПТ) на основе синхронного генератора с комбинированным возбуждением (СГК) при переменной частоте вращения вала и активным выпрямителем напряжения (АВН). На основе такой СЭС ПТ могут быть построены практически все виды систем генерирования постоянного и переменного тока, при этом реализуется возможность обеспечения режима электростартерного запуска.

Целью работы является решение важной научно-технической проблемы исследования перспективной системы электроснабжения постоянного тока

летательных аппаратов на базе синхронного генератора с комбинированным возбуждением, анализ способов выбора параметров и разработка энергоэффективных алгоритмов управления синхронным генератором и полупроводниковыми преобразователями электрической энергии.

Для достижения цели необходимо решение следующих **задач**:

1. разработка математической модели СЭС ПТ на основе СГК и АВН;
2. разработка способов выбора параметров СГК в СЭС ПТ при переменной частоте вращения вала СГК;
3. синтез алгоритмов управления СГК и АВН, обеспечивающих минимизацию перетоков неактивной мощности между СГК и АВН и заданную величину выходного напряжения;
4. анализ электромагнитных процессов в системе СЭС ПТ в установившемся режиме, определение оптимального способа выбора параметров;
5. проведение модельного эксперимента работы СЭС ПТ;
6. разработка физического макета и проведение экспериментальных исследований СЭС ПТ.

Методы исследования. Для получения основных результатов диссертационной работы использованы базовые методы анализа теории электрических цепей, методы аналитического и численного решения линейных дифференциальных уравнений и модельный эксперимент в пакете прикладных программ. В работе применяются Фурье преобразование, матричное исчисление, различные разделы линейной алгебры и математического анализа. Экспериментальные исследования проводятся путём физического макетирования.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

1. В разработке математической модели СЭС ПТ на базе СГК с переменной частотой вращения вала и АВН, учитывающей основные параметры генератора и полупроводникового преобразователя.
2. Предложены и исследованы способы выбора параметров СГК с переменной частотой вращения вала в составе СЭС ПТ для ЛА. Аналитически определены базовые параметры генератора при работе с АВН в составе СЭС ПТ.
3. Предложены алгоритмы управления СГК и АВН, обеспечивающие минимизацию перетоков неактивной мощности между генератором и инвертором напряжения и заданную величину выходного напряжения.
4. В результатах проведённого анализа электромагнитных процессов в системе СЭС ПТ при использовании предложенных способов выбора параметров СГК и алгоритмов управления.

Практическая ценность работы:

1. Предложена структура СЭС ПТ ЛА на основе СГК с переменной частотой вращения вала и АВН, обеспечивающая режим генерирования постоянного тока и электростартерный запуск от электрической сети постоянного тока.
2. Определены базовые параметры СГК при работе с АВН в составе СЭС ПТ при переменной частоте вращения вала генератора.

3. Предложены алгоритмы управления СГК и АВН в составе системы электроснабжения постоянного тока для ЛА при переменной частоте вращения вала генератора.
4. Определён способ выбора параметров СГК и алгоритмы управления СЭС ПТ, минимизирующие перетоки неактивной мощности между СГК и АВН и массогабаритные показатели СГК.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель СЭС ПТ на основе СГК с переменной частотой вращения вала и АВН, учитывающая основные параметры генератора и полупроводникового преобразователя.
2. Варианты выбора параметров СЭС ПТ и результаты расчета основных параметров СГК при переменной частоте вращения вала и работе на АВН.
3. Результаты анализа электромагнитных процессов в СЭС ПТ при переменной частоте вращения вала генератора.
4. Энергоэффективные алгоритмы управления СЭС ПТ при широком диапазоне изменения нагрузки и частоты вращения вала генератора.

Достоверность полученных результатов подтверждается корректной постановкой задач, адекватностью применения математического аппарата, результатами модельного и физического экспериментов.

Апробация работы. Основные результаты доложены, обсуждены и одобрены на следующих научных семинарах и конференциях: The International Conference on Computer as a Tool (EUROCON 2007), г. Варшава (Польша), 2007 г., Международная конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП», г. Новосибирск, НГТУ, 2018 г., Международная конференция молодых специалистов по микро/нано технологиям и электронным приборам «EDM», г. Новосибирск, НГТУ, 2018 г., Международная Уральская конференция «Электропривод переменного тока ACED», г. Екатеринбург, 2018 г., Научные чтения по авиации, посвящённые памяти Н. Е. Жуковского, г. Москва, 2018 г., International Conference Problems of Informatics, Electronics, and Radio Engineering (PIERE), г. Новосибирск, 2020 г.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 16 печатных работ, в том числе 2 работы в журналах из Перечня ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени доктора и кандидата наук, 3 работы опубликованы в материалах зарубежных конференций, входящих в базы данных Scopus, Web of Science.

Личный вклад автора заключается в участии в постановке задач исследований, разработке структурного варианта и математической модели СЭС ПТ ЛА, аналитических и численных расчётах электромагнитной системы СГК, анализе вариантов параметрического способа управления возбуждением СГК и выбора параметров электромагнитной системы генератора, проведении имитационного моделирования работы системы.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем диссертации 208 страниц, в том числе 144 рисунка, 4 таблицы. Список литературы содержит 78 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

Первая глава посвящена анализу существующих систем электроснабжения летательных аппаратов и современных тенденций их развития.

В диссертационной работе предложен вариант построения системы электроснабжения постоянного тока СЭС ПТ, на основе синхронного генератора с комбинированным возбуждением (СГК) и активного выпрямителя напряжения (АВН), отвечающей по структуре построения и реализуемым функциям всем современным тенденциям. Структурная схема системы представлена на Рисунке 1.

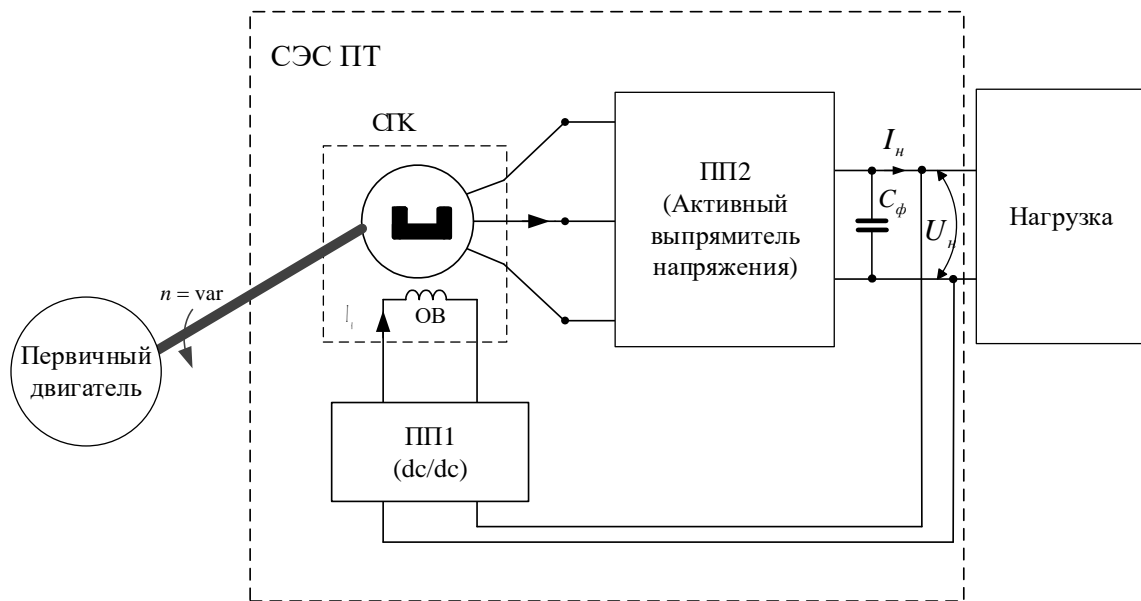


Рисунок 1 – Структурная схема СЭС ПТ

В состав исследуемой СЭС ПТ входят СГК и два полупроводниковых преобразователя (ПП). СГК осуществляет преобразование механической энергии вращающегося с переменной частотой вала ($n = \text{var}$) в электрическую энергию переменного тока. Первый полупроводниковый преобразователь (ПП1) является DC/DC преобразователем и осуществляет функцию регулирования тока возбуждения СГК с целью стабилизации выходного напряжения СЭС ПТ или СГК и имеет относительно небольшую мощность. Второй полупроводниковый преобразователь (ПП2) построен на базе инвертора напряжения (ИН) с высокочастотной широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), в режиме генерирования системы он выполняет функцию активного выпрямителя напряжения (АВН) и обеспечивает качественные характеристики генерируемого постоянного напряжения, уменьшает перетоки

неактивной мощности между СГК и ИН. В режиме электростартерного запуска ИН преобразует напряжение постоянного тока, например, аккумуляторной батареи в напряжение переменного тока и обеспечивает перевод СГК в двигательный режим.

К достоинствам предложенной системы относятся:

1. форма тока генератора близка к синусоидальной;
2. роль продольного элемента силового фильтра выполняют реактансы генератора;
3. силовая схема обладает возможностью повышения выходного напряжения постоянного тока по сравнению с неуправляемым выпрямителем (НВ);
4. благодаря изменению направления потока мощности в системе возможен режим электростартерного запуска первичного двигателя;
5. при наличии высокочастотной широтно-импульсной модуляции значительно уменьшается величина ёмкости конденсатора выходного фильтра, улучшаются динамические параметры системы при импульсной динамической нагрузке;
6. благодаря применению СГК при переменной частоте вращения вала не повышаются требования по допустимому напряжению элементов АВН.

