

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)»



На правах рукописи

Мисютин Роман Юрьевич

**АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ КОНСТРУИРОВАНИЕ  
АВИАЦИОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ С ПОСТОЯННЫМИ  
МАГНИТАМИ**

Специальность 05.09.01  
«Электромеханика и электрические аппараты»

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
профессор Зечихин Б.С.

Москва-2015

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СИСТЕМ ГЕНЕРИРОВАНИЯ. ....	11
1.1. Основные системы электроснабжения повышенной мощности и обоснование использования в них генераторов с возбуждением от постоянных магнитов. ....	11
1.2. Преимущества и недостатки авиационных генераторов с электромагнитным возбуждением и с постоянными магнитами.....	16
1.3. Этапы проектирования авиационных генераторов. ....	22
Выводы по главе.....	28
ГЛАВА 2. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВИАЦИОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ОТ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ.....	29
2.1. Особенности проектирования генераторов с постоянными магнитами. .....	29
2.2. Конструктивные схемы роторов с редкоземельными.....	44
магнитами. ....	44
2.3. Механический и электромагнитный анализ удерживающих обойм роторов с постоянными магнитами.....	54
2.4. Исследование концентраторов механических напряжений в ..... обойме ротора. ....	60
Выводы по главе.....	65
ГЛАВА 3. АЛГОРИТМ РАСЧЕТА КРИТИЧЕСКИХ ЧАСТОТ ВРАЩЕНИЯ РОТОРОВ АВИАЦИОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ. ....	66
3.1. Блок расчета размерной цепи электрической машины. ....	68
3.2. Блок расчета силы одностороннего магнитного притяжения. ....	70
3.3. Определение силы от остаточной неуравновешенности.....	78

ротора. ....	78
3.4. Расчет жесткости опор.....	81
3.5. Расчет критической частоты вращения ротора.....	85
Выводы по главе.....	94
ГЛАВА 4. ОСОБЕННОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ.....	95
4.1. Обзор существующих систем охлаждения. ....	95
4.2. Охлаждение статоров электрических машин с постоянными магнитами. .....	97
4.3. Анализ теплового состояния роторов электрических машин с постоянными магнитами. ....	100
Выводы по главе.....	109
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	110
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	111
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	118
ПРИЛОЖЕНИЕ .....	129

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность темы.**

Одной из важных тенденций в развитии авиационных систем электропитания 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 электропитания 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 реали-

зовать 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 магнитах 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.**

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 ро-

торов с радиальными и тангенциальными магнитами в системах электропитания 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 магнитами.

### **Методы исследования.**

В основе исследования лежит расчётный 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 много-

полюсных 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 [53, 64, 65, 66, 67, 68, 69], из них 2 [53, 65] – 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 [75, 76].

### **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.

## ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СИСТЕМ ГЕНЕРИРОВАНИЯ.

### 1.1. Основные системы электроснабжения повышенной мощности и обоснование использования в них генераторов с возбуждением от постоянных магнитов.

Одной из важных тенденций развития современных авиационных СЭС является увеличение их мощности и рост единичной мощности генераторов в связи с повышением уровня электрификации самолетов. В настоящее время наиболее перспективными СЭС повышенной мощности являются системы переменного тока плавающей частоты 360-800 Гц, системы постоянного тока повышенного напряжения 270 В, а также традиционные системы переменного тока стабильной частоты 400 Гц напряжением 120/208 В [14, 15, 20, 22, 54, 60, 61, 62, 83, 100]. В подобных СЭС рационально использование генераторов с непосредственным приводом от авиадвигателей. При повышенной мощности особенно сильно проявляются недостатки приводов постоянных оборотов (ППО), имеющих низкие ресурс, КПД и ремонтпригодность, а также высокие эксплуатационные расходы. Важную роль в перспективных системах генерирования играет объединение электромеханических генераторов с электронными преобразователями энергии по частоте и напряжению.

На рисунке 1.1-1.3 представлены структурные схемы перспективных СЭС с приводом генераторов непосредственно от авиадвигателей [43, 55].

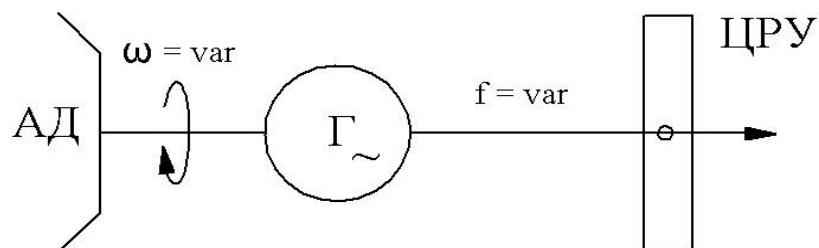


Рисунок 1.1 - Структурная схема системы электроснабжения переменного тока переменной частоты от 360 до 800 Гц : АД – авиационный двигатель, Г – генератор, ЦРУ – центральное распределительное устройство.

