

На правах рукописи



Макаров Денис Владимирович

СИСТЕМА ГЕНЕРИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ
АППАРАТОВ

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2013

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Харитонов Сергей Александрович

Официальные оппоненты: Ефимов Александр Андреевич
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», заведующий кафедрой электротехники и технической диагностики, г. Санкт-Петербург

Цукублин Анатолий Борисович
кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», доцент кафедры электромеханических комплексов и материалов, г. Томск

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» г. Томск

Защита состоится «28» ноября 2013 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.04 в Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан «__» октября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор



Неyman Владимир Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В последние годы, рост мощности электроагрегатов на борту летательных аппаратов сопровождался качественной модификацией, заключающейся в снижении требований к стабильности частоты переменного напряжения автономных систем электроснабжения. Этот факт поспособствовал появлению новых технических решений в системах электропитания и повышенному интересу к системам генерирования электрической энергии переменного тока переменной частоты. Эффективность систем генерирования с переменной частотой вращения вала генератора подтверждена большим количеством исследований и реализованных проектов в ветроэнергетике. Исключение механической системы, стабилизирующей частоту вращения вала генератора, в общем случае приводит к увеличению энергетической эффективности в среднем на 15÷20%. На борту летательного аппарата такое увеличение становится еще более актуальным, поскольку обеспечивает значимое снижение затрат на авиаперевозки.

Различные аспекты теоретического и практического плана построения систем генерирования и отдельных её элементов для автономных объектов нашли отражение в трудах И.И. Алексеева, В.Г. Андреева, Е.И. Беркович, Н.И. Бородин, Д.Э. Брускина, Д.А. Бута, Ю.М. Быкова, А.Г. Гарганеева, Г.В. Грабовецкого, Б.С. Зечихина, В.В. Иванцова, Ю.М. Инькова, Л.К. Ковалева, Ю.И. Конева, Н.Т. Коробана, Н.Н. Лаптева, А.В. Левина, В.Л. Лотоцкого, И.И. Лукина, Б.В. Лукутина, Б.А. Майбородина, В. И. Мелешин, И.В. Нежданова, В.И. Радина, Э.М. Ромаша, Г.А. Сипайлова, Л.Е. Смольникова, Б.П. Соустина, Н.П. Старовойтовой, В.Е. Тонкаля, В.В. Филатова, С.А. Харитонова, В.А. Цишевского, Е.Е. Чаплыгина, М.М. Юхнина и многих других.

Наиболее современные достижения в самолетостроении реализовались в двух проектах, А-380 и В-787, разработанных ведущими зарубежными компаниями в этой отрасли промышленности. Хотя оба проекта символизируют принципиально противоположные тенденции развития авиации, тем не менее, в обоих проектах отказались от использования систем электроснабжения постоянной частоты, где это постоянство обеспечивается гидромеханическими приводами-генераторами. Суммарная мощность каналов системы генерирования переменной частоты на борту А-380 достигает 600 кВА и 1 МВА на В-787. В качестве основных производителей электрической энергии использованы трехкаскадные генераторы фирмы Hamilton-Sundstrand.

В отечественном самолетостроении (SSJ-100, Ту-204СМ, Ил-96-300, Ан-148) пока придерживаются концепции построения централизованной системы генерирования с постоянной частотой переменного напряжения, где стабилизация осуществляется за счет интегрального привода-генератора, обладающего рядом существенных недостатков, прежде всего низкая надежность, высокая стоимость и необходимость обслуживания.

В качестве альтернативного варианта широко-используемому трехкаскадному генератору в системах генерирования электрической энергии (СГЭЭ) переменного тока переменной частоты можно рассмотреть синхронный генератор с

возбуждением от постоянных магнитов, который обеспечивает существенные преимущества в массе, габаритах и надежности, сочетающиеся с простотой конструкции.

Известен ряд исследований и запатентованных решений, основывающихся на построении СГЭЭ переменного тока переменной частоты на базе магнитоэлектрического синхронного генератора (МЭГ). В структуре такой системы имеется полупроводниковый преобразователь (ПП) на базе инвертора напряжения (ИН), работающего в обращенном режиме и реализующий функцию генерирования дополнительного реактивного тока. Из особенностей такой структуры можно выявить ряд преимуществ по сравнению с системами прямого преобразования электрической энергии и системами, основывающихся на трехкаскадных генераторах:

- Все вышеупомянутые достоинства МЭГ (масса, обслуживание, технология изготовления, ресурс);
- Токи короткого замыкания, вызванного нагрузкой, минуют ПП, что значительно снижает требования к надежности и ресурсу всей системы и как следствие – снижается габаритная мощность преобразователя;
- Возможность реализации стартер-генератора для запуска маршевого двигателя летательного аппарата от бортовой сети во время полета;
- Возможность компенсации высокочастотных составляющих, как в токе нагрузки, так и в генерируемом напряжении, то есть непосредственное воздействие на качество электрической энергии, отражающееся в увеличении энергетической эффективности.

Такой вариант СГЭЭ переменного тока переменной частоты, базирующийся на параллельном подключении ПП к МЭГ, из известных принципов работы может обеспечить высокое качество генерируемой электрической энергии в широком диапазоне частот вращения вала генератора.

Целью работы является анализ основных энергетических характеристик системы генерирования электрической энергии переменного тока переменной частоты на базе магнитоэлектрического генератора и полупроводникового преобразователя.

Для достижения цели поставлены следующие **задачи**:

1. Разработка математической модели СГЭЭ переменного тока переменной частоты, обеспечивающей общий анализ энергетических показателей и алгоритмов управления в системе генерирования переменного тока переменной частоты при различных вариантах проектирования синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов.
2. Анализ электромагнитных процессов в системе генерирования электрической энергии переменного тока переменной частоты.
3. Синтез алгоритма управления полупроводниковым преобразователем, обеспечивающего требуемое качество генерируемой электрической энергии.
4. Разработка инженерной методики расчета оптимальных параметров синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов и полупро-

водникового преобразователя при заданных показателях генерируемой электрической энергии;

5. Разработка физического макета и проведение экспериментальных исследований СГЭЭ переменной частоты на базе синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов и полупроводникового преобразователя.

