

На правах рукописи



Мисютин Роман Юрьевич

**АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ КОНСТРУИРОВАНИЕ АВИАЦИОННЫХ
ГЕНЕРАТОРОВ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ**

Специальность – 05.09.01
«Электромеханика и электрические аппараты»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2015

Работа выполнена на кафедре «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель Зечихин Борис Семенович
доктор технических наук, профессор МАИ,
заслуженный работник ВШ РФ

Официальные оппоненты: Халютин Сергей Петрович
доктор технических наук, профессор,
генеральный директор ООО «Эксперименталь-
ная мастерская НаукаСофт»

Савенко Валерий Ананьевич
кандидат технических наук,
зам. гл. конструктора ОАО «Аэроэлектромаш»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное об-
разовательное учреждение высшего професси-
онального образования «Национальный иссле-
довательский университет «МЭИ» (ФГБОУ
ВПО «НИУ «МЭИ»)

Защита состоится «28» декабря 2015 г. в 12 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.125.07 в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) по адресу: 125993, А-80, г. Москва, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4, корп. «Г», ауд. 302 (кафедра 310).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Автореферат разослан «___» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.125.07
к.т.н.



Степанов В.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Одной из важных тенденций в развитии авиационных систем электроснабжения является увеличение их мощности и рост мощности генераторов. На широкофюзеляжных самолётах единичная мощность генераторов достигает 250 кВА. Подобные генераторы выполняются бесконтактными с электромагнитным возбуждением с подвозбудителем и возбудителем. Для обеспечения высоких массоэнергетических показателей генераторы разрабатываются с предельно допустимыми частотами вращения, электромагнитными, прочностными и тепловыми нагрузками. Повышение частоты вращения позволяет снизить массу генератора, но приводит к снижению допустимого по прочности диаметра ротора, увеличению его длины, снижению диаметра вала, критической частоты и его предельной мощности.

Повышенная механическая прочность, отсутствие потерь на возбуждение, жесткость внешних характеристик, высокие значения токов короткого замыкания и достаточно простая реализация стартерного режима позволяют рассматривать генераторы с постоянными магнитами как альтернативу генераторам с электромагнитным возбуждением при повышенной мощности. Недостатки генераторов с постоянными магнитами состоят в трудности регулирования выходного напряжения, повышенных потерях в стали при максимальных частотах вращения в системе без привода постоянных оборотов, относительно невысоких допустимых температурных режимах высокоэнергетических редкоземельных постоянных магнитов и их развозбуждении при внутренних коротких замыканиях.

Наиболее эффективно использование генераторов с постоянными магнитами в системах электроснабжения постоянного тока, в которых генераторы с электромагнитным возбуждением также работают в составе с электронными преобразователями и фильтрами. При этом для снижения массы фильтров рационально повышение числа полюсов, что существенно проще реализовать в генераторах с постоянными магнитами. Разработка генераторов повышенной мощности близкой к предельной требует поиска конструктивных решений, обеспечивающих максимально возможный диаметр и длину ротора при допустимых механических напряжениях и температурах.

В нашей организации «АКБ «Якорь» (с 2015г. «Технодинамика») на основе высокоэнергетических постоянных магнитов разработаны авиационный генератор ГТ-90 мощностью 90 кВА и электродвигатель ДСВ-100 мощностью 100 кВт. На основе этих разработок и развития методов конструирования могут быть созданы генераторы мощностью в несколько сотен и более кВА.

Проблемам конструирования авиационных генераторов с электромагнитным возбуждением посвящено значительное количество работ (Клочков О.Г., Науменко

В.И., Поспелов Л.И. и др.). Конструированию генераторов с постоянными магнитами не уделялось достаточного внимания. Автоматизация конструирования на основе компьютерных технологий генераторов с постоянными магнитами повышает эффективность их проектирования и является актуальной задачей.

Цель работы.

Целью работы является повышение эффективности проектирования авиационных генераторов с постоянными магнитами на основе компьютерных технологий автоматизированного конструирования и обоснование целесообразности применения данных генераторов в авиационных системах электроснабжения постоянного тока повышенного напряжения.

Задачи работы.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- обосновать целесообразность использования генераторов с высокоэнергетическими постоянными магнитами в системах электроснабжения повышенной мощности на уровне сотен и более кВА;

- определить области рационального использования многополюсных роторов с радиальными и тангенциальными магнитами в системах электроснабжения переменного и постоянного тока;

- разработать технологию конечно-элементного анализа конструкций бандажей крепления магнитов, обеспечивающих прочность роторов генераторов повышенной мощности близкой к предельной;

- провести сопоставительный компьютерный анализ тепловых потерь в элементах конструкций крепления магнитов, обусловленных зубчатостью статора для массивных и шихтованных магнитных и немагнитных бандажей, для обеспечения необходимых температурных условий работы редкоземельных магнитов;

- разработать технологию конечно-элементного анализа притяжения магнитов с учетом размерных цепей и уточнить аналитическую методику расчета сил притяжения многополюсных генераторов;

- на базе современных компьютерных технологий уточнить приближенную традиционную методику проектирования валов сложной конфигурации и повышенной относительной длины, с учетом технологического эксцентриситета ротора и притяжения магнитов, для обеспечения его прочности на изгиб и необходимой критической частоты;

- обеспечить допустимые температурные режимы работы статора и ротора за счет использования интенсивной системы охлаждения;

- на основе проведенных исследований уточнить традиционную методику конструирования авиационных генераторов с высокоэнергетическими постоянными маг-

нитами.

Методы исследования.

В основе исследования лежит расчетный сопоставительный анализ основных конструктивных схем генераторов с возбуждением от высокоэнергетических постоянных магнитов в системах с электронными преобразователями, на базе традиционных методов цепей с сосредоточенными параметрами и компьютерных технологий исследования электрических, магнитных, механических и тепловых процессов на основе моделей с распределенными параметрами. Исходным для исследований является электромагнитный расчет генератора, а тепловой и механический расчеты выступают в качестве функциональных ограничений при обосновании наиболее рационального технического решения.

Объекты исследования.