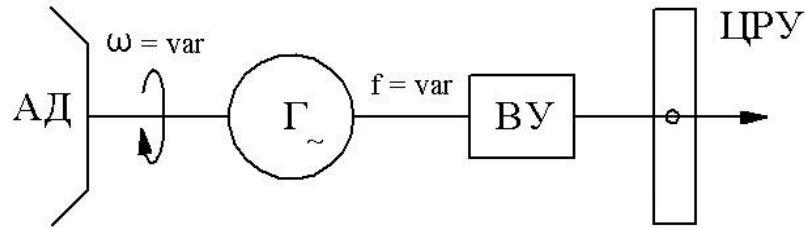


Рисунок 1.2 - Структурная схема системы электроснабжения постоянного тока напряжением 270 В : АД – авиационный двигатель, Г – генератор, ВУ – выпрямительное устройство, ЦРУ – центральное распределительное устройство.

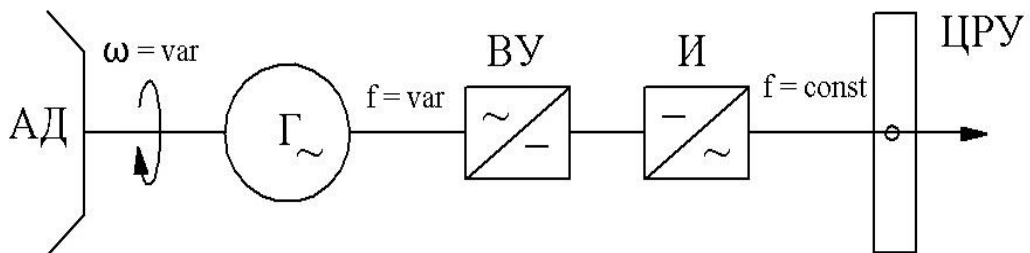


Рисунок 1.3 - Структурная схема системы электроснабжения переменного тока постоянной частоты 400 Гц : АД – авиационный двигатель, Г – генератор, ВУ – выпрямительное устройство, И – инвертор, ЦРУ – центральное распределительное устройство.

Отсутствие привода постоянных оборотов и отсутствие электронных преобразователей является достоинством системы переменного тока переменной частоты. Однако отношение максимальных оборотов авиадвигателя, и соответственно генератора, к минимальным оборотам составляет порядка двух. При этом генератор должен обеспечивать номинальную мощность и перегрузку при минимальных оборотах, а на максимальных оборотах конструкция генератора должна обладать необходимой механической прочностью, имея значительный запас по мощности. С целью снижения массы генераторы выполняются на максимально допустимые по прочности роторов частоты вращения с учетом возможностей подшипниковых опор.

В системах постоянного тока повышенного напряжения и переменного тока стабильной частоты, генераторы работают в системе с электронными преобразователями. Для обеспечения необходимого качества электроэнергии рационально использование генераторов с повышенным количеством полю-

сов или с увеличенным числом фаз, что позволяет снизить массу фильтров. В генераторах с возбуждением от постоянных магнитов, в отличие от генераторов с электромагнитным возбуждением, выполнение повышенного числа полюсов не представляет затруднений.

Для всех рассматриваемых систем генерирования рационально использование генераторов с электромагнитным возбуждением, обеспечивающих стабилизацию напряжения за счет изменения тока возбуждения. Однако подобные высокооборотные генераторы выполняются относительно небольшой длины из-за недостаточной прочности валов и ограничены по предельно допустимой мощности. Для повышения мощности генератора при ограниченном по прочности диаметре ротора необходимо увеличение его длины. Увеличение мощности возможно за счет снижения частоты вращения генератора и соответствующего увеличения диаметра ротора. Однако снижение частоты вращения увеличивает массу генератора. При этом два высокооборотных генератора могут иметь меньшую суммарную массу, чем один генератор их суммарной мощности.