Методы исследования. Основные результаты диссертационной работы получены с использованием базовых методов анализа теории электрических цепей. Также использованы методы аналитического и численного расчета линейных дифференциальных уравнений и имитационное моделирование в пакете прикладных программ для расчета процессов с учетом нелинейных характеристик МЭГ и ПП. В работе применяются Фурье преобразования, матричное исчисление, различные разделы линейной алгебры и математического анализа. Экспериментальные исследования проводятся путем физического макетирования.

Достоверность полученных результатов подтверждаются корректной постановкой задач, адекватностью применения математического аппарата, а также результатами имитационного моделирования и натурального эксперимента.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Предложены и исследованы способы построения и стабилизации выходного напряжения магнитоэлектрического генератора с помощью параллельного подключения полупроводникового преобразователя в составе СГЭЭ переменного тока переменной частоты;
2. В результатах анализа энергетических характеристик и алгоритмов управления полупроводниковым преобразователем при параллельной работе с магнитоэлектрическими генераторами различного типа в составе СГЭЭ переменного тока переменной частоты при широком диапазоне изменения частоты вращения вала генератора;
3. Предложены и исследованы три способа выбора основных параметров магнитоэлектрического генератора и полупроводникового преобразователя в составе СГЭЭ переменного тока переменной частоты.

Практическая значимость работы:

1. Получены результаты расчета различных структурных вариантов СГЭЭ переменного тока переменной частоты;
2. Разработана инженерная методика расчета оптимальных параметров синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов и полупроводникового преобразователя в составе СГЭЭ переменного тока переменной частоты;
3. Предложен алгоритм управления полупроводникового преобразователя в составе СГЭЭ переменного тока переменной частоты.

Основные результаты, выносимые на защиту:

1. Способы построения энергоэффективной СГЭЭ переменного тока переменной частоты на базе синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов и полупроводникового преобразователя;

2. Результаты анализа влияния параметров нагрузки и синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов на энергетические показатели СГЭЭ переменного тока переменной частоты при широком изменении скорости вращения вала генератора;
3. Результаты имитационного моделирования СГЭЭ переменного тока переменной частоты с учетом нелинейной характеристики синхронного генератора;
4. Способы выбора основных параметров магнитоэлектрического генератора и полупроводникового преобразователя в составе СГЭЭ переменного тока переменной частоты при широком диапазоне изменения частоты вращения вала генератора.

Апробация работы. Основные результаты доложены, обсуждены и одобрены на следующих научных семинарах и конференциях:

- Всероссийская научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», Новосибирск, НГТУ, 2010, 2011 гг.;
- Международная конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП», Новосибирск, НГТУ, 2012 г.;
- Международная конференция молодых специалистов по микро/нанотехнологиям и электронным приборам «EDM», Новосибирск, НГТУ, 2010, 2011, 2012 гг.;
- Международная конференция молодых специалистов по энергетике IYSE, Португалия, г. Лейрия, 2011 г..
- Международный конкурс «TECO Greentech contest 2012», Тайвань, г. Тайбэй, 2012 г.

Внедрение результатов исследований. Разработанные математические модели СГЭЭ переменного тока переменной частоты, алгоритм управления ПП на базе инвертора напряжения с высокочастотной широтно-импульсной модуляцией, обеспечивающий улучшение энергетических показателей системы генерирования, а также методики оценки энергетических параметров СГЭЭ на базе МЭГ использованы при разработке опытно-конструкторского образца авиационной системы генерирования в рамках договора № ПЭ-01-11 на выполнение составной части опытно-конструкторской работы «Разработка и создание базового комплекта бортового оборудования пассажирских и транспортных летательных аппаратов в обеспечение их конкурентоспособности и импортозамещения в перспективных проектах» между ОАО «АКБ Якорь» и Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет» от 1 сентября 2011г. Научные результаты диссертационной работы (энергоэффективный алгоритм управления ПП на базе инвертора напряжения с высокочастотной широтно-импульсной модуляцией в составе автономных СГЭЭ, а так же методики оценки энергетических показателей автономных систем генерирования на базе МЭГ) внедрены в НИР, ОКР и технологические работы между ФГУП ПО «СЕВЕР» и ГОУ ВПО Новосибирский государственный технический университет № 64-13/177-78 от 27 августа 2010г в рамках договора

№13.G36.31.0010 между ФГУП ПО «СЕВЕР» и Министерством образования и науки РФ на тему «Исследование, разработка и организация промышленного производства механотронных систем для энергосберегающих технологий двойного назначения» от 22 октября 2010г. и использованы при подготовке научных отчетов.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 14.В37.21.0333 от 26 июня 2012 года.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 15 печатных работ, в том числе 6 работ 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. Предложенные структуры СГЭЭ защищены 4 патентами на полезную модель.

Личный вклад автора в работы, опубликованные в соавторстве с научным руководителем, заключается в участии в постановке задач исследований, разработке структурных вариантов и математических моделей СГЭЭ переменного тока переменной частоты, аналитических и численных расчетов энергетических характеристик СГЭЭ переменного тока переменной частоты, разработке инженерной методики расчета оптимальных параметров МЭГ и ПП в составе СГЭЭ переменного тока переменной частоты, а также в анализе способов выбора основных параметров МЭГ и ПП.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и 3 приложений. Общий объем 168 страниц. Основная часть изложена на 160 страницах машинописного текста, иллюстрирована 83 рисунками, 7 таблицами. Список литературы содержит 73 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, изложены цели и задачи диссертационной работы, методы решения поставленных задач. Описаны состав и структура работы, показана научная новизна и практическая ценность работы.

В первой главе проведен анализ современного состояния и перспективы развития систем электроснабжения автономных передвижных объектов. Приведен сравнительный анализ преимуществ и недостатков основных структурных вариантов СГЭЭ переменного тока переменной частоты. Показана перспективность применения СГЭЭ переменного тока переменной частоты на базе МЭГ и инвертора напряжения с высокочастотной широтно-импульсной модуляцией.

Во второй главе приводится описание математической модели СГЭЭ переменного тока переменной частоты, обеспечивающей общий анализ энергетических показателей системы в зависимости от параметров нагрузки и синхронного генератора. Рассматриваются сценарии проектирования СГЭЭ переменного тока переменной частоты, отличающиеся диапазоном стабилизирующего воздействия со стороны ПП. Приводятся результаты анализа энергетических показателей системы генерирования при неявнополюсном типе генератора с выявлением особенностей влияния параметров нагрузки. Производится описание

инженерной методики расчета оптимальных параметров генератора на заданную номинальную частоту генерируемого напряжения в широком диапазоне изменения этой частоты.