Объектами исследования являются авиационные синхронные генераторы системы электроснабжения повышенной мощности с возбуждением от высокоэнергетических постоянных магнитов с непосредственным приводом от авиадвигателя в системе с электронными преобразователями, как альтернативные традиционным генераторам с электромагнитным возбуждением с синхронными возбудителем и подвозбудителем.

Научная новизна.

Научная новизна исследований состоит в том, что:

- обоснована целесообразность использования генераторов с высокоэнергетическими постоянными магнитами в системах электроснабжения постоянного тока повышенной мощности на уровне сотен и более кВА, как альтернативных генераторам с электромагнитным возбуждением;

- на основе разработанной технологии конечно-элементного анализа определены области рационального использования многополюсных роторов с радиальными и тангенциальными магнитами, различных конструкций их бандажей и предложен способ снижения концентрации механических напряжений в немагнитном бандаже, обеспечивающий повышенную прочность ротора;

- на базе численного анализа потерь в массивных и шихтованных магнитных и немагнитных обоямах роторов с постоянными магнитами, обусловленных зубчатостью статора, предложен способ расчета нагрева редкоземельных магнитов;

- на основе аналитического представления магнитного поля возбуждения постоянных магнитов разработана методика расчета сил притяжения многополюсных генераторов с постоянными магнитами, подтвержденная результатами конечно-элементного анализа;

- на базе современных компьютерных технологий уточнена приближенная традиционная методика проектирования валов сложной конфигурации и повышенной относительной длины с учетом технологического эксцентриситета ротора и притяжения магнитов, обеспечивающая разработку валов необходимой прочности на изгиб и критической частоты вращения;

- на основе проведенных исследований уточнена традиционная методика конструирования авиационных генераторов с высокоэнергетическими постоянными магнитами.

Практическая ценность.

Представлена возможность оценки эффективности бандажей с биметаллической и шихтованной обоймой по обеспечению температурных условий работы редкоземельных постоянных магнитов.

Алгоритм уточненного расчета критической частоты вала сложной геометрии с учетом магнитного притяжения позволяет обосновать создание генераторов с постоянными магнитами повышенной мощности.

Уточненный расчет магнитного притяжения с учетом размерной цепи и реальной геометрии вала дает возможность обосновать принятую конструкцию ротора.

Предложенный способ снижения концентрации механических напряжений в немагнитной обойме ротора позволяет повысить частоту вращения и максимальную мощность генератора.

Усовершенствованная конструктивная схема канального жидкостного охлаждения статора обеспечивает повышение допустимой плотности тока в обмотке статора.

Использование результатов полученных в диссертации и опыта разработок машин ГТ-90 и ДСВ-100 дает возможность создания генераторов с постоянными магнитами мощностью несколько сотен кВА и выше, альтернативных генераторам с электромагнитным возбуждением.

Реализация результатов.

Предложенные рекомендации по выбору наиболее рациональной конструктивной схемы ротора, с учетом теплового состояния редкоземельных магнитов, уточнение расчета критической частоты и магнитного притяжения на основе анализа размерной цепи и реальной геометрии вала, а также рекомендации по повышению прочности и охлаждению генератора, реализованы в предложенной уточненной методике конструирования генераторов с постоянными магнитами, позволяющей более обоснованно разрабатывать перспективные генераторы с возбуждением от высокоэнергетических постоянных магнитов, альтернативные генераторам с электромагнитным возбуждением.

Достоверность полученных результатов.

Достоверность полученных результатов диссертационной работы определяется корректностью использования методов теории цепей и положений теории поля, апробированных традиционных методов электромагнитного, теплового и механического расчетов, а также их уточнения на основе использования компьютерных технологий исследования.

Апробация работы.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Шестнадцатая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов. Москва, МЭИ, 2010.
2. Московская молодежная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2012». 17-20 апреля 2012 года. Москва, МАИ.
3. Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации. XXI Международный научно-технический семинар, 18-25 сентября 2012 г., Алушта.
4. Московская молодежная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2013». 16-18 апреля 2013 года. Москва, МАИ.
5. Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации: Сборник трудов XXII Международного научно-технического семинара, 18-24 сентября 2013 г., Алушта.

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 7 научных работ, из них 2 – в журнале «Вестник МАИ», входящий в перечень научных изданий, рецензируемых ВАК РФ. На разработанные в рамках диссертационного исследования ротор электрической машины и статор электрической машины получены 2 патента.

Структура работы.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и приложений; основная часть работы имеет 128 страниц, 67 рисунков, 5 таблиц и 104 наименования списка литературы.

Основные положения, выносимые на защиту.

Рекомендации по выбору бандажей крепления постоянных магнитов.

Способ расчета нагрева редкоземельных постоянных магнитов на базе анализа потерь в обоямах роторов, обусловленных зубчатостью статора.

Алгоритм расчета магнитного притяжения ротора на основе анализа размерной цепи электрической машины и аналитической зависимости магнитной индукции в зазоре от геометрии активной зоны.

Уточненная методика расчета критической частоты вращения ротора генератора с постоянными магнитами с валом сложной конфигурации.

Способ снижения концентрации механических напряжений в немагнитной обойме ротора.

Усовершенствованная конструктивная схема канального жидкостного охлаждения статора.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертации, определена научная новизна и практическая ценность полученных результатов, приведены сведения об апробации и публикациях, представлена структура диссертационной работы.

В первой главе рассмотрены последовательность и содержание этапов проектирования авиационных генераторов и определены пути решения проблем разработки генераторов повышенной мощности более сотен кВА.

Данная последовательность представлена на рисунке 1. В настоящее время в авиации наиболее широко используются системы электроснабжения переменного тока постоянной частоты 400 Гц и переменного тока переменной частоты 360-800 Гц. В качестве перспективной рассматривается система электроснабжения постоянного тока повышенного напряжения. Единичная мощность авиационных генераторов непрерывно возрастает и достигает сотен кВА. Наиболее эффективными для основных систем электроснабжения являются генераторы с электромагнитным возбуждением с синхронным или асинхронным возбудителем и подвозбудителем на основе постоянных магнитов. Использование подобных генераторов рационально вплоть до предельно допустимой мощности машин этого типа, ограничиваемой прочностью ротора, прогибом вала и критической частотой вращения. Все другие типы генераторов нужно рассматривать как альтернативные этим генераторам.