Согласно основному расчетному уравнению

$$S_p = D_{\max}^2 l \sigma_u n \quad (1.1)$$

повышение мощности генератора  $S_p$  возможно:

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

$$D_{\max} = \frac{60V_{\text{дон}}}{\pi n} \quad (1.2)$$

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

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

$$y = \frac{\omega^2 e}{k/m - \omega^2}; \quad k = \frac{48EJ}{l^3}; \quad J = \frac{\pi d^4}{64} \quad (1.3)$$

где  $y$  - прогиб вала генератора,  $\omega$  - угловая скорость ротора генератора,  $e$  - эксцентриситет ротора и статора генератора,  $m$  - масса ротора генератора,  $k$  -

жесткость вала,  $E$  – модуль упругости материала вала,  $J$  – экваториальный момент инерции сечения вала,  $d$  – диаметр вала;

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

$$\sigma_u = \frac{\pi^2}{60} \alpha_i k_B k_o A B_\delta \quad (1.4)$$

где  $\alpha_i$  - расчетный коэффициент полюсного перекрытия,  $k_B$  - коэффициент формы ЭДС,  $k_o$  - обмоточный коэффициент по основной гармонической,  $A$  – линейная нагрузка генератора,  $B_\delta$  - магнитная индукция в рабочем зазоре.

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.

В системах электроснабжения переменного тока стабильной частоты в системах с приводом постоянных оборотов эффективно используются синхронные генераторы с электромагнитным возбуждением с синхронным возбудителем и подвозбудителем. Эти генераторы выполняются с относительной длиной меньше единицы  $l/D = 0,5 \dots 1,0$ , как показано на рисунке 1.4 и 1.5, где представлены конструктивные схемы подобных генераторов.

Существенный недостаток этих генераторов, состоящий в отсутствии стартерного режима работы, может быть устранен за счет некоторого усложнения конструкции и использования асинхронного возбудителя [62]. Применение этих генераторов рационально также в системе переменного тока переменной частоты, так как в этом случае не требуется использование силового электронного преобразователя.

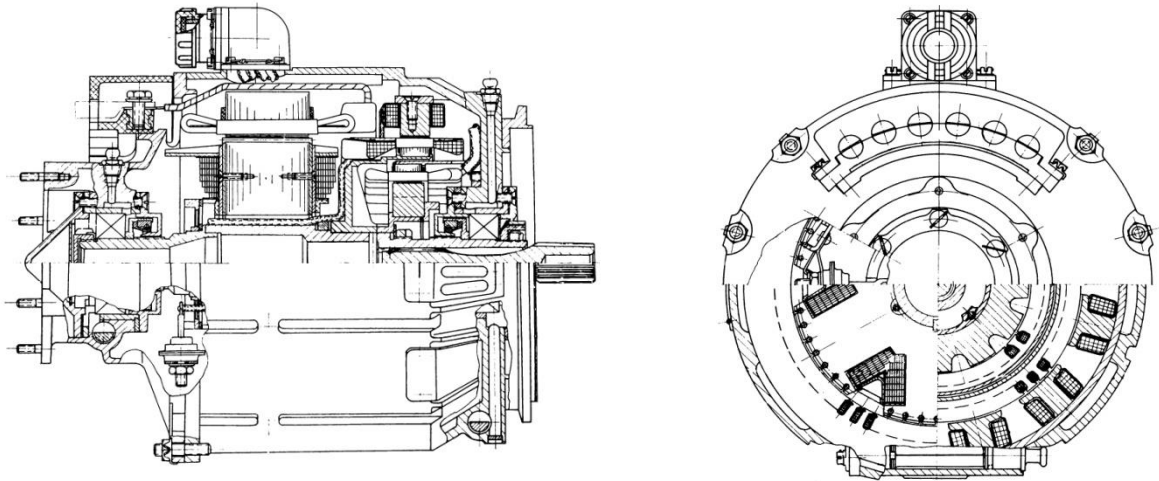


Рисунок 1.4 – Конструктивная схема шестиполюсного авиационного синхронного генератора с электромагнитным возбуждением.