Аналізу таких систем на примере СЭС ПТ посвящена настоящая работа. В работе предложены способы выбора параметров генератора, алгоритмы управления генератором и активным выпрямителем напряжения, обеспечивающие минимизацию перетоков неактивной мощности между СГК и АВН, тем самым уменьшающие массу и габариты системы.

Вторая глава посвящена рассмотрению и разработке математических моделей основных компонентов, входящих в состав СЭС ПТ, функциональная схема системы представлена на Рисунке 2.

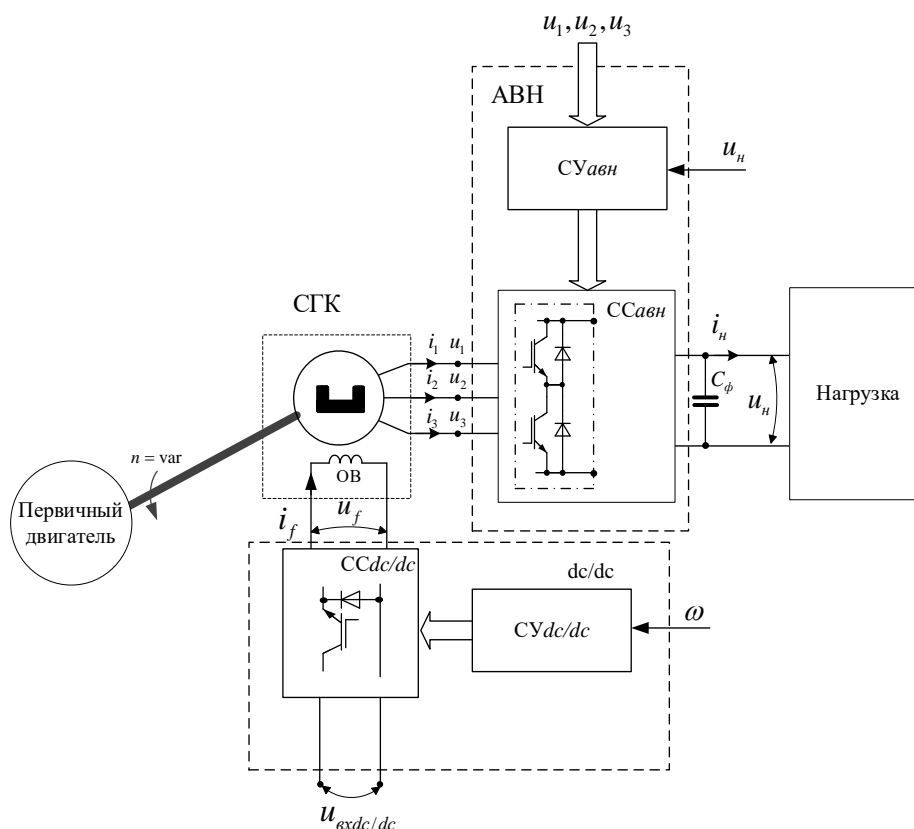


Рисунок 2 – Функциональная схема СЭС ПТ ЛА

В работе рассмотрены следующие математические модели:

- Регулируемого синхронного генератора с комбинированным возбуждением во вращающейся системе координат при переменной частоте вращения вала и работе на АВН.
- Активного выпрямителя напряжения в «abc» координатах для анализа скалярных алгоритмов управления с неявнополюсным СГК.
- Активного выпрямителя напряжения в « $\alpha\beta$ » координатах для анализа векторных алгоритмов управления с неявнополюсным СГК.
- Активного выпрямителя напряжения в «dq» координатах для анализа векторных алгоритмов управления с явнополюсным СГК.
- Упрощённая модель активного выпрямителя для основных гармоник напряжения и тока применяется.
- DC/DC преобразователя.

В диссертации предложен ряд структурных схем основных элементов СЭС ПТ. На Рисунке 3 приведена структурная схема модели DC/DC преобразователя, где обозначены: $СУ_{dc/dc}$ - микропроцессорная система управления, $\Delta u_{dc/dc}(M_{dc})$ - пульсационная составляющая напряжения преобразователя, M_{dc} - глубина модуляции, U_{on} - амплитуда опорного сигнала ШИМ.

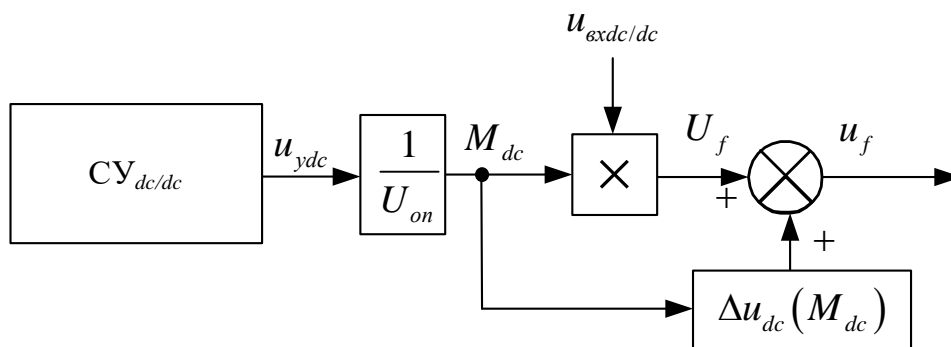


Рисунок 3 – Структурная схема модели DC/DC преобразователя

Получена полная структурная схема математической модели СЭС ПТ, модель представлена на Рисунке 4, на которой: L_d, L_q, L_f, r_s, r_f - параметры СГК, $\Delta u_d(M), \Delta u_q(M)$ - пульсационные составляющие напряжения АВН по продольной и поперечной осям.

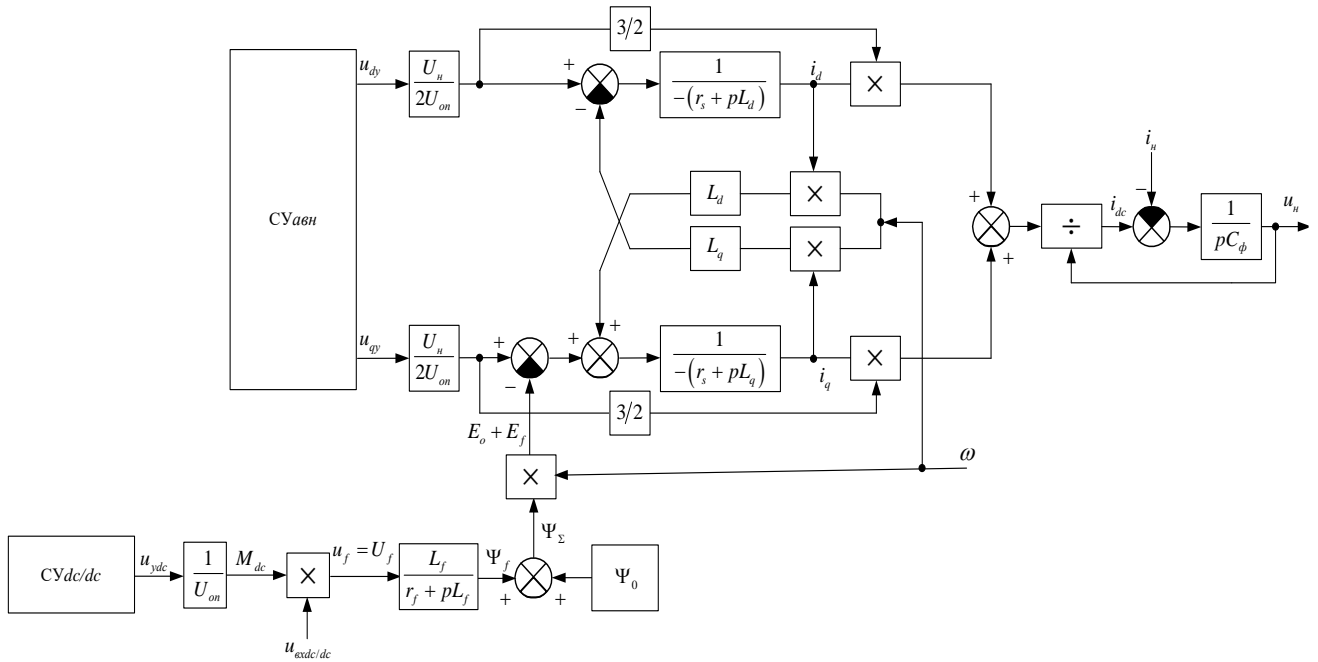


Рисунок 4 – Структурная схема полной модели СЭС ПТ

В третьей главе для системы СЭС ПТ предложены три варианта выбора параметров СГК (Рисунок 5) и управления его возбуждением в функции частоты напряжения СГК при изменяющейся нагрузке.

В первом варианте выбирается некоторое среднее значение частоты напряжения СГК ω_0 , на которой определяется потокосцепление, создаваемое постоянными магнитами Ψ_0 и ЭДС $E_{0ном}$ исходя из обеспечения генератором номинальной нагрузки при нулевом потокосцеплении от тока возбуждения Ψ_f . В этом случае потокосцепление Ψ_f для обеспечения стабильности напряжения на нагрузке при $\omega = var$ должно быть знакопеременным.