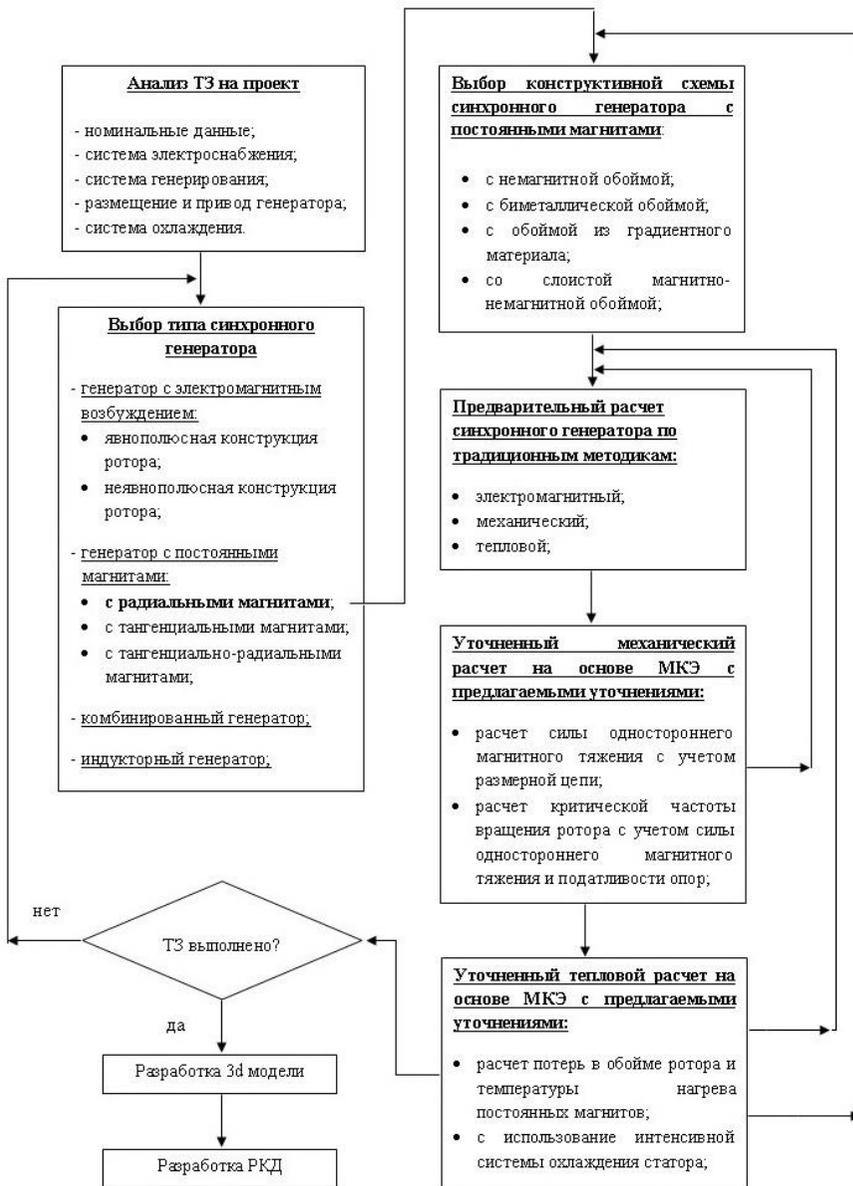
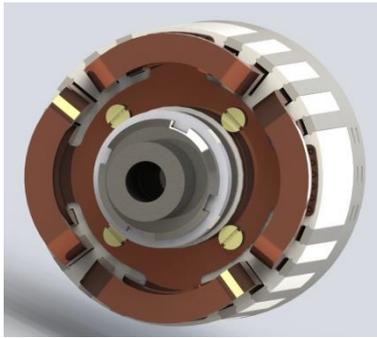
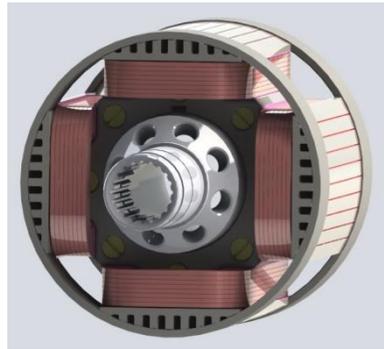


Рисунок 1- Схема расчета авиационного синхронного генератора.

На рисунке 2 представлен ротор генератора с электромагнитным возбуждением.



а) неявнополюсная конструкция



б) явнополюсная конструкция

Рисунок 2- Ротор генератора с электромагнитным возбуждением.

Согласно основному расчетному уравнению

$$S_p = D_{\max}^2 l \sigma_u n \quad (1)$$

повышение расчётной мощности генератора S_p возможно:

- за счет увеличения диаметра ротора D_{\max} , который ограничен его прочностью

$$D_{\max} = \frac{60V_{\text{дон}}}{\pi n} \quad (2)$$

где $V_{\text{дон}}$ - допустимая окружная скорость и n - частота вращения ротора генератора;

- за счет увеличения длины пакета l , которая ограничена диаметром вала, его прогибом;

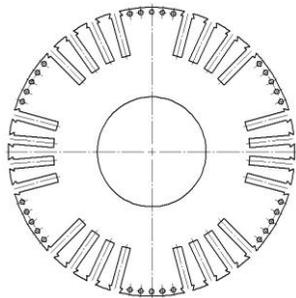
- за счет увеличения коэффициента использования генератора σ_u , который ограничен предельной линейной нагрузкой и плотностью тока

$$\sigma_u = \frac{\pi^2}{60} \alpha_i k_B k_o A B_\delta \quad (3)$$

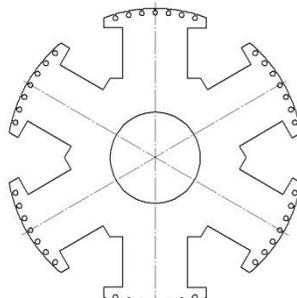
где α_i - расчетный коэффициент полюсного перекрытия, k_B - коэффициент формы ЭДС, k_o - обмоточный коэффициент, A – линейная нагрузка генератора, B_δ - магнитная индукция в рабочем зазоре.