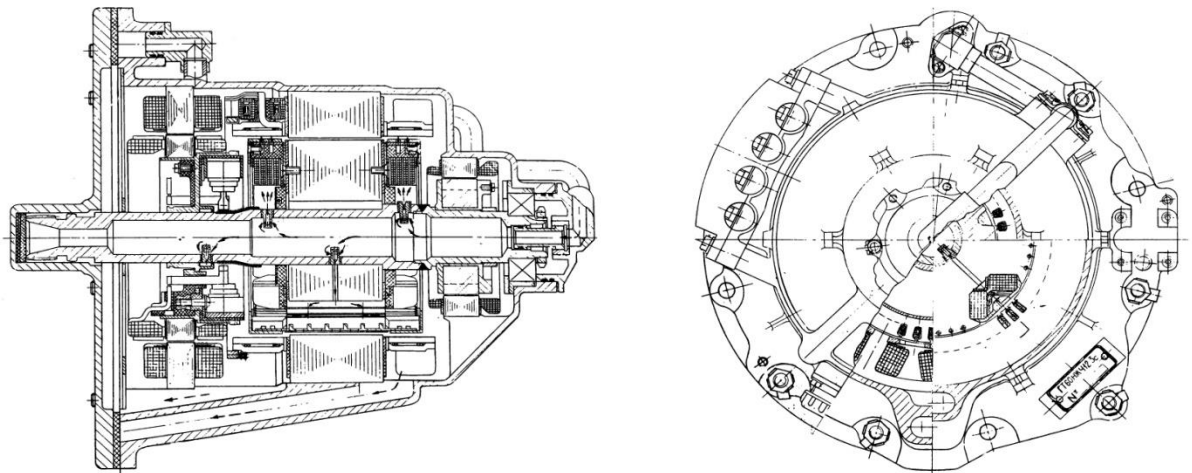


Рисунок 1.5 – Конструктивная схема четырехполюсного авиационного синхронного генератора с электромагнитным возбуждением.

В системе постоянного тока повышенного напряжения 270 В могут быть использованы как генераторы с электромагнитным возбуждением, так и генераторы с постоянными магнитами. И в том и в другом случае необходимо наличие электронного преобразователя. Авиационные генераторы с электромагнитным возбуждением показали эффективность их использования во всех перспективных СЭС.

Рациональность использования генераторов других типов нужно рассматривать в сравнении с этими генераторами.

## **1.2. Преимущества и недостатки авиационных генераторов с электромагнитным возбуждением и с постоянными магнитами.**

Широкое применение генераторов с электромагнитным возбуждением с возбудителем и подвозбудителем в авиационных СЭС как переменного, так и постоянного тока в системе с электронными преобразователями обусловлено показателями их эффективности. Использование в СЭС повышенной мощности генераторов с электромагнитным возбуждением с подвозбудителем и возбудителем обеспечивает их высокую эффективность по уровню массоэнергетических показателей до нескольких сотен кВА. Особенно высокие массоэнергетические показатели достигнуты в системах генерирования при использовании интенсивных жидкостных систем охлаждения [7, 26, 71]. Удельная масса генераторов стабильной частоты 400 Гц с ППО мощностью 60 кВА при частоте вращения 12000 об/мин составляет 0.3 кг/кВА (рисунок 1.5). Высокооборотные авиационные генераторы с электромагнитным возбуждением имеют ограничение предельной мощности без снижения частоты вращения. Для СЭС переменного тока плавающей частоты подобные генераторы разработаны на мощность 250 кВА с удельной массой 0.38 кг/кВА. На самолете В787 на каждом авиадвигателе установлено по два таких генератора. Использование одного генератора мощностью 500 кВА того же диаметра, но вдвое большей длины позволяет существенно снизить удельную массу. Однако разработка подобного генератора с максимально допустимой частотой вращения связана с трудностями обеспечения его критической частоты при вдвое удлиненном вале. Это обусловлено тем, что при ограниченном диаметре ротора обмотка возбуждения занимает много места, не оставляя необходимого места для вала с диаметром, обеспечивающим необходимую критическую частоту. При небольшом количестве полюсов  $2p=4$  возможно использование ротора с неявновыраженной системой полюсов и выполнение его массивным. На рисунке 1.6 представлен неявнополюсный ротор с количеством полюсов  $2p=4$ .