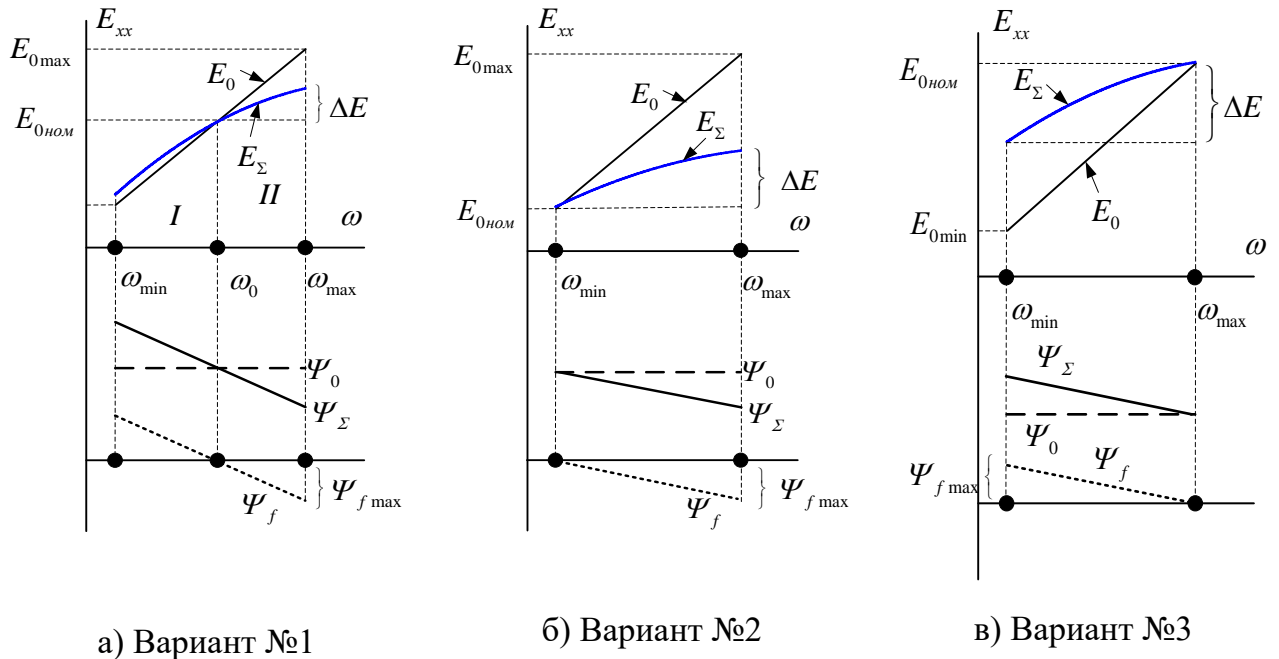


Рисунок 5 – Три варианта выбора параметров СЭС ПТ

Во втором варианте потокосцепление Ψ_0 и ЭДС $E_{0ном}$ для номинального режима нагрузки выбираются при $\omega = \omega_{min}$. В этом случае потокосцепление Ψ_f с целью стабилизации U_n при изменении частоты ω должно быть всегда противоположного знака по отношению к потокосцеплению Ψ_0 и увеличиваться по величине с ростом частоты ω .

В третьем варианте потокосцепление Ψ_0 и ЭДС $E_{0ном}$ для номинального режима нагрузки выбираются при $\omega = \omega_{max}$. Очевидно, что в этом случае для достижения цели стабилизации U_n при изменении частоты ω , потокосцепление Ψ_f должно быть одного знака с потокосцеплением Ψ_0 и уменьшаться с уменьшением частоты ω .

Для каждого из вариантов определяются следующие параметры СГК:

- Номинальная частота выходного напряжения - ω_0 .
- Потокосцепление, создаваемое постоянными магнитами - Ψ_0 .
- Номинальное значение ЭДС холостого хода при нулевом значении тока возбуждения - $E_{0ном}$.
- По заданному току короткого замыкания СЭС определяются реактансы генератора при X_0 (X_0 полное реактивное сопротивление якоря для неявнополюсного и X_d для явнополюсного генератора).
- Потокосцепление обмотки возбуждения Ψ_f и его зависимость от частоты вращения вала генератора и тока нагрузки.
- Зависимость изменения ЭДС холостого хода генератора $E_{хх}$ от частоты вращения вала и тока нагрузки при условии поддержания заданной величины напряжения на выходе системы.

Проведённые исследования показали, что с методической точки зрения в системе, спроектированной по Варианту № 1, установленная мощность транзисторов будет минимальной, если её оценивать, как произведение максимальной величины тока, который будет через него протекать, на максимальную величину напряжения, которое может быть к нему приложено.

В Таблице 1 приведены полученные основные параметры СГК в составе СЭС ПТ при переменной частоте вращения вала в диапазоне $D = \omega_{max} / \omega_{min} = 2$. Как следует из данной таблицы, максимальное потокосцепление от постоянных магнитов характерно для Варианта № 2, а минимальное по определению режима соответствует Варианту № 3. При этом потокосцепление, создаваемое обмоткой возбуждения, имеет максимальную величину в Вариантах № 2 и 3. Если принять, что в оговорённых условиях сравнения, установленная мощность синхронного генератора пропорциональна суммарному потокосцеплению $\Psi_{fmax} + \Psi_0$, то теоретически в случае Варианта № 1 СГК будет иметь меньшую установленную мощность.

Таким образом, из сопоставления вариантов проектирования СЭС ПТ, следует, что с точки зрения установленной мощности АВН и СГК предпочтительным является Вариант №1.

Таблица 1 - Соотношения основных величин для различных вариантов проектирования электромагнитной системы СГК

Номер варианта	Ψ_0	$\frac{\Psi_{f \max}}{\Psi_0}$ $D = 2$	$\Psi_{f \max}$ $D = 2$	$\Psi_{f \max} / \left(\frac{E_{0ном}}{\omega_{\max}} \right)$ $D = 2$
1	$\Psi_0 = \frac{E_{0ном}}{\omega_0} =$ $= 1.33 \cdot \frac{E_{0ном}}{\omega_{\max}}$	0.413	$0.549 \cdot \frac{E_{0ном}}{\omega_{\max}}$	0.549
2	$\Psi_0 = \frac{E_{0ном}}{\omega_{\min}} =$ $= 2 \cdot \frac{E_{0ном}}{\omega_{\max}}$	0.69	$1.38 \cdot \frac{E_{0ном}}{\omega_{\max}}$	1.38
3	$\Psi_0 = \frac{E_{0ном}}{\omega_{\max}}$	0.925	$0.925 \cdot \frac{E_{0ном}}{\omega_{\max}}$	0.925

Для трёх вариантов выбора параметров предложены следующие вида алгоритмов управления:

- Управление СЭС ПТ на основе неявнополюсного СГК и АВН в функции изменения частоты напряжения генератора.
- Управление СЭС ПТ на основе неявнополюсного СГК и АВН с нулевым значением реактивного тока генератора.
- Управление СЭС ПТ на основе явнополюсного СГК и АВН. Фаза основной гармоники тока АВН совпадает с фазой ЭДС СГК.

Получены аналитические выражения зависимостей для мощностей, напряжений, токов, потокосцеплений и коэффициента мощности по основной гармонике в системе.

Для управления СЭС ПТ на основе неявнополюсного СГК и АВН в функции изменения частоты напряжения генератора получен закон управления и выражения для выбора основных параметров СГК, формулы приведены ниже, в качестве примера, для Варианта № 1 выбора параметров СГК:

$$\Psi_f = \frac{-\Psi_{f \max}}{\omega_{\max} - \omega_0} (\omega - \omega_0), \quad I_f = \frac{-I_{f \max}}{\omega_{\max} - \omega_0} (\omega - \omega_0) = F \{ \omega, I_{f \max} \},$$

$$F \{ \omega, I_{f \max} \} = \frac{-I_{f \max}}{\omega_{\max} - \omega_0} (\omega - \omega_0),$$

$$E_{0ном} = \sqrt{(k_u \cdot M \cdot U_n)^2 + \left(X_0 \cdot \frac{k_{пер} \cdot I_{нном}}{3k_u \cdot M} \right)^2}, \quad I_{кз0} = \frac{E_{0ном}}{X_0} = \frac{\Psi_0}{L}.$$

На Рисунке 6 приведена структурная схема управления током возбуждения.

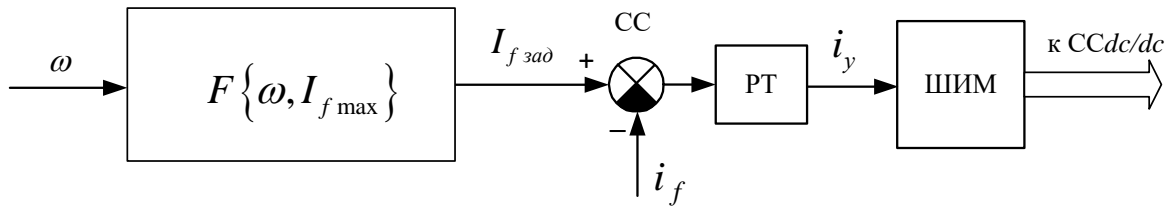


Рисунок 6 - Структурные схемы алгоритма регулирования тока возбуждения СГК

Ниже, в виде графиков приведена зависимость основных энергетических показателей системы от режима работы.

Как следует из Рисунка 9 данный алгоритм управления позволяет минимизировать реактивную мощность по основной гармонике ($\chi_1 = \cos \varphi \rightarrow 1$) в режимах близких к номинальному. На краях частотного диапазона реактивная мощность существенна.