Повышение единичной мощности генераторов с электромагнитным возбуждением возможно за счет использования более прочных материалов и перехода от явнополюсной конструкции с сосредоточенными обмотками на полюсах к более прочной

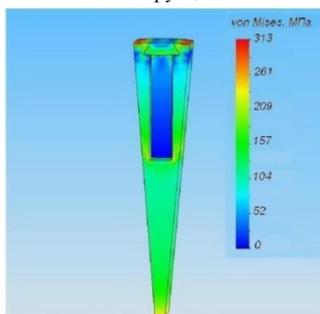
неявнополюсной с обмотками распределенными по пазам. На рисунке 3 представлены результаты сопоставительного анализа прочности этих типов роторов.



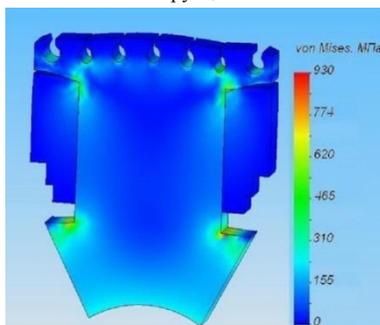
а) эскиз активной зоны ротора неявнополюсной конструкции



б) эскиз активной зоны ротора явнополюсной конструкции



в) неявнополюсная конструкция



г) явнополюсная конструкция

Рисунок 3- Результаты прочностного расчета ротора с электромагнитным возбуждением.

Из рисунка видно, что неявнополюсная конструкция ротора обладает большей прочностью, чем явнополюсная. Если прочность ротора недостаточна, то необходимо снижать частоту вращения генераторов. При этом возможно выполнение двух генераторов с повышенной частотой вращения меньшей суммарной массой, чем одного той же мощности, но при более низких частотах вращения.

Альтернативным решением проблемы повышения единичной мощности генераторов является переход на систему возбуждения от высокоэнергетических постоянных магнитов. Их преимущество состоит не только в повышенной прочности, но и в возможности выполнения генераторов с большим количеством полюсов (до 12 и выше). Это важно при работе генераторов в системе электроснабжения постоянного тока. Синхронные генераторы с неявнополюсной системой возбуждения при ограниченных диаметрах ротора рациональны лишь при 4-6 полюсах ротора. Использование систем возбуждения на основе постоянных магнитов позволяет решить проблему критической частоты вращения, поскольку размеры постоянных магнитов в 2-3 раза

меньше эквивалентных по МДС и потоку ферромагнитных полюсов с обмоткой. Это дает возможность выполнять генераторы с большим диаметром вала и уменьшить его прогиб от массы, дисбаланса ротора и магнитного притяжения. При проектировании подобных генераторов необходимо обеспечить работу постоянных магнитов при температуре в пределах 200 °С за счет снижения потерь в роторе, обусловленных в первую очередь зубчатостью статора, и их охлаждения.

Развитию методов конструирования генераторов с постоянными магнитами посвящены последующие главы.

Во второй главе рассматривается проектное конструирование генераторов с постоянными магнитами и пути повышения прочности обойм их роторов.

Рассмотрены схемы с радиальными и тангенциальными призматическими магнитами, их преимущества и недостатки (рисунок 4-5). Генераторы с тангенциальными магнитами обеспечивают более высокие значения магнитной индукции в рабочем зазоре, что позволяет сократить длину генератора при неизменном диаметре ротора, однако имеют более тяжелые ротор и статор по сравнению с радиальными магнитами при одинаковой мощности. Учитывая увеличение массы ротора за счет необходимости использования ферромагнитных полюсов и увеличение массы ярма якоря в генераторах с тангенциальными магнитами, в диссертации предпочтение отдается генераторам с радиальными магнитами.

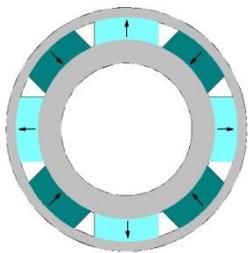


Рисунок 4 - Схема ротора с радиальными магнитами.

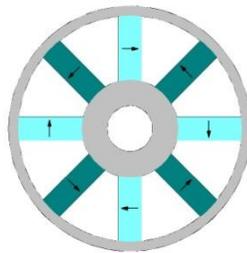


Рисунок 5 - Схема ротора с тангенциальными магнитами.

В главе проанализированы преимущества и недостатки основных конструктивных схем крепления магнитов на роторе (рисунок 6-9) с учетом опыта проектирования генератора ГТ-90 и двигателя ДСВ-100.

Весьма эффективно использование немагнитных, например титановых обойм. Как показывают исследования использование немагнитных обойм, толщина которых реально составляет несколько миллиметров, не сильно влияет на снижение магнитного потока в рабочем зазоре. Применение биметаллических обойм или обойм из градиентного материала не снижает магнитный поток магнитов, но увеличивает поперечное индуктивное сопротивление и продольную составляющую МДС реакции якоря.

Для снижения потерь в бандажах и нагрева редкоземельных магнитов, допустимые рабочие температуры которых находятся в пределах двухсот градусов, бандажи рационально выполнять шихтованными.

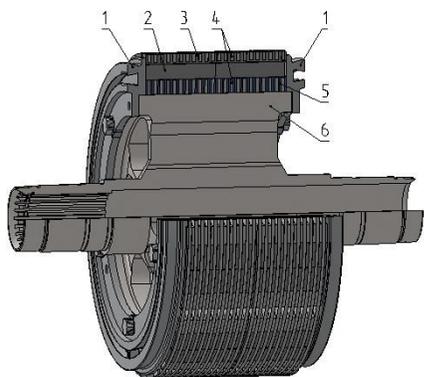


Рисунок 6 - Эскиз магнитной системы ротора радиальной намагниченности со слоистой магнитно-немагнитной обоймой: 1 – фланец, 2 – постоянный магнит, 3 – полюсный наконечник, 4 – немагнитная кольцевая пластина (силовой элемент), 5 – ярмо, 6 – вал.