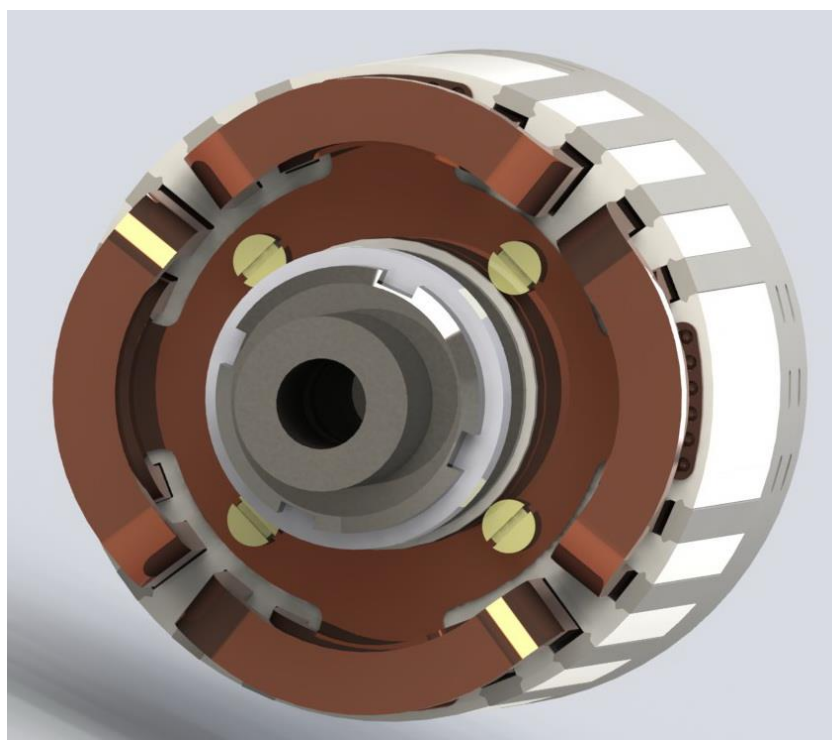
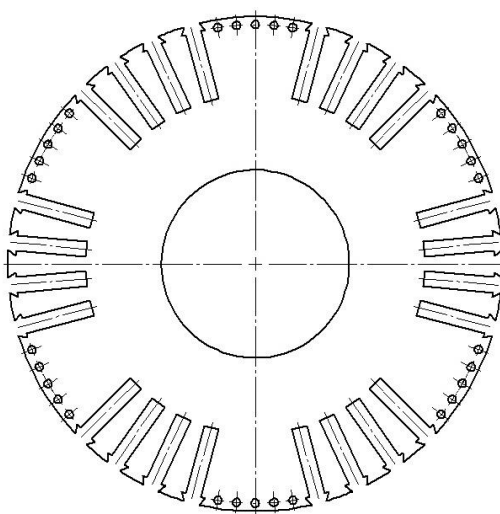
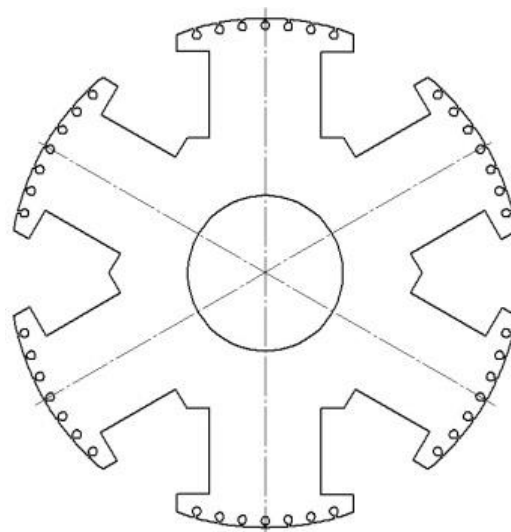


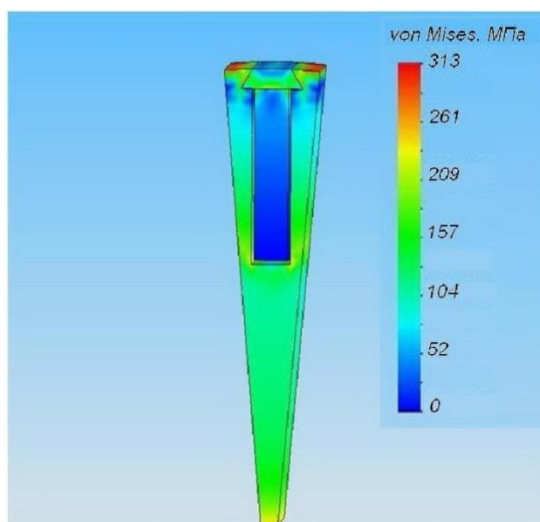
Рисунок 1.6 - Неявнополюсный ротор с количеством полюсов  $2p=4$ .