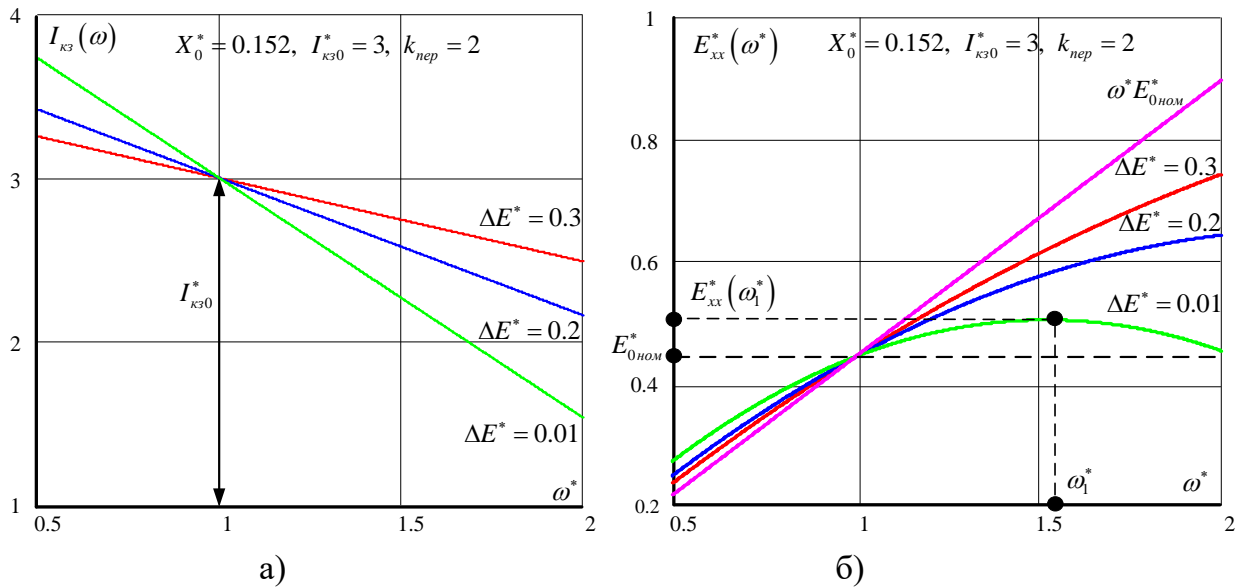


Рисунок 7 - Зависимости относительных значений: а) тока короткого замыкания $I_{кз}^*(\omega^*)$ и б) ЭДС холостого хода генератора ЭДС $E_{xx}^*(\omega^*)$ от частоты напряжения СГК ω^*

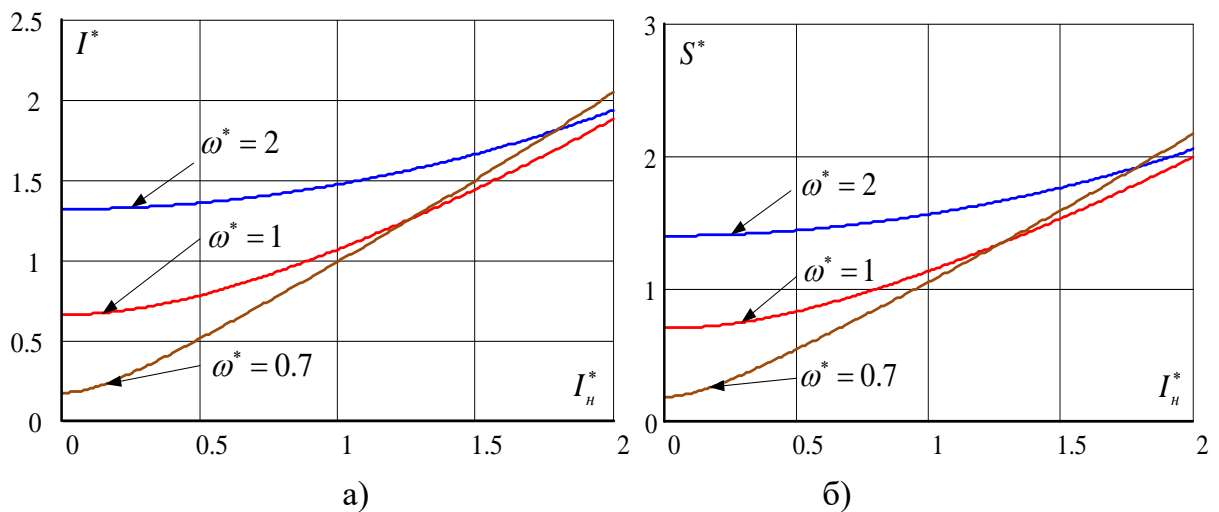


Рисунок 8 - График зависимости тока СГК (а) и полной мощности СГК (б) от тока нагрузки СЭС ПТ (I_n^*)

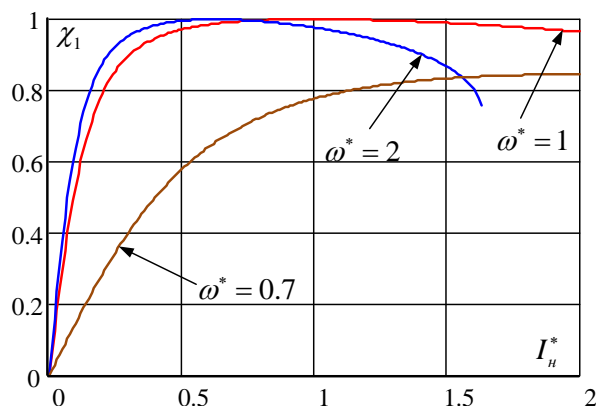


Рисунок 9 - Графики зависимости коэффициента мощности по основной гармонике СГК от тока нагрузки СЭС ПТ (I_H^*)

На Рисунке 10 приведён годограф тока СГК, построенный в полярной системе координат в соответствии с соотношением вида:

$$I^*(\varphi) = -\frac{k_u M}{\omega^* X_0^*} \cdot \sin \varphi \pm \sqrt{\left(I_{\dot{e}\zeta}^*\right)^2 - \left(\frac{k_u M}{\omega^* X_0^*} \cdot \cos \varphi\right)^2}, \text{ где } I^*(\varphi) \text{ - зависимость относительного}$$

значения тока СГК от фазового сдвига относительно напряжения при относительном значении частоты (ω^*), реактанса генератора (X_0^*) и заданной глубине модуляции M .

На данном годографе отражены важные для изучения состояния системы точки: a, b, c, d, e, f, при этом для каждой точки определены координаты. Правая полуплоскость графика отражает генераторный режим работы системы, левая – двигательный режим. Минимальное потребление реактивной мощности соответствует положению вектора тока в точке b. Выше и ниже её происходит потребление индуктивного или ёмкостного тока.

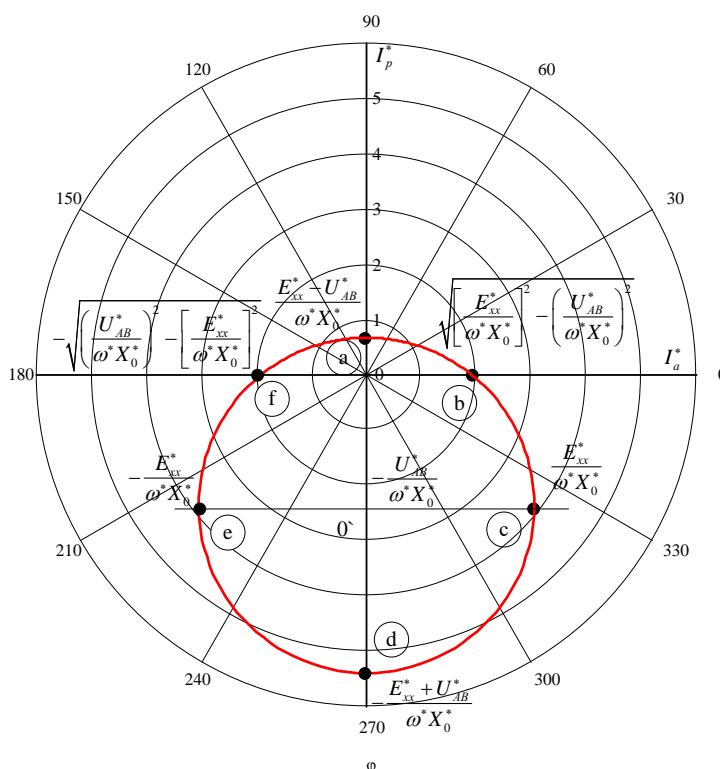


Рисунок 10 - Годограф тока СГК с характерными точками

Для управления СЭС ПТ на основе неявнополюсного СГК и АВН с нулевым значением реактивного тока генератора получены выражения для основных параметров СГК и АВН, формулы приведены ниже, также для Варианта № 1 выбора параметров СГК:

$$\Psi_f = -\Psi_0 + \frac{1}{\omega} \sqrt{(k_u M \cdot U_n)^2 + \left(\omega L \cdot \frac{I_n}{3k_u \cdot M} \right)^2},$$

$$I_f = \left[-\Psi_0 + \frac{1}{\omega} \sqrt{(k_u M \cdot U_n)^2 + \left(\omega L \cdot \frac{I_n}{3k_u \cdot M} \right)^2} \right] \frac{1}{L_f} = F \{ \omega, M, U_n, I_n \}, \quad (1)$$

$$E_{xx} = \omega \cdot \Psi_\Sigma = \omega \cdot (\Psi_0 + \Psi_f) = \sqrt{(k_u M \cdot U_n)^2 + \left(\omega L \cdot \frac{I_n}{3k_u \cdot M} \right)^2},$$

$$\theta = \text{arctg} \frac{\omega L \cdot I_n}{3U_n (k_u M)^2}.$$

Структурная схема векторного управления АВН представлена на Рисунке 11. Здесь операторы $\mathcal{F}_{\hat{d}\hat{q}}$ и $\overline{\mathcal{F}}_{\hat{d}\hat{q}}$ осуществляют прямое и обратное преобразование Парка – Горева. Управление током возбуждения осуществляется в соответствии с алгоритмом представленным на рисунке 6 и с использованием функционала $F \{ \omega, M, U_i, I_i \}$ соотношения (1).