Структурная схема рассматриваемой математической модели системы генерирования представлена на рисунке 1.

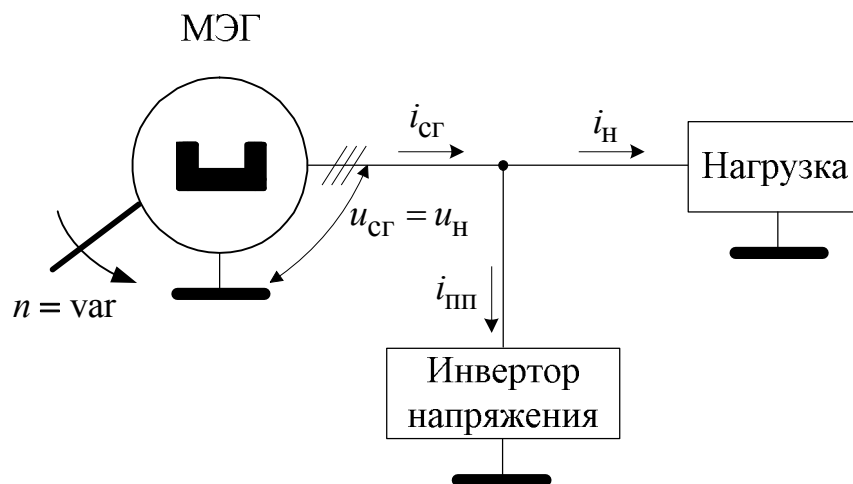


Рис. 1. Структурная схема СГЭЭ переменного тока переменной частоты

Для анализа энергетических показателей (коэффициент мощности, значения полной мощности и токов МЭГ и ПП, коэффициент гармоник) и определения режимов работы синхронного генератора (СГ) и ИН в зависимости от параметров генератора при математическом описании процессов в системе генерирования можно пренебречь влиянием несимметричных режимов и коммутационных процессов по ряду принимающихся допущений:

- Частота коммутации полностью управляемых полупроводниковых приборов во много раз превышает частоту генерируемого напряжения;
- Анализу подлежит только основная гармоническая составляющая токов и напряжений в системе;
- Момент инерции первичного двигателя достаточно велик и относительная скорость изменения его оборотов ограничена и невелика.

В этом случае анализ режимов работы в синхронных генераторах традиционно проводится в «dq» осях. Использование «dq» координат в этом случае упрощает математический анализ, так как полученные уравнения в большинстве режимов работы синхронного генератора не содержат переменных коэффициентов.

Принцип работы СГЭЭ в общем случае иллюстрируется с помощью векторной диаграммы на рисунке 2, представленной относительно действующих значений токов и напряжений основных гармоник с использованием символического метода. Данная диаграмма характеризует работу системы при наличии нагрузки с отрицательным углом сдвига ($\varphi_н < 0$) между током ($\underline{I}_н$) и напряжением ($\underline{U}_н = \underline{U}_{сг}$) нагрузки. Векторная диаграмма построена во вращающейся с частотой ω системе координат «dq», при допущениях линейности магнитной системы, отсутствия активных потерь и демпферных контуров в СГ. Здесь

$\underline{\Psi}_0, \underline{E}_0$ – потокосцепление от постоянных магнитов и ЭДС холостого хода, X_d, X_q – индуктивные сопротивления СГ по продольной и поперечной осям соответственно, $\underline{I}_{сг}$ – ток СГ, состоящий из тока нагрузки (\underline{I}_H) и тока полупроводникового преобразователя ($\underline{I}_{пп}$).

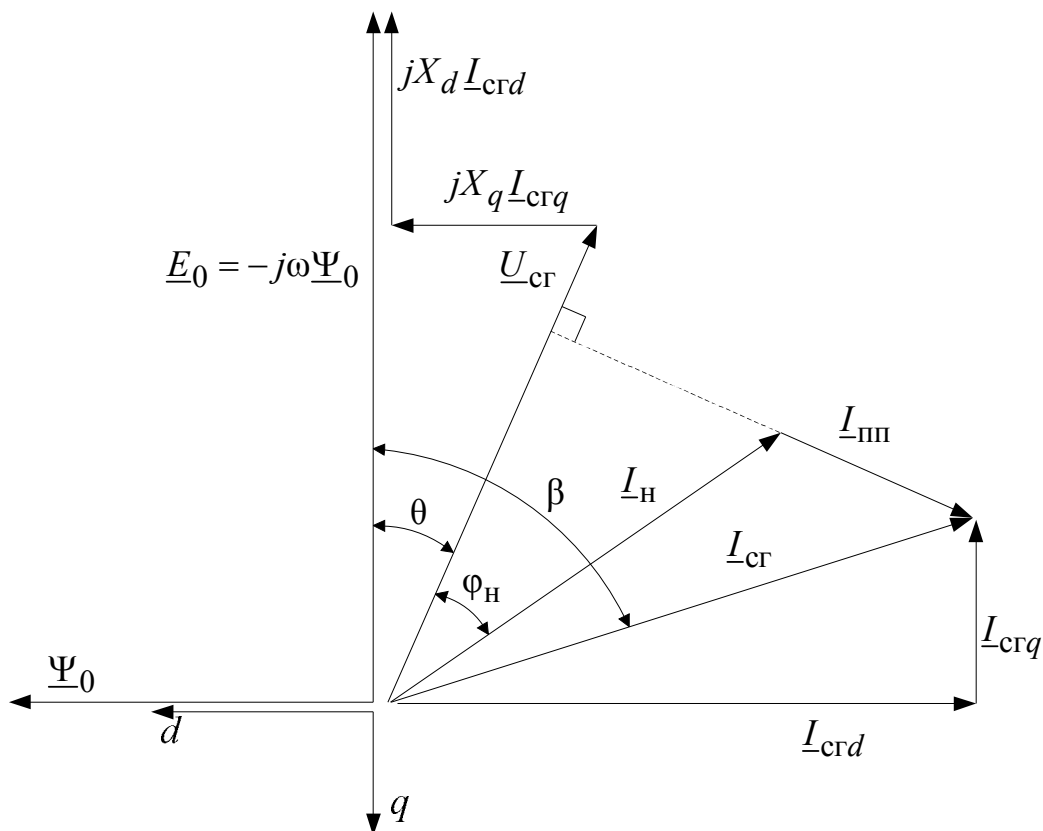


Рис. 2. Векторная диаграмма токов и напряжений МЭГ

Электромагнитные процессы рассматриваемой структуры СГЭЭ переменного тока переменной частоты могут быть представлены следующей схемой замещения (рисунок 3).