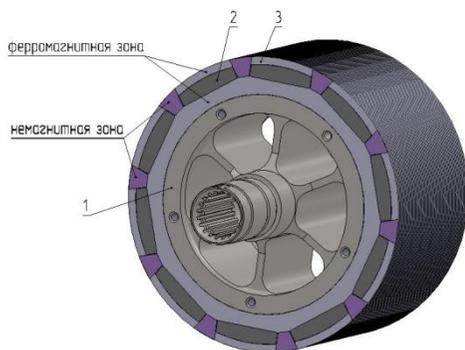


Рисунок 7 - Эскиз магнитной системы ротора радиальной намагниченности с градиентным материалом: 1- вал, 2 – постоянный магнит, 3 – обойма.

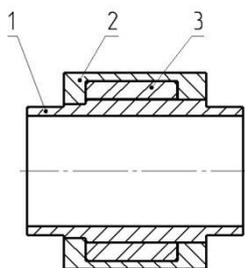


Рисунок 8 - Эскиз магнитной системы ротора с немагнитной массивной обоймой: 1- вал (ярмо), 2 – немагнитная обойма, 3 – постоянный магнит.

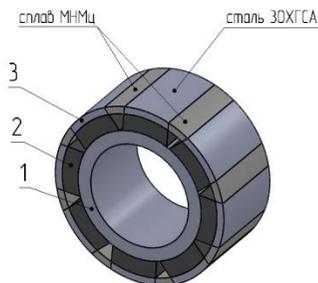


Рисунок 9 - Эскиз магнитной системы ротора радиальной намагниченности с биметаллической обоймой: 1 – вал (ярмо), 2 – постоянный магнит, 3 – биметаллическая обойма.

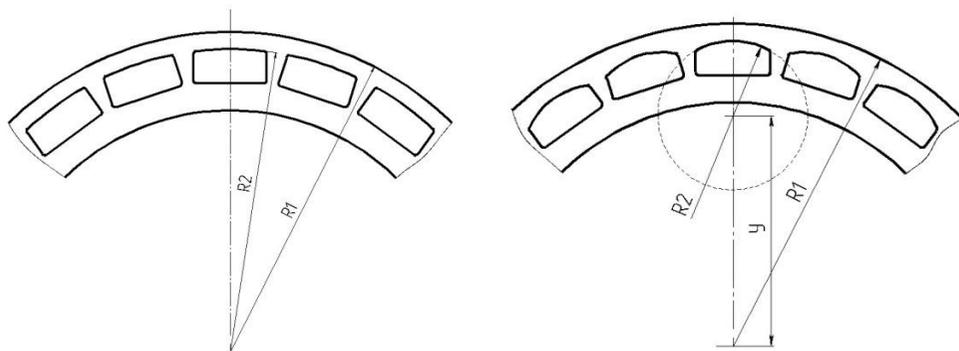
Дан механический и электромагнитный анализ удерживающих обойм роторов с постоянными магнитами. Результаты анализа представлены в таблице 1. Из результатов анализа видно, что наибольшие радиальные перемещения имеет немагнитная обойма из титана. Это необходимо учитывать при выборе величины рабочего зазора.

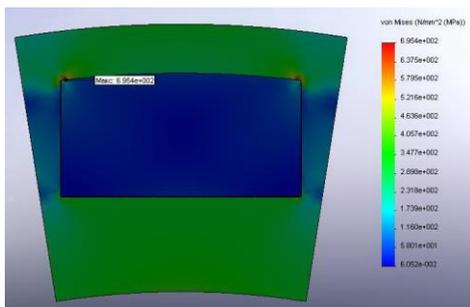
Исследовано также использование обойм, представляющих собой два концентрических кольца, между которыми устанавливаются магниты и перемычки колец, так

как при этом в работе задействуется сечение обоих колец. Недостатком рассматриваемой формы обоймы является концентрация механических напряжений в месте соединения перемычек с кольцами. Разработан способ уменьшения концентрации механических напряжений в обойме ротора (патент № 2516440). Результаты исследования обоймы представлены на рисунке 10.

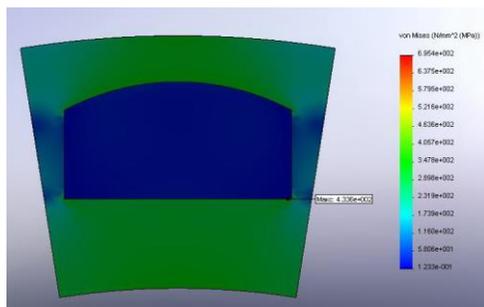
Таблица 1.

| Тип обоймы ротора | Толщина обоймы, мм | Механические напряжения, МПа | Перемещения, мм | Частота вращения, об/мин | Удельный магнитный поток в рабочем зазоре, Вб/м |
|----------------------|--------------------|------------------------------|-----------------|--------------------------|---|
| слоистая структура | 7,0 | 1000 | 0,42 | 20 000 | 0,016 |
| немагнитная обойма | 3,1 | 1000 | 0,7 | | 0,014 |
| градиентный материал | 5,3 | 800 | 0,15 | | 0,017 |





а) концентричная форма обоймы



б) эксцентричная форма обоймы

Рисунок 10 – Способ уменьшения концентрации механических напряжений.

Эффективность предлагаемого способа подтверждена физическим экспериментом. Проведена проверка механической прочности ротора электродвигателя, силовой бандаж которого был спроектирован с использованием предлагаемого способа уменьшения концентрации механических напряжений. Данный двигатель является разработкой «АКБ «Якорь». Прочность ротора (рисунок 11) рассматриваемого двигателя проверялась на стенде испытательной лаборатории «АКБ «Якорь» (рисунок 12), путем его вращения со скоростью на 20% больше рабочей.



Рисунок 11 - Ротор синхронного электродвигателя.



Рисунок 12 - Испытательный стенд для проверки механической прочности ротора.

Проведенные исследования позволяют обоснованно выбрать наилучшую конструктивную схему крепления магнитов.

В третьей главе проведено исследование прочности роторов генераторов с постоянными магнитами.

На основе традиционных методов расчета и конечно-элементного анализа был разработан алгоритм автоматизированного расчета прогиба и критических частот вращения роторов электрических машин с постоянными магнитами. Разработана аналитическая методика расчета сил магнитного притяжения. Алгоритм расчета прочности роторов представлен на рисунке 13.