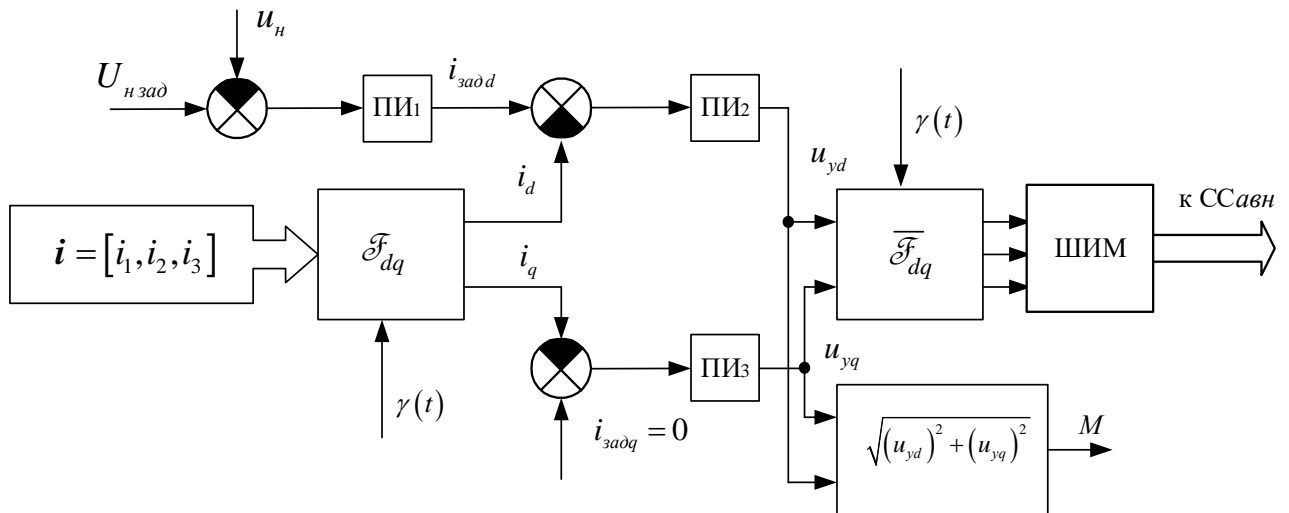


Рисунок 11 - Структурная схема векторного управления АВН

Далее, в виде графиков приведены некоторые зависимости от режимов работы основных энергетических показателей системы.

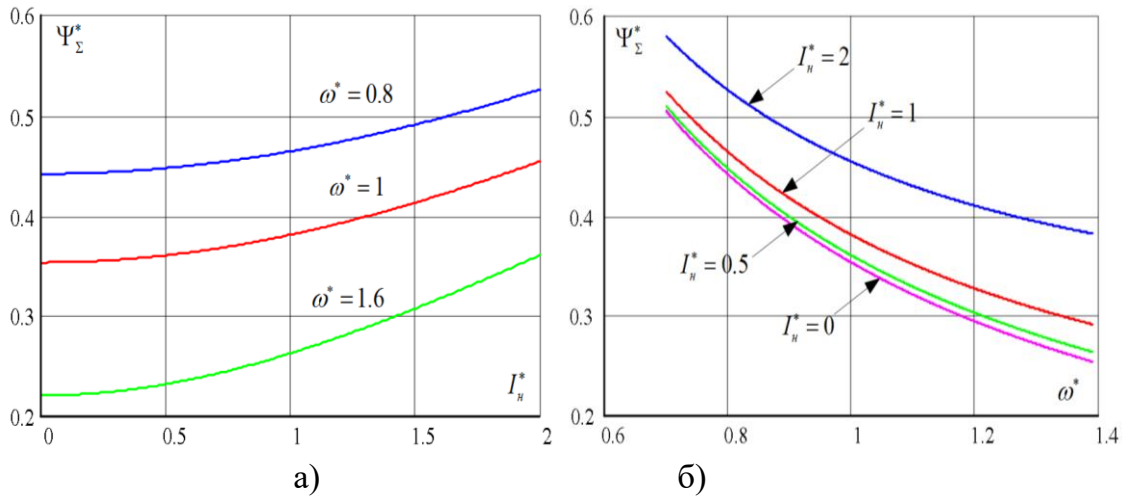


Рисунок 12 - Зависимость суммарного потокосцепления СГК Ψ_{Σ}^* от относительных значений частоты напряжения СГК ω^* (а) и тока нагрузки СЭС ПТ I_n^* (б)

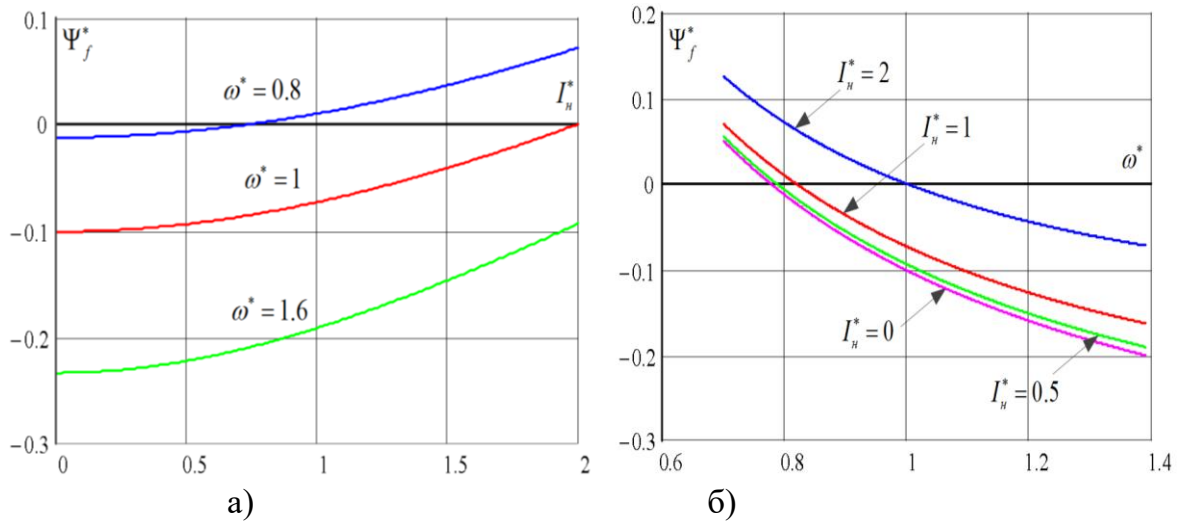


Рисунок 13 - Зависимость потокосцепления возбуждения СГК Ψ_f^* от относительных значений частоты напряжения СГК ω^* (а) и тока нагрузки СЭС ПТ I_n^* (б)

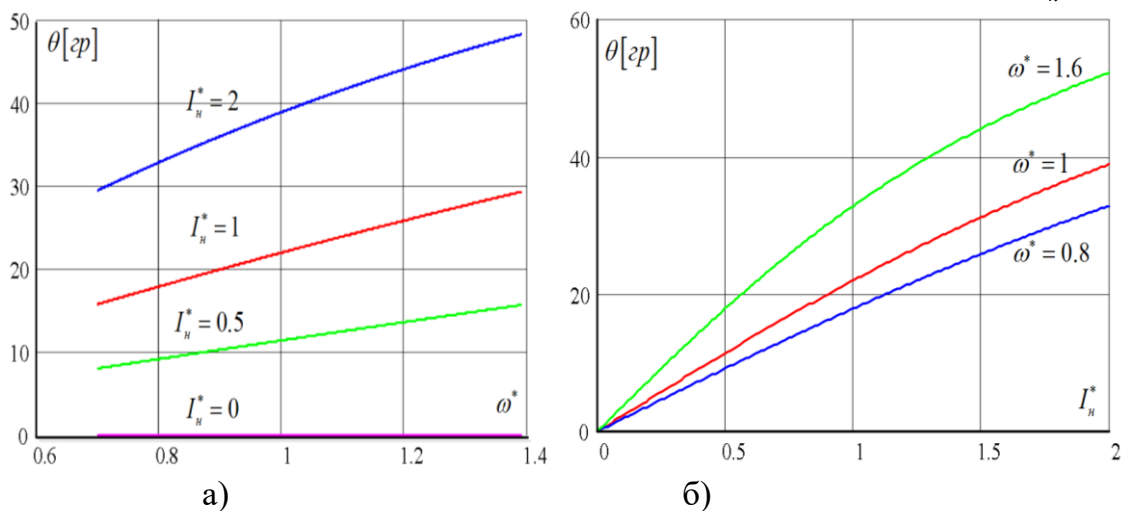


Рисунок 14 - Зависимость угла сигнала управления АВН θ от относительных значений частоты напряжения СГК ω^* (а) и тока нагрузки СЭС ПТ I_n^* (б)