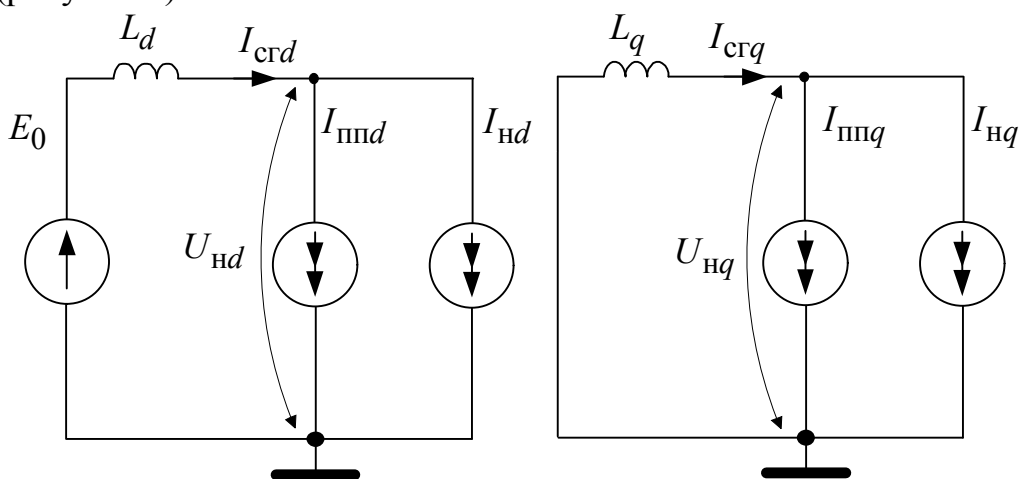


Рис. 3. Расчетная схема замещения СГЭЭ

В этой схеме замещения источники тока представляют собой проекции комплексов тока нагрузки (\underline{I}_H) и преобразователя ($\underline{I}_{пп}$) на соответствующие оси

«dq». Из представленной векторной диаграммы (рис. 2) они находятся следующим образом:

$$\begin{aligned} I_{сгd} &= (I_H \sin(\varphi_H) \pm I_{ПП}) \cos(\theta) + I_H \cos(\varphi_H) \sin(\theta) \\ I_{сгq} &= -(I_H \sin(\varphi_H) \pm I_{ПП}) \sin(\theta) + I_H \cos(\varphi_H) \cos(\theta) \end{aligned}$$

Такая схема замещения соответствует системе уравнений в «dq» осях, при принятых допущениях, и учитывает влияние асимметрии магнитной цепи ротора генератора, так называемую явнополюсность. В текущей работе под явнополюсностью будем понимать отношение главных индуктивностей генератора (с учетом индуктивностей рассеяния) по продольной и поперечной осям $k = L_q/L_d$. Система уравнений, описывающая стационарные процессы в СГЭЭ, без учета активных потерь в обмотках генератора и ПП в таком случае будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} U_{нд} &= -kX_d(I_H \sin(\varphi_H) \pm I_{ПП}) \sin(\theta) + kX_d I_H \cos(\varphi_H) \cos(\theta) \\ U_{нq} &= E_0 - X_d(I_H \sin(\varphi_H) \pm I_{ПП}) \cos(\theta) - X_d I_H \cos(\varphi_H) \sin(\theta) \end{aligned}$$

где

$$\tan(\theta) = \frac{I_H \cos(\varphi_H)}{\frac{U_{сг}}{kX_d} + I_H \sin(\varphi_H) \pm I_{ПП}}$$

В общем виде решение этой системы уравнений при различных критериях, являющиеся своего рода определяющими ограничениями со стороны нагрузки при соответствующем режиме работы системы, а именно скорости вращения вала генератора, позволяет найти оптимальные требования к конструктивным особенностям генератора и определить основные качественные и количественные энергетические показатели системы в целом. Ограничивающими критериями, по большей части, являются кривая распределения мощности нагрузки от частоты генерируемого напряжения и требование к величине тока короткого замыкания. На основании того, что при симметричном коротком замыкании в обмотках статора протекают токи только продольной составляющей (

$\underline{I}_{сг} \approx \underline{I}_d \approx \frac{E_0}{jX_d}$) в систему уравнений можно ввести параметр, определяющий

зависимость выходного напряжения от требуемой кратности тока короткого замыкания относительно номинального $I_{кз}^* = \frac{I_{кз}}{I_{нном}}$. Для общности получен-

ных результатов вводятся относительные единицы, в качестве базовых величин выбираются номинальное напряжение и ток нагрузки: $U_{сг}^* = U_H^* = U_{нном}^*$,

$I_H^* = I_{нном}^*$ тогда, $S_H^* = U_H^* I_H^*$ – базовое значение мощности. Далее определяется

понятие диапазона изменения частоты генерируемого напряжения

$D = \omega_{max}/\omega_{min}$ и тока короткого замыкания $I_{кз} = \frac{DE_{0min}}{D\omega_{min}L_d}$ (учитывая приня-

тые допущения, ток короткого замыкания не зависит от частоты вращения вала

генератора). В итоге получим следующую систему уравнений, позволяющую определить основные энергетические показатели СГЭЭ:

$$U_{нд}^* = k \frac{DE_{0\min}^*}{I_{кз}^*} \left(I_{н\max}^* \cos(\varphi_H) \cos(\theta) - (I_{н\max}^* \sin(\varphi_H) \pm I_{пп}^*) \sin(\theta) \right)$$

$$U_{нq}^* = \frac{DE_{0\min}^*}{I_{кз}^*} \left(I_{кз}^* - (I_{н\max}^* \sin(\varphi_H) \pm I_{пп}^*) \cos(\theta) - I_{н\max}^* \cos(\varphi_H) \sin(\theta) \right)$$

где $I_{н\max}^*$ – относительное значение тока нагрузки в режиме перегрузки СГЭЭ.