Одним из первых блоков в алгоритме является расчет размерной цепи, позволяющий определить наихудшее возможное сочетание размеров деталей и узлов электрической машины. Конечной точкой данного блока расчета является величина минимально возможного немагнитного зазора между ротором и статором и максимально возможного эксцентриситета. Полученная величина минимального немагнитного зазора используется при создании конечно-элементной модели в блоке расчета силы одностороннего магнитного притяжения, а величина максимально возможного эксцентриситета используется для аналитического определения силы одностороннего магнитного притяжения.



Рисунок 13 – Алгоритм расчета прочности роторов.

При этом распределение магнитной индукции в зазоре описывается выражением (4) и представлено на рисунке 14 для четырех полюсов шести полюсного генератора.

$$B_{\delta}(x) = \frac{4B_r}{\pi} \sum_{n=1,3,\dots}^{N \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{n} \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi}{2} \cdot \alpha\right) \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi}{2}\right) \frac{\sinh\left(\frac{n\pi}{\tau} h_m\right)}{\sinh\left(\frac{n\pi}{\tau} (h_m + \delta)\right)} \sin\left(\frac{n\pi}{\tau} x\right) \right] \quad (4)$$

При конструировании электрических машин с постоянными магнитами необходим учет силы одностороннего магнитного притяжения, увеличивающей прогиб вала и снижающей критическую частоту вращения ротора. Расчет размерной цепи является стартовой точкой для выполнения расчета силы одностороннего магнитного притяжения. Указанная сила обусловлена, главным образом, наличием эксцентриситета между осями ротора и статора. Сила одностороннего магнитного притяжения зависит не только от величины эксцентриситета, но и от числа полюсов.

Для расчета начальной силы одностороннего магнитного притяжения в электрических машинах с постоянными магнитами автором предлагается методика, основанная на расчете магнитной индукции под каждым полюсом электрической машины.

Предлагаемая аналитическая методика учитывает реальную геометрию многополюсной активной зоны, изменение индукции в рабочем зазоре при эксцентриситете с учетом потоков рассеяния. При

На рисунке 16 представлена картина распределения радиальной составляющей магнитного поля этой машины, определяющая силы магнитного притяжения (рисунок 15) при изменении $\varphi = \pi x / (r\tau)$. Из рисунка видно, что изменение магнитной индукции под полюсами при изменении величины зазора из-за эксцентриситета не велико. Это обусловлено значительным магнитным сопротивлением самих магнитов. Сила магнитного притяжения в генераторах с постоянными магнитами ниже, чем в генераторах с электромагнитным возбуждением, где она существенно зависит от величины зазора.

Удельная сила магнитного притяжения определяется выражением (5), где B_δ представляется выражением (6).

$$F(\varphi) = \frac{B_\delta(\varphi)^2}{2 \cdot \mu_0} \tag{5}$$

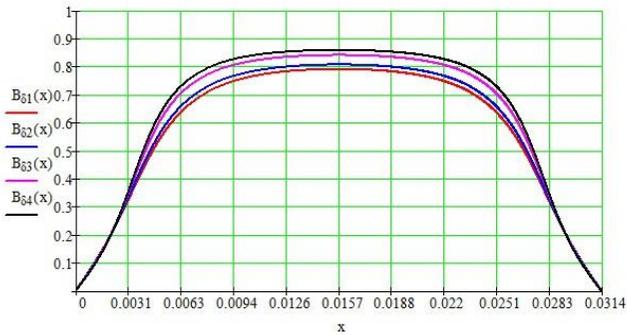


Рисунок 14 - Нормальная составляющая магнитной индукции под полюсом.

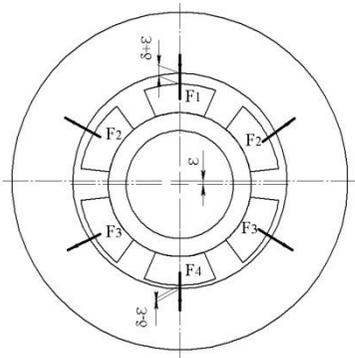


Рисунок 15 – Силы магнитного притяжения.

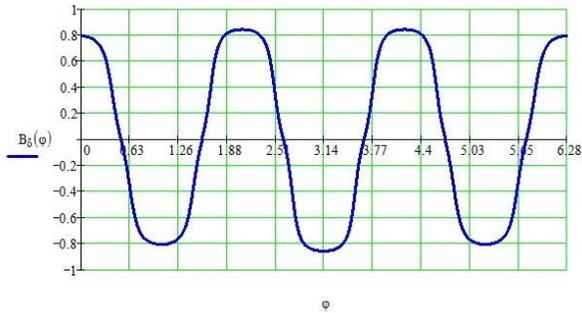


Рисунок 16 - Распределение радиальной составляющей магнитного поля.

$$B_{\delta}(\varphi) = B_{\delta} \left[\left(\varphi + \frac{\alpha_{\tau}}{2} \right) \cdot \frac{\tau}{\alpha_{\tau}} \right] \quad (6)$$

Составляющая удельной силы по направлению эксцентриситета (7).

$$F_x(\varphi) = F(\varphi) \cdot \cos(\varphi) \quad (7)$$

Сила одностороннего магнитного притяжения по оси эксцентриситета представляется выражением (8).

$$F_x = \frac{l_{\delta} R \cdot \int_0^{2\pi} F_x(\varphi) \partial\varphi}{10} \quad (8)$$

где R – радиус расточки якоря.

Распределение магнитной индукции в активной зоне шести полюсной машины представлено на рисунке 17. На рисунке 18 представлен график изменения силы магнитного притяжения по расточке якоря шести полюсной машины.

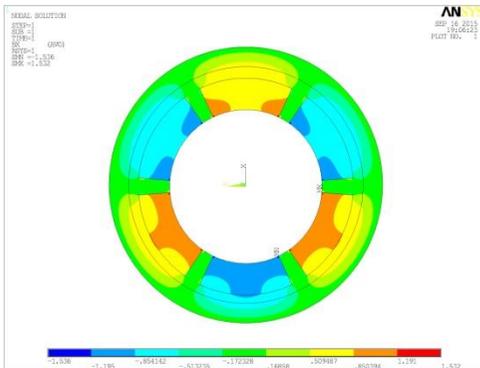


Рисунок 17 - Распределение магнитной индукции в активной зоне шести полюсной машины.