Для управления СЭС ПТ на основе явнополюсного СГК и АВН, фаза основной гармоники тока АВН совпадает с фазой ЭДС СГК, получены выражения для основных параметров СГК и АВН при данном управлении. Формулы для Варианта № 1 выбора параметров СГК:

$$\Psi_f = -\Psi_0 + \frac{1}{\omega} \sqrt{(k_u M \cdot U_n)^2 + \left(\omega L \cdot \frac{I_n}{3k_u \cdot M} \right)^2},$$

$$I_f = \left[-\Psi_0 + \frac{1}{\omega} \sqrt{(k_u M \cdot U_n)^2 + \left(\omega L \cdot \frac{I_n}{3k_u \cdot M} \right)^2} \right] \frac{1}{L_f} = F\{\omega, M, U_n, I_n\}, \quad (2)$$

$$E_{xx} = \omega \cdot \Psi_\Sigma = \omega \cdot (\Psi_0 + \Psi_f) = \sqrt{(k_u M \cdot U_n)^2 + \left(\omega L \cdot \frac{I_n}{3k_u \cdot M} \right)^2},$$

$$\theta = \operatorname{arctg} \frac{\omega L \cdot I_n}{3U_n (k_u M)^2}.$$

Предлагаемое управление реализуется почти аналогично предыдущему, с той лишь разницей, что ток СГК ориентируется по оси d генератора, а управление током возбуждения производится с использованием функционала $F\{\omega, M, U_n, I_n\}$ соотношение (2).

Ниже, в виде графиков приведена часть зависимостей основных энергетических показателей системы от режимов работы системы.

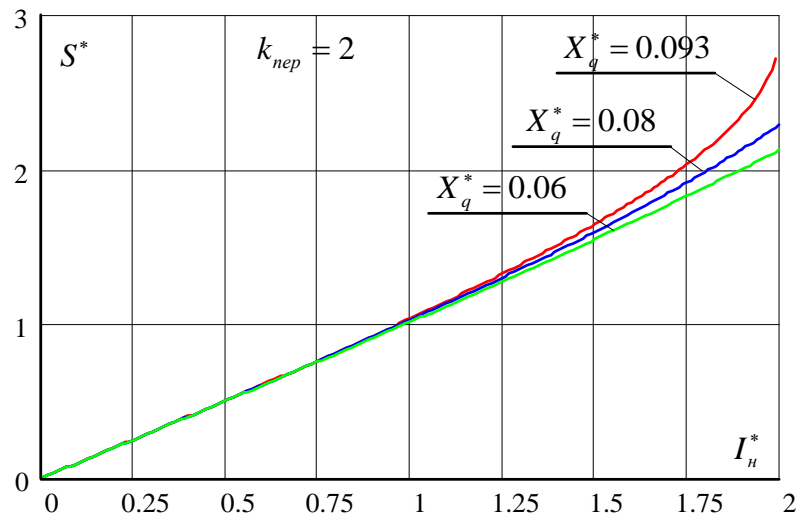


Рисунок 15 – Зависимость установленной мощности СГК S^* от тока нагрузки СЭС ПТ I_n^* для различных значений реактанса X_q^*

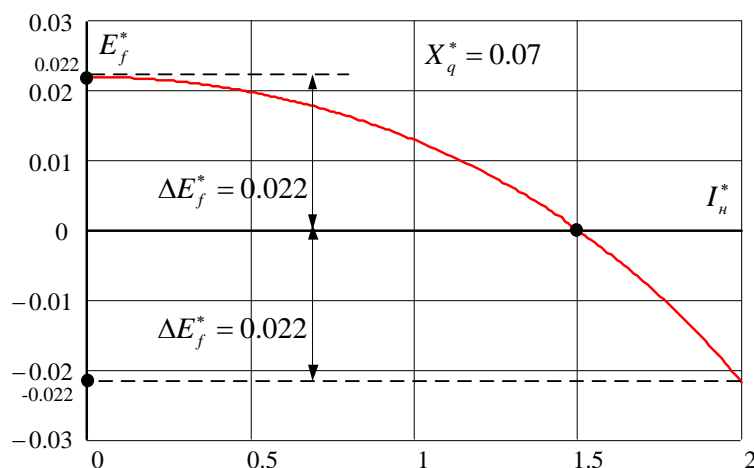


Рисунок 16 – Зависимость ЭДС возбуждения СГК от тока нагрузки СЭС ПТ

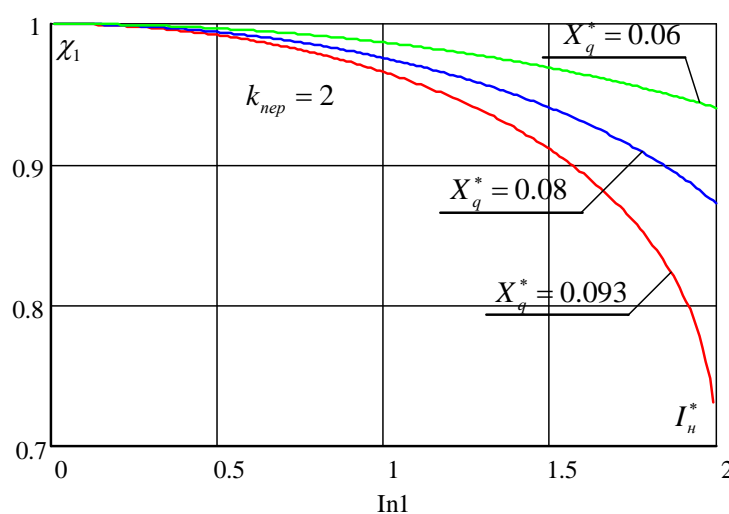


Рисунок 17 – Зависимость коэффициента мощности СГК по основной гармонике χ_1 от тока нагрузки СЭС ПТ I_n^* для различных значений реактанса СГК X_q^*

Основные выводы: Предложен параметрический алгоритм управления СЭС ПТ в генераторном режиме теоретически обеспечивающий поддержание на зажимах СГК $\chi_1 = \cos \varphi = 1$. Для данного алгоритма подвергнуты детальному анализу три варианта проектирования СЭС ПТ, получены выражения для токов и напряжений в системе. Выявлено, что Вариант № 1 проектирования СЭС ПТ с ориентацией выбора номинального режима в средней точке частотного диапазона напряжения СГК является предпочтительным, так как в этом случае теоретически установленная мощность СГК и АВН меньше по сравнению с Вариантами № 2 и 3.

В четвертой главе представлены результаты модельного и физического экспериментов, проведенных для подтверждения правильности аналитических расчетов СЭС ПТ, управляемой с помощью предложенных в диссертационной работе комбинации параметрического управления и управления по отклонению, а также с целью проверки адекватности выбора параметров электромагнитной системы СГК и подтверждения работоспособности системы автоматического регулирования (САР) СЭС ПТ.

В компьютерной программе моделирования технических систем PSIM были реализованы математические модели СЭС ПТ, СГК и нагрузок. В PSIM проведены модельные эксперименты работы СГК на автономную нагрузку, используя параметрическое управление и выбор параметров генератора в соответствии с предложенными тремя вариантами.

Проведен модельный эксперимент замкнутого астатического управления САР СЭС ПТ по выходному напряжению постоянного тока для Варианта № 1, как наиболее предпочтительного к практическому применению. Структурная схема САР АВН приведена на Рисунке 18.

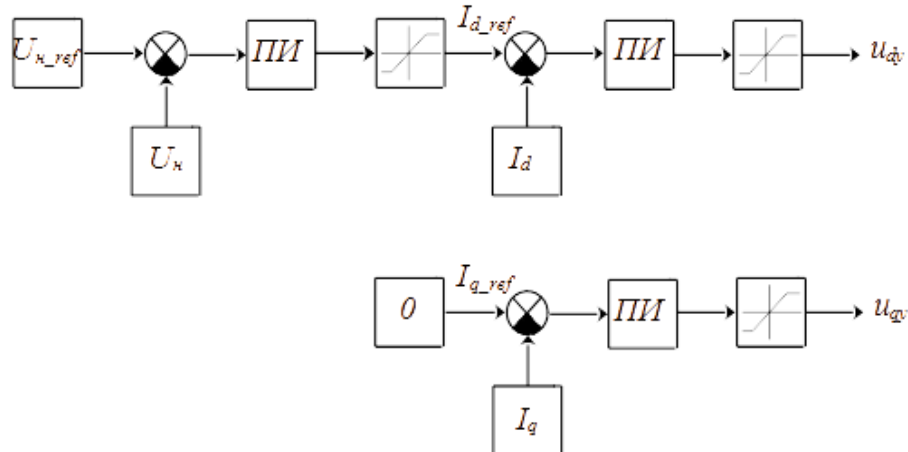


Рисунок 18 – Структурная схема САР АВН

Для проведения моделирования параметрического управления возбуждением СГК в функции стабилизации фазного напряжения при изменении частоты вращения вала генератора и выбора параметров его электромагнитной системы, на первом этапе, экспериментально, на математической модели были получены базовые значения потокосцепления Ψ_0 для каждого из трех, вышеописанных вариантов, при которых при нулевом токе возбуждения I_f и базовой угловой частоте вращения вала, выходное напряжение СГК равно базовому (номинальному) значению. Результаты представлены в Таблице 2.