Решение представленной системы уравнений дает возможность определить семейства различных характеристик токовой загрузки генератора и преобразователя. Определяющими критериями в этом случае для семейства кривых выступают ограничение тока короткого замыкания и максимального тока нагрузки, при котором требуется стабилизация номинального напряжения. Максимальный ток короткого замыкания главным образом определяет минимальное значение индуктивности по продольной оси генератора. Максимальная нагрузка при минимальных оборотах должна прямым образом влиять на выбор отношения Э.Д.С. холостого хода генератора к скорости вращения генератора при выбранной номинальной частоте генерируемого напряжения, т.е. величину потокосцепления в зазоре при разомкнутой статорной цепи.

Последний критерий представляется своего рода степенью варьирования сценариями стабилизации напряжения на нагрузке. В общем случае можно определить три возможных сценария проектирования параметров СГЭЭ и способов управления, которые удобно идентифицировать с помощью рисунка 4. При реализации сценария 1 (рисунок 4а) номинальный режим СГ по напряжению (при котором отсутствует воздействие от преобразователя $I_{пп}^* = 0$) выбирается в начале диапазона изменения частоты вращения (n_{\min}), что соответствует минимальной частоте напряжения СГ (ω_{\min}), а ток нагрузки принимает максимальное значение ($I_{н\max}^*$). В этом случае ПП генерирует по отношению к напряжению СГ индуктивный характер тока ($\varphi_{пп} = -\pi/2$) во всем диапазоне частот генерирования. Величина этого тока возрастает с увеличением скорости вращения и изменяется при варьировании величины и характера тока нагрузки.

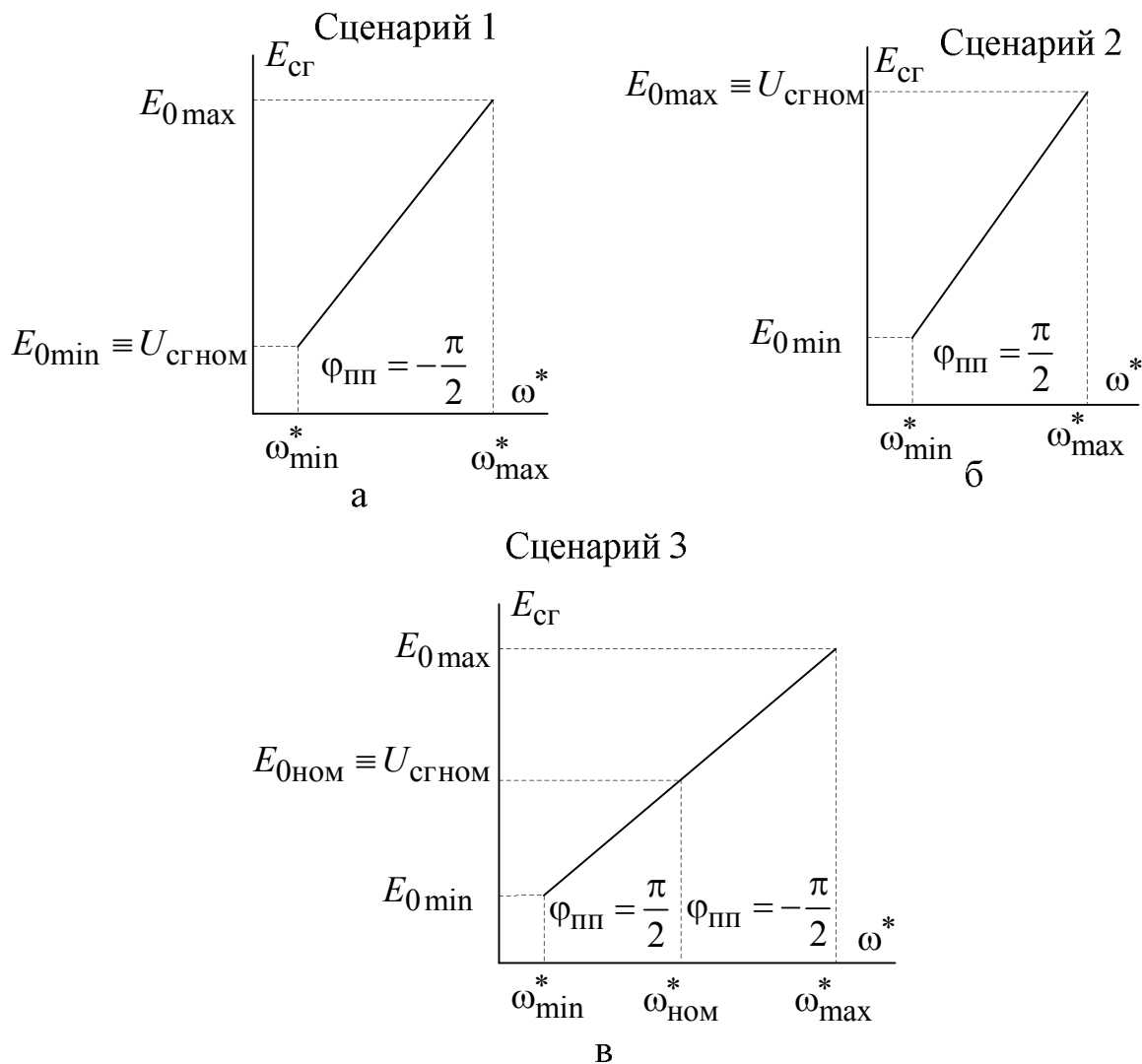


Рис. 4. Три способа проектирования СГЭЭ

При реализации сценария 2 (рисунок 4б) номинальный режим СГ по напряжению выбирается в конце диапазона изменения частоты вращения (n_{\max}), что соответствует максимальной частоте напряжения СГ (ω_{\max}). В этом случае ПП генерирует по отношению к напряжению СГ емкостной характер тока ($\varphi_{\text{ПП}} = \pi/2$). Величина этого тока возрастает с уменьшением частоты вращения и изменяется при варьировании величины и характера тока нагрузки.

Сценарий 3 (рисунок 4в) представляет собой обобщенный из предыдущих двух вариант построения СГЭЭ, когда СГ и ПП проектируются из условия обеспечения номинального режима системы по нагрузке не на границах, а внутри диапазона изменения частоты вращения вала. В этом случае ПП в диапазоне частот ниже номинальной генерирует емкостной ($\varphi_{\text{ПП}} = \pi/2$) по отношению к напряжению СГ характер тока $I_{\text{ПП}}$, а в диапазоне выше номинальной генерирует индуктивный по отношению к напряжению СГ характер тока ($\varphi_{\text{ПП}} = -\pi/2$).