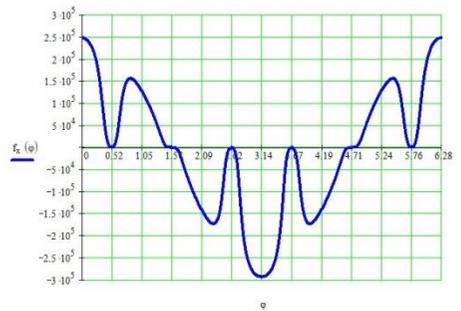


Рисунок 18 – График изменения силы магнитного притяжения по расточке якоря шести полюсной машины.

Результаты аналитического и конечно-элементного анализа приведены в таблице 2. Расхождение находится в пределах 5- 10 %.

Таблица 2.

| | метод Алексеева А.Е. | Число полюсов | | | | | |
|---|-------------------------|-------------------------|--------------|-------------------------|--------------|-------------------------|--------------|
| | | 4 | | 6 | | 12 | |
| | | предлагае- мый метод | КЭ анализ | предлагае- мый метод | КЭ анализ | предлагае- мый метод | КЭ анализ |
| сила одно- стороннего магнитного притяжения, кг | 12,199 | 7 | 7,62 | 8,101 | 8,41 | 9,354 | 8,896 |

Расчет установившейся силы одностороннего магнитного притяжения при использовании метода конечных элементов предлагается выполнять по алгоритму, представленному на рисунке 19. Данный расчет состоит из нескольких итераций.

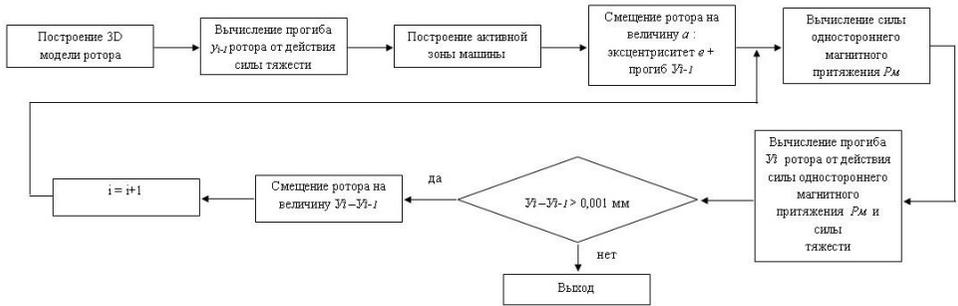


Рисунок 19 – Алгоритм расчета силы одностороннего магнитного притяжения.

Существенное влияние на прогиб вала и как следствие на критическую частоту оказывает сила от остаточной неуравновешенности ротора, которая может быть определена как :

$$P_{ост} = 1,0955 * 10^{-2} m_{рот} n^2 e_{см} \tag{9}$$

где $m_{рот}$ - масса ротора, кг; n - частота вращения ротора, об/мин; $e_{см}$ - дисбаланс ротора, м.

Существует несколько традиционных методов определения прогиба вала, который в

дальнейшем используется при расчете критической частоты вращения ротора. Для сравнения традиционных методов расчета с методом конечных элементов (МКЭ) выполнен расчет критической частоты вращения ротора магнитоэлектрического генератора, рабочая частота вращения которого 8400 об/мин. Результаты расчетов представлены в таблице 3.

Таблица 3.

| | Методика с сосредоточенной нагрузкой, об/мин. | Методика с распределенной нагрузкой, об/мин. | Расчет МКЭ, об/мин. | Экспериментальное исследование, об/мин. |
|--------------------------------------|---|--|---------------------|---|
| Критическая частота вращения, об/мин | 38510 | 41840 | 28000 | 30240 |

Из таблицы 3 видно, что компьютерные технологии на основе МКЭ за счет использования более совершенных математических моделей позволяют существенно повысить точность расчета критических частот.

Проведенные исследования позволяют повысить точность расчетного конструирования многополюсных роторов с постоянными магнитами.

В четвертой главе рассматриваются температурные условия работы постоянных магнитов при различных типах бандажей и повышение эффективности охлаждения якоря.

На рисунке 20 показана зависимость свойств магнитов SmCo от температуры.

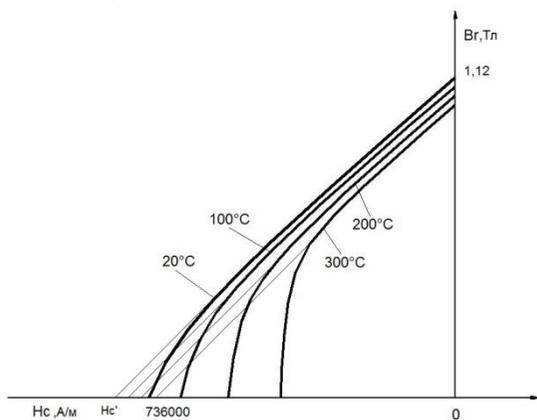


Рисунок 20 – Зависимость характеристик постоянного магнита SmCo от температуры.

Уменьшение величины H_c и H_c' используемой при КЭ анализе составляет порядка 7%. Основную роль в нагреве магнитов играют потери в элементах бандажей, обусловленные зубчатостью статора. Аналитический расчет этих потерь, связанных с глубиной проникновения магнитного поля в магнитопроводящую среду достаточно сложен и составляет самостоятельную проблему. В диссертации проведен конечно-элементный анализ потерь в ос-

новых типах бандажей и разработана методика расчета нагрева постоянных магнитов (рисунок 21).



Рисунок 21 – Алгоритм теплового расчета ротора.

Данная методика позволяет оценить температуру нагрева постоянных магнитов, которая определяет допустимость применения выбранной марки магнитов в разрабатываемой конструкции ротора и использовать в электромагнитном расчете генератора характеристики магнитов с учетом их температуры. Результаты анализа тепловых потерь представлены в таблице 4. Для анализа использовалась немагнитная шихтованная обойма, немагнитная массивная обойма, биметаллическая обойма и обойма со слоистой магнитно-немагнитной структурой. При расчете потерь в шихтованной обойме, полагалось, что изоляция между листами идеальная, поэтому поверхностные потери вычислялись в одном листе, а затем были умножены на длину пакета ротора.