Таблица 2 – Базовое потокосцепление обмотки возбуждения для каждого варианта параметрического управления и выбора параметров магнитной системы СГК. Единицы измерения относительные

№ Варианта	1	2	3
Значение U_z	1.0	1.0	1.0
Значение ψ_0	0.6705	1.0	0.505
Значение ω_0	1.5	1.0	2.0

Ниже, в виде графиков приведен ряд полученных результатов модельного эксперимента.

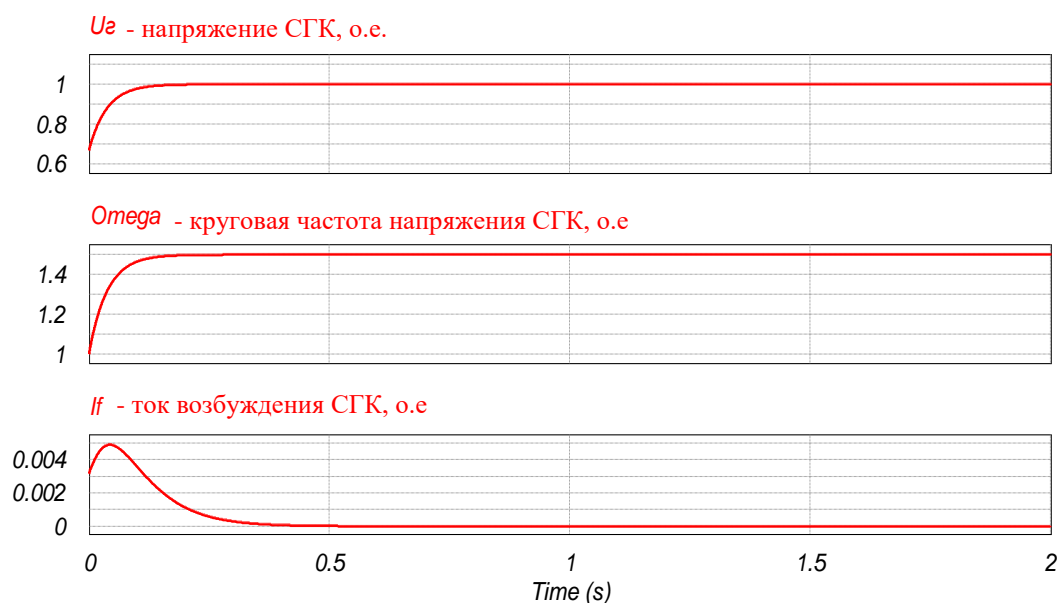


Рисунок 19 – Результат работы СЭС ПТ при $\omega = 1.5$, единицы измерения относительные

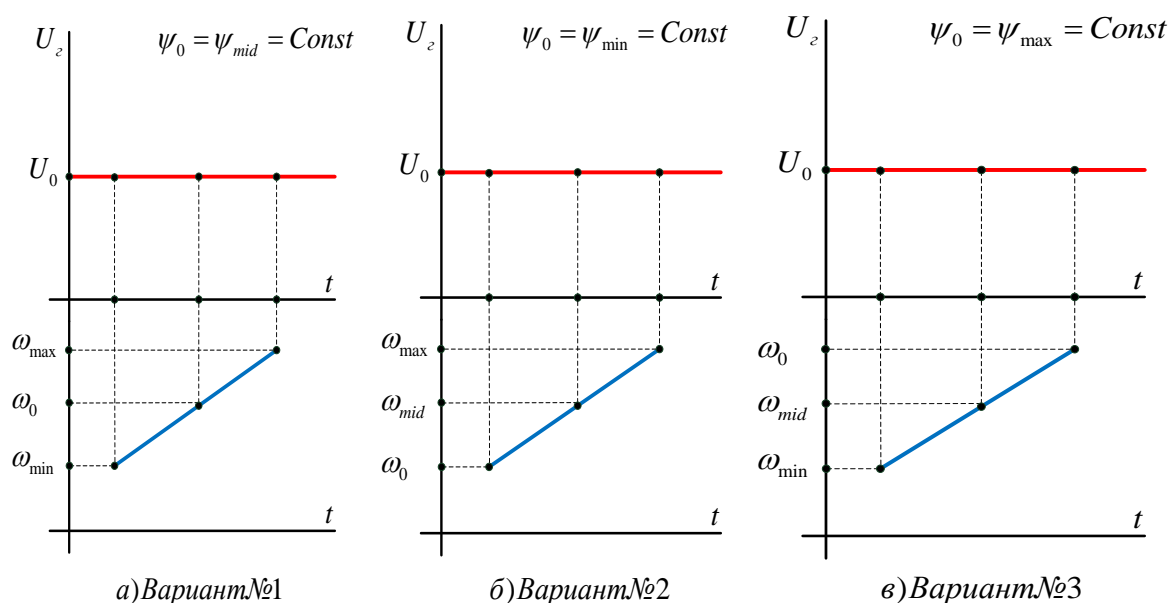


Рисунок 20 – Обобщенные графики результатов работы СЭС ПТ и выбора параметров электромагнитной системы СГК

Так же было проведено моделирование управление СГК и АВН с нулевым значением реактивного тока генератора.

Для проведения этой части модельного эксперимента, в начале, экспериментально на модели устройства были получены значения базового потокосцепления обмотки возбуждения СГК для каждого варианта проектирования в соответствии с изменяющейся частотой вращения генератора. При этом выходное напряжение генератора было базовым (номинальным) при максимально возможном в работе СЭС ПТ значении коэффициента перегрузки по току $k_n = 2$.

Полученные значения Ψ_0 представлены в Таблице 3.

Таблица 3 – Базовое потокосцепление обмотки возбуждения для каждого варианта параметрического управления и выбора параметров магнитной системы СГК. Единицы измерения относительные

№ Варианта	1	2	3
Значение U_z	1.0	1.0	1.0
Значение ψ_0	0.681	1.0105	0.5185
Значение ω_0	1.5	1.0	2.0

Результаты моделирования для Варианта №1 в виде графиков представлены на Рисунке 21.



Рисунок 21 – Астатическое регулирование выходного напряжения постоянного тока СЭС ПТ, Вариант № 1, $U_{dc} = 1.0$, $\psi_0 = 0.681$, $\omega_0 = 1.5$, $PF = 1.0$, единицы измерения относительные

Результаты моделирования позволяют сделать следующие выводы:

1. Алгоритмы управления СГК и АВН, предложенные в диссертационной работе, обеспечивают работу СЭС ПТ в установившемся режиме с минимальными перетоками неактивной мощности между генератором и АВН. Коэффициент мощности по основной гармонике $\chi_1 = \cos\varphi \equiv 1$.
2. Обеспечивается заданная величина выходного напряжения АВН.
3. Астатическое регулирование выходного напряжения СЭС ПТ в установившемся режиме возможно, система в целом устойчива и управляема.

Физический эксперимент работы АВН с минимальным потреблением реактивной мощности проведен на макетном образце разработанного на кафедре Электроники и электротехники НГТУ инвертора напряжения (ИН) мощностью 3 кВт, в ходе выполнения работ по договору № ИСЭ – 07 – 17 от 01 ноября 2017 г.

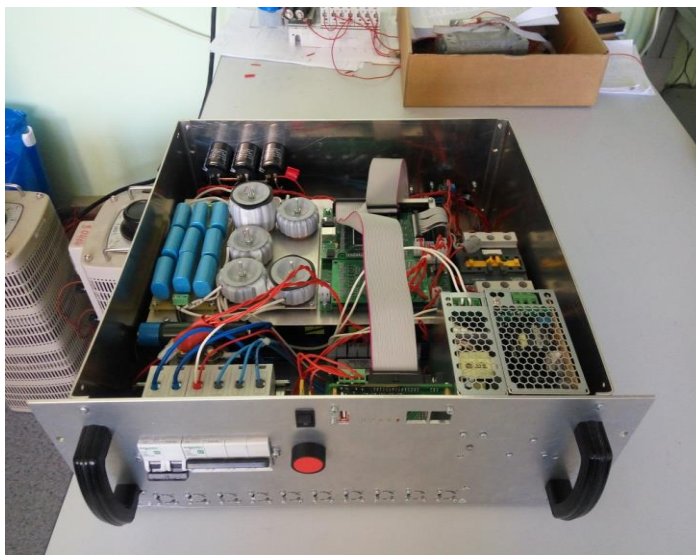


Рисунок 23 – Макетный образец разработанного инвертора напряжения

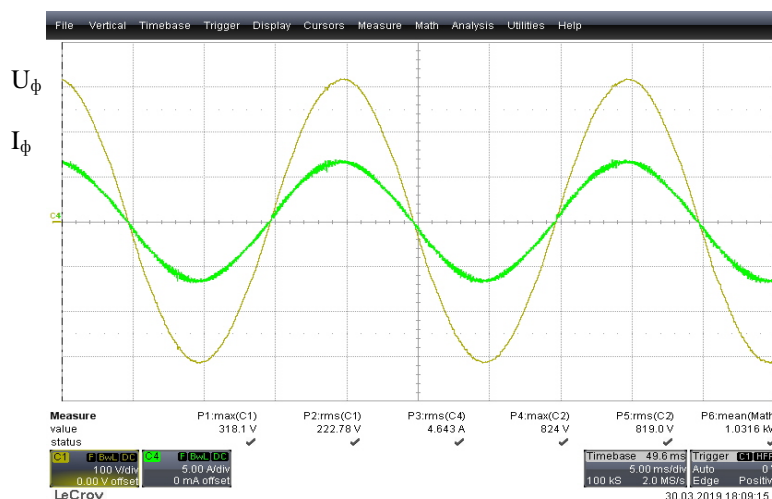


Рисунок 24 – Временные диаграммы напряжения и тока одной из фаз трехфазного напряжения питающей сети

В системе управления ИН реализован алгоритм управления АВН с нулевым реактивным током. Из осциллограммы представленной на рисунке 24 следует, что коэффициент мощности по основной гармонике $\chi_1 = \cos \varphi \equiv 1$.