Ниже приведены характеристики (рисунок 5), отражающие максимальное значение полной мощности ПП и МЭГ в двойном диапазоне изменения враще-

ния вала генератора при различном характере нагрузки и 3 сценарии проектирования СГЭЭ.

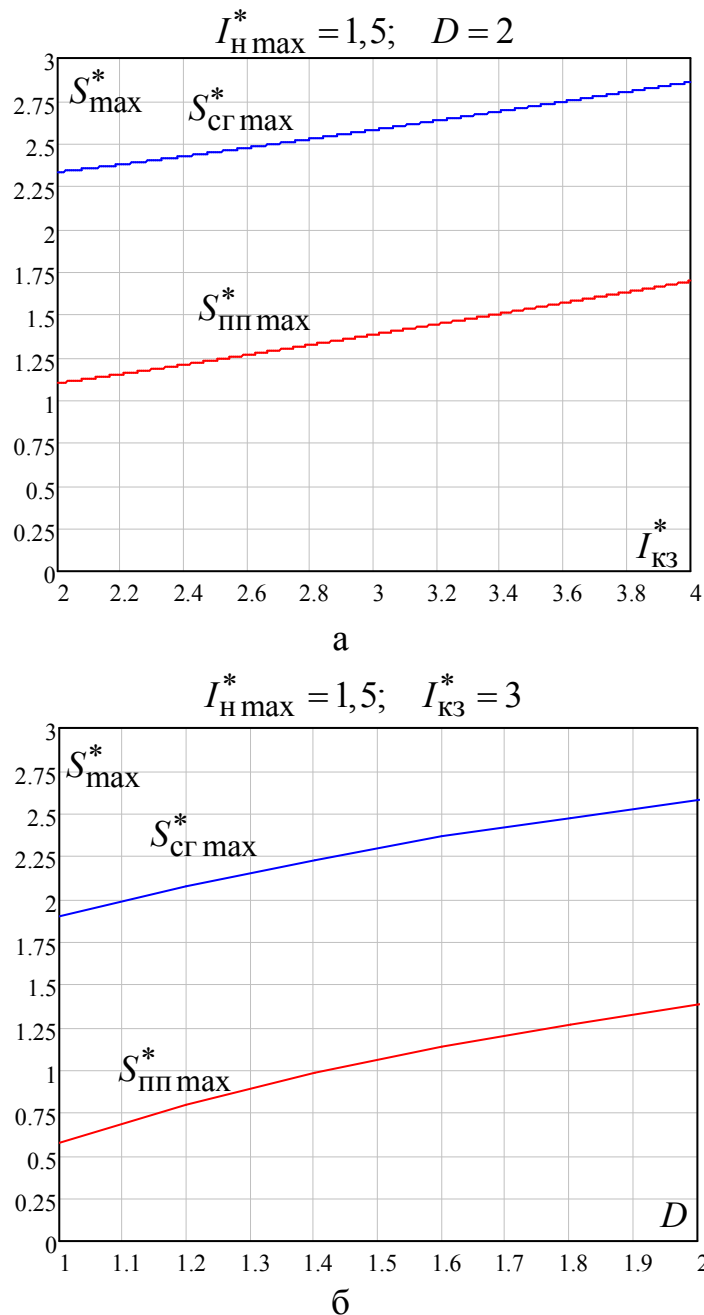


Рис. 5. Зависимости максимальных значений полной мощности МЭГ и ПП

Как следует из этих графиков, а также результатов расчетов для тока $I_{K3}^* = 3$ и $D = 2$ установленные мощности будут иметь значения $S_{сг\ max}^* = 2,58$, $S_{пп\ max}^* = 1,38$.

Далее в диссертации приводится описание инженерной методики расчета оптимальных параметров генератора на заданную номинальную частоту генерируемого напряжения в широком диапазоне изменения этой частоты.

В третьей главе диссертации приводится количественная оценка энергетических показателей системы генерирования при различных сценариях проектирования для явнополюсного типа синхронного генератора. Выявленные особенности полученных результатов численного расчета показывают, что явно-

полюсный тип МЭГ является более предпочтительным вариантом. Далее рассматривается структурный вариант СГЭЭ переменного тока переменной частоты, обеспечивающий снижение токовой загрузки ПП и МЭГ, заключающийся во внедрении в базовую структуру системы дополнительных магнитосвязанных катушек индуктивностей. Расчеты показывают, что при таком построении СГЭЭ переменного тока переменной частоты, полная мощность МЭГ и ПП будут равны $S_{сг\max}^* = 1,3$ и $S_{пп\max}^* = 1,063$ соответственно в режиме максимальных оборотов генератора и при прочих равных условиях.

Для учета нелинейных характеристик МЭГ в составе СГЭЭ разрабатывается имитационная модель в пакете прикладных программ PSIM. Модель включает в себя имитационный блок МЭГ с учетом насыщения индуктивных сопротивлений статорной цепи в зависимости от значения генерируемого тока, а также предложенный вариант замкнутой системы управления ПП. Разработанная имитационная модель позволила провести расчет динамических процессов, связанных с мгновенными изменениями нагрузки в различных режимах работы МЭГ и оценить качество переходных процессов.

Имитационная модель ПП на базе инвертора напряжения, рассматриваемого как компенсатор реактивной мощности, основывается на системе уравнений во вращающейся системе координат. На рисунке 6 представлена эквивалентная схема замещения инвертора напряжения в составе системы генерирования, подключенного к цепи переменного тока, с учетом следующих допущений:

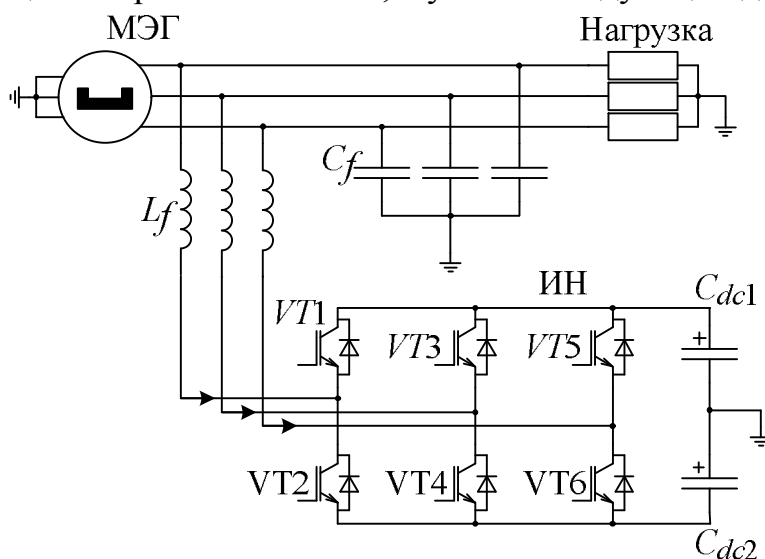


Рис. 6. Эквивалентная схема замещения СГЭЭ

- Полностью управляемые полупроводниковые приборы рассматриваются как идеальные ключи;
- Частота коммутации ключей намного больше частоты основной гармонической составляющей питающего напряжения;
- Влияние «мертвого» времени не учитывается.