Таблица 4.

| Тип обоймы | Немагнитная (шихтованная) | Немагнитная (массивная) | Биметаллическая | Слоистая магнитно-немагнитная структура |
|-------------------------|---------------------------|-------------------------|-----------------|---|
| Величина потерь, Вт | 11.88 | 159.75 | 240.6 | 50.83 |
| Температура магнита, °С | 82.8 | 173 | 223.5 | 106.7 |

Из таблицы 4 видно, что наибольшие потери возникают в биметаллической обойме. Это связано с большой электрической проводимостью материала магнитных участков обоймы. Использование в электрической машине ротора с таким типом обоймы требует создания эффективной системы его охлаждения.

На повышение температуры постоянных магнитов оказывает влияние также нагрев статора. В работе предложена система охлаждения, которая позволяет понизить температуру статора, повысить допустимую плотность тока в обмотке якоря и тем самым увеличить линейную нагрузку генератора и, как следствие, его мощность.

На рисунке 22 представлена конфигурация разработанной системы охлаждения по патенту № 2523018.

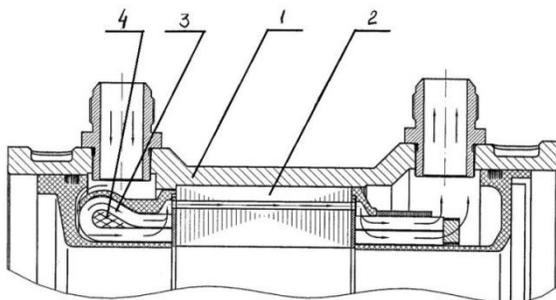


Рисунок 22 - Конструктивная схема статора синхронной машины с каналной системой охлаждения: 1 – корпус, 2 – магнитопровод, 3 – обмотка, 4 - формирователь потока.

Полученные результаты позволяют обеспечить необходимые температурные условия работы магнитов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Обоснована целесообразность использования многополюсных роторов генераторов с высокоэнергетическими постоянными магнитами в системах электроснабжения постоянного тока повышенной мощности на уровне сотен и более кВА.

2. Разработана технология конечно-элементного анализа конструкций бандажей крепления магнитов, обеспечивающих прочность роторов генераторов.

3. Проведен сопоставительный компьютерный анализ тепловых потерь в элементах конструкций крепления магнитов, обусловленных зубчатостью статора для массивных и шихтованных магнитных и немагнитных бандажей, для обеспечения необходимых температурных условий работы редкоземельных магнитов.

4. На базе универсальных программ конечно-элементного анализа разработана технология теплового анализа ротора с постоянными магнитами.

5. Разработана технология конечно-элементного анализа притяжения магнитов с учетом размерных цепей и уточнена аналитическая методика расчета сил притяжения многополюсных генераторов.

6. На базе современных компьютерных технологий уточнена приближенная традиционная методика проектирования валов сложной конфигурации и повышенной относительной длины, с учетом технологического эксцентриситета ротора и притяжения магнитов, для обеспечения его прочности на изгиб и необходимой кри-

тической частоты.

7. Разработана интенсивная система охлаждения статора.
8. Предложен один из возможных способов уменьшения концентрации механических напряжений в обойме ротора.
9. На основе проведенных исследований уточнена методика конструирования авиационных генераторов с высокоэнергетическими постоянными магнитами.

Основные положения диссертации нашли отражение в следующих научных трудах:

1. Патент № 2516440. Российская Федерация, МПК H02K 1/27, 1/28, 21/14. Ротор электрической машины / ОАО «Агрегатное конструкторское бюро «Якорь», Журавлев С. В., Левин А. В., Мисютин Р. Ю., Ситин Д. А., Фокин Ф. А., Хабаров В. А. – опубл. 20.05.2014, Бюл. №14.
2. Патент № 2523018. Российская Федерация, МПК H02K 1/20, 3/24, 9/22. Статор электрической машины / ОАО «Авиационное оборудование», Левин А. В., Довгалёнок В. М., Журавлев С. В., Мисютин Р. Ю., Хабаров В. А. – опубл. 20.07.2014, Бюл. №20.
3. Мисютин Р. Ю., Зечихин Б. С., Журавлев С. В. Охлаждение авиационных электрических машин с постоянными магнитами. Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации: Сборник трудов XXII Международного научно-технического семинара, 18-24 сентября 2013 г., Алушта. – М.: Изд-во МГУПИ. С.203-204.
4. Мисютин Р. Ю., Левин А. В., Журавлев С. В., Зечихин Б. С. Автоматизированное конструирование авиационных электрических генераторов с постоянными магнитами. Вестник Московского авиационного института. 2013. Т.20. №2. С.132-139.
5. Мисютин Р.Ю., Зечихин Б. С. Алгоритм проектирования авиационных генераторов с постоянными магнитами. Московская молодёжная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2013». 16-18 апреля 2013 года. Москва. Сборник тезисов докладов. – М.: ООО «Принт-салон». С.81-82.
6. Мисютин Р. Ю., Зечихин Б. С., Журавлев С. В. Информационные технологии исследования критических частот вращения авиационных генераторов. Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации. Сборник трудов XXI Международного научно-технического семинара, 18-25 сентября 2012 г., Алушта. – М.: Изд-во ГУП Академиздат центр “Наука” РАН. С.64-65.
7. Мисютин Р. Ю., Зечихин Б. С., Журавлев С. В. Конструирование авиационных

электрических машин с постоянными магнитами. Московская молодёжная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2012». 17-20 апреля 2012 года. Москва. Сборник тезисов докладов. – М.: ООО «Принт-салон». С.71-72.

8. Кузьмичев Р. В., Левин Д. В., Мисютин Р. Ю., Зечихин Б. С. Авиационные генераторы повышенной мощности. Вестник Московского авиационного института. 2011. Т.18. №6. С.39-46.

9. Мисютин Р. Ю., Солин Д. С., Зечихин Б. С. К расчёту синхронных машин РЗ-магнитами. Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Шестнадцатая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов. Тезисы докладов, том 2. М., МЭИ, 2010. С.25-26.