В заключении приводятся основные выводы и результаты по диссертационной работе. **В приложении** представлен акт и справка о внедрении результатов диссертационной работы при проведении НИОКР в НТЦ Автономной энергетики МФТИ (г. Москва) и в учебном процессе НГТУ (г. Новосибирск).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В процессе выполнения диссертационной работы была решена важная научно-техническая задача по исследованию перспективной системы электроснабжения для летательных аппаратов на базе синхронного генератора с комбинированным возбуждением, анализу способов выбора параметров и алгоритмов управления синхронным генератором и полупроводниковыми преобразователями электрической энергии.

Основными результатами работы являются:

1. Проведен анализ и обоснование энергетической эффективности предложенного структурного варианта системы электроснабжения постоянного тока на основе синхронного генератора с комбинированным возбуждением и активного выпрямителя напряжения.
2. Разработаны математические модели как самой СЭС ПТ, так и ее отдельных элементов: синхронного генератора с комбинированным возбуждением, активного выпрямителя напряжения, различных видов нагрузок системы.
3. Предложены и проанализированы способы выбора параметров электромагнитной системы синхронного генератора с комбинированным возбуждением, позволяющие осуществлять параметрическое регулирование тока возбуждения генератора в функции стабилизации его напряжения при переменной частоте вращения вала.
4. Синтезированы алгоритмы управления возбуждением синхронного генератором с комбинированным возбуждением и активным выпрямителем напряжения, обеспечивающие минимизацию перетоков неактивной мощности между генератором и активным выпрямителем напряжения и заданную величину выходного напряжения, при этом коэффициент мощности по основной гармонике в системе близок к единице.
5. Проведен анализ электромагнитных процессов в СЭС ПТ при работе в установившемся режиме.
6. Проведенный модельный эксперимент работы СЭС ПТ в установившемся режиме подтвердил предложенные аналитически методы параметрического регулирования возбуждения СГК и астатического регулирования выходного напряжения системы.
7. Разработан физический макет устройства, проведен ряд экспериментальных исследований, подтверждающих принципиальную возможность практической реализации разработанных в диссертационной работе алгоритмов управления выходным напряжением СЭС ПТ, с минимальными перетоками неактивной мощности в системе и коэффициентом мощности по основной гармонике, близким к единице.

Стоит отметить, что за рамками данной работы осталась важная задача по исследованию работы СЭС ПТ в динамическом режиме работы, сброс – наброс нагрузки, скачкообразные изменения задания генерируемой неактивной мощности в системе. Интересным с научной точки зрения представляется исследование стартерного режима работы СЭС ПТ, когда синхронный генератор работает в двигательном режиме.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Параллельная работа однофазных инверторов напряжения на общую нагрузку в составе систем электроснабжения / С. А. Харитонов, А. С. Харитонов, А. И. Христолюбова, Е. Я. Букина // Электропитание. - 2019. – № 4. – С. 26–41.
2. Основные энергетические характеристики системы постоянного тока «синхронный генератор с возбуждением от постоянных магнитов – активный

выпрямитель» при переменной частоты вращения вала генератора/ С. А. Харитонов, А. С. Харитонов, // Электропитание. - 2021. –№ 2. – С. 9–18.

Публикации в материалах зарубежных конференций, входящих в базу данных Scopus, Web of Science:

3. Kharitonov S. A. Analytical research of electromagnetic processes in direct current starter-generator system «Synchronous generator with combined excitation – active rectifier» (generation mode), / S. A. Kharitonov, A. S. Kharitonov, D. L. Kaluzhskij // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2018) / Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2018): тр. 14 междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск, 2–6 окт. 2018 г.: в 8 т. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – Т. 1, ч. 6. – С. 13-20. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545947;

4. Kharitonov S. A. Evaluation of electrical parameters in the system 'synchronous generator with permanent magnets - active rectifier' / S. A. Kharitonov, A. S. Kharitonov, P. A. Bachurin // The 19 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2018: proc., Erlagol, Altai, 29 June – 3 July 2018. – IEEE Computer Society, 2018. – P. 593-597. - ISBN 978-153865021-9. - DOI: 10.1109/EDM.2018.8435097;

5. Zero sequence astatic control of three-phase four-leg voltage source inverter of power supply system [Electronic resource] / A. S. Kharitonov, S. A. Kharitonov, A. I. Khristolyubova, E. Y. Bukina, I. A. Bakhovtsev // 1 International Conference Problems of Informatics, Electronics, and Radio Engineering (PIERE), Novosibirsk, 10–11 Dec. 2020. – Novosibirsk: IEEE, 2020. – P. 136–144. - Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9314655>. - Title from screen - DOI: 10.1109/PIERE51041.2020.9314655.

Публикации в российских изданиях, материалах международных и всероссийских конференций:

6. Алгоритмы управления и электромагнитные процессы в системе генерирования переменного тока с синхронным генератором и активным выпрямителем / С. А. Харитонов, Н. И. Бородин, А. А. Стенников, М. А. Маслов, Д. В. Коробков, А. С. Харитонов, А. В. Левин, М. М. Юхнин, Э. Я. Лившиц // Техническая электродинамика. Темат. вып. Силовая электроника и энергоэффективность-Киев, 2004. -Ч.2-С.47-54;

7. Система генерирования электрической энергии "переменная скорость - постоянная частота" на базе синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов и инверторов напряжения. / С. А. Харитонов, Н. И. Бородин, Д. В. Коробков, М. А. Маслов, А. С. Харитонов, А. В. Левин, М. М. Юхнин, Э. Я. Лившиц // Сборник тезисов. IX симпозиум, Электротехника 2030. Перспективные технологии электроэнергетики. Московская обл. 29-31 мая 2007. С. 3001-3002;

8. Результаты разработки системы генерирования электрической энергии типа "переменная скорость - постоянная частота". / Н. И. Бородин, Д. В. Коробков, А. В. Левин, Э. Я. Лившиц, М. А. Маслов, В. В. Машинский, А. С. Харитонов, С. А.

Харитонов, А. Ю. Храмов, М. М. Юхнин // Журнал "Силовая интеллектуальная электроника". 2007. - №1(7). - С. 17-20;

9. Результаты разработки и испытаний системы генерирования электрической энергии на базе синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов и инвертора напряжения. / Н. И. Бородин, Д. В. Коробков, А. В. Левин, Э. Я. Лившиц, М. А. Маслов, А. С. Харитонов, С. А. Харитонов, М. М. Юхнин // Техническая электродинамика. Темат. вып. Силовая электроника и энергоэффективность. - Киев, 2007. - Ч.1. - С.15-18;

10. Kharitonov S. A. An analytical analysis of a wind power generation system included synchronous generator with permanents magnets and voltage source inverter. / S. A. Kharitonov, A. S. Kharitonov, N. V. Bedina // EUROCON 2007. The international conference on "Computer as a tool". - 2007. - P.2741-2748;

11. Стартер-генераторная система для вспомогательной силовой установки / С. А. Харитонов, М. А. Жарков, А. С. Харитонов [и др.] // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. - 2017. - Т. 20, № 5. - С. 50-66. - DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-5-50-66;

12. Стартер-генераторная система постоянного тока. Имитационная модель и результаты математического эксперимента (часть 1 - Генераторный режим) / Д. В. Коробков, А. С. Харитонов, М. А. Жарков, С. А. Харитонов, Д. Л. Калужский [и др.] // Электропитание. - 2017. - № 3. - С. 30-45;

13. Харитонов С. А. Стабилизация напряжения в системе электроснабжения с магнитоэлектрическим генератором / С. А. Харитонов, Д. В. Макаров, А. С. Харитонов // Электропитание. - 2017. - № 1. - С. 16-37;

14. Анализ электромагнитных процессов в системе генерирования постоянного тока на базе магнитоэлектрического генератора и активного выпрямителя / С. А. Харитонов, А. С. Харитонов, П. А. Бачурин, С. П. Халютин // Электропитание. - 2017. - № 4. - С. 4-10;

15. Харитонов С. А. Анализ процессов в системе электроснабжения типа "Синхронный генератор с постоянными магнитами - активный выпрямитель" / С. А. Харитонов, А. С. Харитонов, П. А. Бачурин // Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н. Е. Жуковского: сб. докл. по материалы 15 Всерос. науч.-техн. конф. – Москва: Изд. дом академии им. Н. Е. Жуковского, 2018. – № 6. – С. 433-442;

16. Стартерный режим работы трёхкаскадного бесконтактного генератора / А. В. Сапсалева, А. С. Харитонов, Н. П. Савин, О. Б. Давыденко, Е. Г. Касаткина // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии (ИНФО–2019): сб. тр. 16 междунар. науч.-практ. конф., Сочи, 1–10 окт. 2019 г. – Москва: Ассоц. выпускников и сотр. ВВИА им. проф. Жуковского, 2019. – С. 11-15.

Отпечатано в типографии

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

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

Заказ № 370. Подписано в печать 18.10.2021 г.