На основании принятых допущений и обозначений на представленной схеме преобразователя, система уравнений напряжений, описывающая динамические процессы в преобразователе выглядит следующим образом:

$$U_d = \frac{m_d U_{dc}}{2} + R_L i_d(t) + L_{inv} \frac{di_d(t)}{dt} - \omega L_{inv} i_q(t)$$

$$0 = \frac{m_q U_{dc}}{2} + R_L i_q(t) + L_{inv} \frac{di_q(t)}{dt} + \omega L_{inv} i_d(t)$$

Где m_d и m_q – компоненты нормированного сигнала управления во вращающейся системе координат. Причем, $\sqrt{(m_d)^2 + (m_q)^2} = M$ – так называемая глубина модуляции. R_L – сопротивления обмоток катушек индуктивностей L_{inv} . В рассматриваемом варианте построения инвертора напряжения принимается во внимание классический скалярный способ формирования сигналов широтно-импульсной модуляции, без добавления третьей гармоники и применения пространственно-векторной ШИМ.

В четвертой главе описан испытательный стенд СГЭЭ переменного тока переменной частоты, используемый для физического эксперимента и представлены результаты испытаний. Макет исследуемой СГЭЭ включает: генератор, ПП на базе управляемого (на тиристорах) трехфазного мостового выпрямителя, LC-фильтр, нагрузку и систему управления ПП. На рисунке 7 приведена функциональная блок схема, поясняющая структуру испытательного макета.

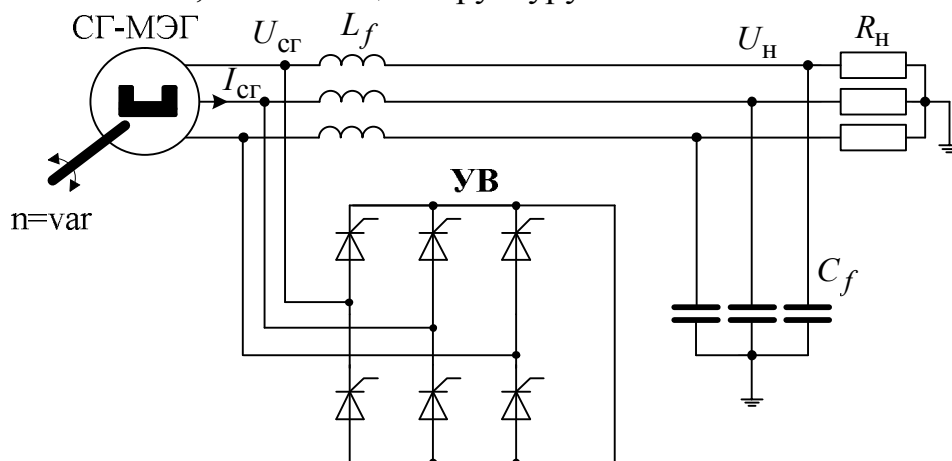


Рис. 7. Схема макета СГЭЭ переменного тока переменной частоты

Такой вариант построения испытательного макета СГЭЭ соответствует сценарию проектирования 1 (раздел 2.3).

В ходе экспериментов были сняты внешние характеристики генератора, отражающие достоверность рассматриваемой принципиальной возможности регулирования выходного напряжения на зажимах генератора за счет воздействия полупроводниковым преобразователем на реактивную составляющую тока в цепи статора генератора

В заключении представлены основные результаты диссертационной работы и даны рекомендации по их применению.

Приложение содержит таблицы данных и рисунки моделей, используемых при имитационном моделировании системы генерирования, расчетный формуляр МЭГ, параметры которого были задействованы при имитационном моделировании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты выполненной работы состоят в следующем:

1. Проведен анализ и обоснование энергетической эффективности предложенных структурных вариантов СГЭЭ переменного тока переменной частоты на базе синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов и полупроводникового преобразователя;
2. Разработана математическая модель СГЭЭ переменного тока переменной частоты, обеспечивающая общий анализ энергетических показателей системы при различных вариантах проектирования синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов;
3. Найдены зависимости основных энергетических показателей системы генерирования от типа синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов в составе СГЭЭ переменного тока переменной частоты и нагрузки;
4. Предложены и проанализированы способы выбора оптимальных параметров синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов в составе СГЭЭ переменного тока переменной частоты;
5. Получены зависимости энергетических характеристик СГЭЭ переменного тока переменной частоты, позволяющие определить оптимальные параметры основных элементов системы в зависимости от требуемых качественных и количественных показателей генерируемой электрической энергии;
6. Разработана инженерная методика расчета оптимальных параметров синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов и полупроводникового преобразователя с возможностью оценки энергетических показателей при варьирующихся требованиях со стороны нагрузки;
7. Предложен алгоритм управления полупроводниковым преобразователем в составе СГЭЭ переменного тока переменной частоты, показана, его эффективность с точки зрения обеспечения требований к качеству генерируемой электрической энергии в нормальных режимах;
8. С использованием имитационного моделирования в среде PSIM определено влияние на энергетические показатели СГЭЭ переменного тока переменной частоты нелинейности характеристик синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов;
9. Разработан макет СГЭЭ переменного тока переменной частоты и проведены физические эксперименты, подтверждающие принципиальную возможность реализации системы за счет параллельного подключения полупроводникового преобразователя и синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях 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

1. Система генерирования электроэнергии переменного тока при постоянной частоте вращения вала генератора / С.А. Харитонов, Д.В. Коробков, Д.В. Макаров, А.В. Левин, М.М. Юхнин, С.Ф. Коняхин // Электроника и электрооборудование транспорта. - 2012. - №4-5. - С.2-8.
2. Режимы работы системы генерирования электроэнергии нестабильной частоты и стабильного напряжения / А.В. Левин, С.Ф. Коняхин, М.М. Юхнин, С.А. Харитонов, Д.В. Коробков, Д.В. Макаров // Авиационная промышленность. - 2012. - №4. - С.2.
3. Расчет электрических параметров системы генерирования электроэнергии нестабильной частоты и стабильного напряжения / С. А. Харитонов, Д. В. Коробков, Д. В. Макаров, А. В. Левин, С. Ф. Коняхин, М. М. Юхнин // Авиационная промышленность. - 2013. - №1. - С.1-7.
4. К вопросу стабилизации напряжения синхронного генератора с постоянными магнитами при переменной частоте вращения / С. А. Харитонов, Б.Ф. Симонов, Д. В. Коробков, Д. В. Макаров // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых.- Новосибирск:издательство Сибирского Отделения РАН, июль-август 2012. - № 4. - С.102-115.
5. Стабилизация напряжения синхронного генератора с постоянными магнитами при переменной нагрузке / С. А. Харитонов, Д. В. Коробков, Д. В. Макаров, А. Г. Гарганеев // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники: июнь 2012. - Томск:ТУСУР, 2012. - № 1(25), часть 1. - С.139-146.
6. Авиационная система генерирования электроэнергии / С. А. Харитонов, Д. В. Коробков, Д. В. Макаров, А. В. Левин, С. Ф. Коняхин, М. М. Юхнин // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. - 2013. - №1. - С. 147-162.

Зарегистрированные результаты интеллектуальной деятельности

7. Пат. 115134 Российская Федерация, МПК⁷ Н 02 Р 9/00, Н 02 Р 9/44. Система стабилизации напряжения переменного тока / заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «НГТУ», ФГУП ПО «СЕВЕР». - № 2011128321/07 ; заявл. 08.07.11 ; опубл. 20.04.12, Бюл. № 11. - 2 с.
8. Пат. 121974 Российская Федерация, МПК⁷ Н 02 Р 9/44. Система генерирования стабильного напряжения переменного тока с изменяющейся частотой / заявитель и патентообладатель ФГУП ПО «СЕВЕР». - № 2012125955/07 ; заявл. 21.06.2012 ; опубл. 10.11.2012, Бюл. № 31. - 1 с.

9. Пат. 122211 Российская Федерация, МПК⁷ Н 02 J 3/02. Система генерирования электрической энергии трехфазного переменного тока / заявитель и патентообладатель ФГУП ПО «СЕВЕР». - № 2012125952/07; заявл. 21.06.2012; опубл. 20.11.2012, Бюл. № 32. - 2 с.
10. Пат. 121968 Российская Федерация, МПК⁷ Н 02 J 3/16. Система генерирования стабильного напряжения трехфазного переменного тока с изменяющейся частотой / заявитель и патентообладатель ФГУП ПО «СЕВЕР». - № 2012125953/07; заявл. 21.06.2012; опубл. 10.11.2012, Бюл. № 31. - 2 с.

Прочие публикации, представленные на международных конференциях и в зарубежных журналах

11. Макаров Д. В. Исследование системы генерирования переменной частоты постоянной амплитуды на базе магнитоэлектрического генератора и полупроводникового преобразователя / Д. В. Макаров, С. А. Харитонов, М.М. Юхнин // Технічна електродинаміка.-№ 3 май-июнь.- Київ, 2012.- С.65-66.
12. Математическое моделирование системы генерирования электрической энергии переменной частоты с параллельно- последовательным преобразователем / П. А. Бачурин, А. В. Гейст, Д. В. Коробков, Д. В. Макаров, А. Н. Решетников, С. А. Харитонов, С.Ф. Коняхин, И.И. Алексеев, М.М. Юхнин // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Силова електроніка та енергоефективність. Частина 1.- Київ, 2012.- С.150-155.
13. Математическое моделирование системы генерирования электрической энергии переменной частоты с параллельным преобразователем / П. А. Бачурин, А. В. Гейст, Д. В. Коробков, Д. В. Макаров, А. Н. Решетников, С. А. Харитонов, С.Ф. Коняхин, И.И. Алексеев, М.А. Маслов // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Силова електроніка та енергоефективність. Частина 4.- Київ, 2012.- С.157-159.
14. Стабилизация выходного напряжения синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов при переменной частоте вращения вала / А. В. Гейст, Д. В. Коробков, Д. В. Макаров, А. Н. Решетников, С. А. Харитонов // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Силова електроніка та енергоефективність. Частина 2.- Київ, 2012.- С.39-46.
15. Коробков Д. В. Стабилизация выходного напряжения синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов / Д. В. Коробков, Д. В. Макаров, С. А. Харитонов // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Силова електроніка та енергоефективність. Частина 1.- Київ, 2012.- С.5-11.
16. Способ стабилизации выходного напряжения системы электропитания на базе синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов при переменной частоте вращения вала / Д. В. Макаров, Д. В. Коробков, С. А. Харитонов, П. А. Бачурин, А. В. Гейст, А. Н. Решетников, С.Ф. Коняхин, Е. И. Алгазин, М.А. Маслов // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Силова електроніка та енергоефективність. Частина 2.- Київ, 2012.- С.63-67.

17. Makarov, D.V. Generation system of electric energy of “variable speed - variable frequency - constant amplitude” type / D.V. Makarov, S.A. Kharitonov, E.A. Makarova" // Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), 2010 International Conference and Seminar on, June 30 2010-July 4 2010. - vol., no. - pp.464-469,
18. Generation system with variable frequency and constant amplitude / D.V. Makarov, A.S. Khlebnikov, A.V. Geist, P.A. Bachurin // Energetics (IYCE), Proceedings of the 2011 3rd International Youth Conference on, 7-9 July 2011. - vol., no. - pp.1-9.
19. Analysis of coupled inductors in AC variable frequency generation system / D. V. Makarov, D. V. Korobkov, P. A. Bachurin, A. V. Geist, A. G. Volkov, D. A. Shtein // 14 International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM 2013), Altai, Erlagol, 1–5 July 2013. - Novosibirsk : NSTU, 2013. - P. 310-314.