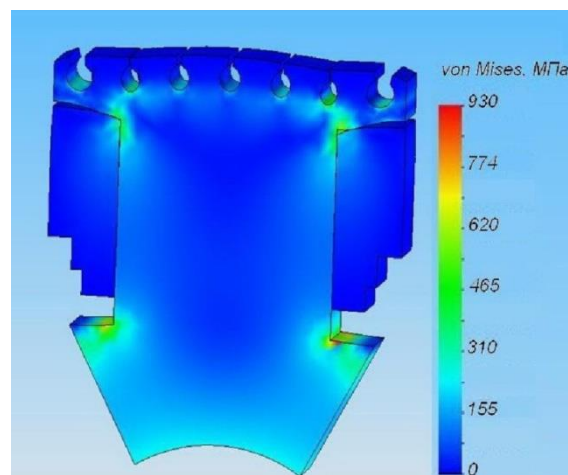
а) эскиз активной зоны ротора неявнополюсной конструкции



б) эскиз активной зоны ротора явнополюсной конструкции



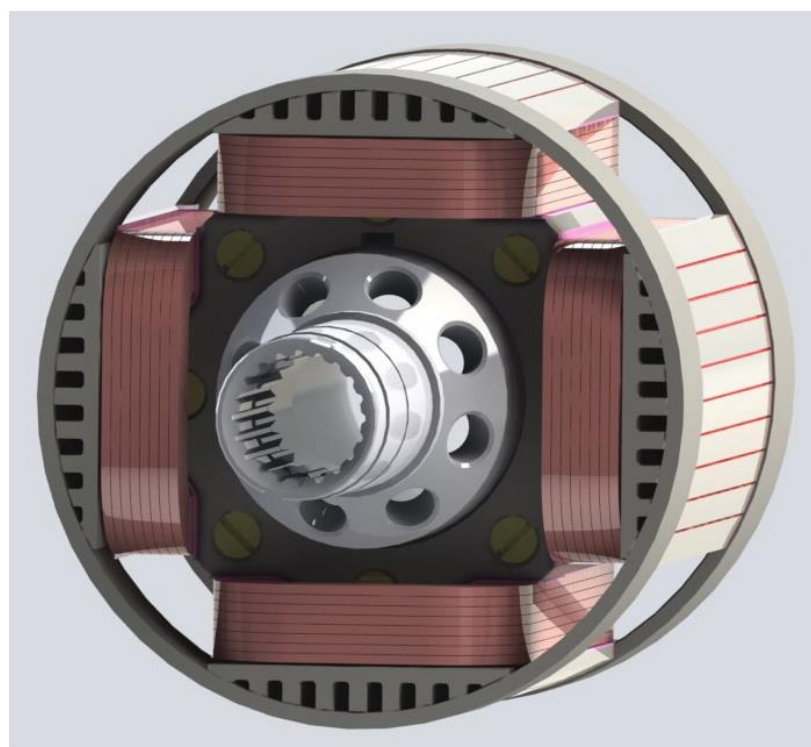
в) неявнополюсная конструкция



г) явнополюсная конструкция

Рисунок 1.7 - Результаты прочностного расчета ротора с электромагнитным возбуждением.

На рисунке 1.7 представлены результаты сопоставительного анализа прочности роторов с электромагнитным возбуждением. Из рисунка 1.7 видно, что неявнополюсная конструкция ротора обладает большей прочностью, чем явнополюсная. Конструкция явнополюсного ротора представлена на рисунке 1.8.

Рисунок 1.8 - Явнополюсный ротор с количеством полюсов  $2p=4$ .

Использование генератора с неявновыраженной конструкцией ротора рационально в СЭС переменного тока с плавающей частотой при  $2p=4$ , но не

рационально в СЭС постоянного тока, где генераторы выполняются многополюсными для обеспечения необходимого качества напряжения. Снижение частоты вращения генератора позволяет поднять диаметр ротора и соответственно диаметр вала и критическую частоту, но это приводит к увеличению удельной массы генератора. При работе генератора в системе с электронными преобразователями частоты рационально поднимать частоту, которая пропорциональна числу полюсов и числу фаз обмотки якоря генератора. При повышенных частотах вращения увеличение количества полюсов с обмотками возбуждения в генераторах с электромагнитным возбуждением становится затруднительно. Для увеличения места под обмотку возбуждения приходится увеличивать высоту полюсов, что приводит к уменьшению места для вала и к понижению критической частоты генератора и его предельной мощности. В подобной ситуации рационально выполнять генератор, при максимально возможном числе полюсов, с увеличенным числом фаз, но это приводит к увеличению выпрямителей и массы системы генерирования.

Недостатками генераторов с электромагнитным возбуждением являются трудность выполнения большого количества полюсов, ограниченная предельная мощность по критической частоте при повышенных частотах вращения и сложность реализации стартерного режима работы. Кроме того подобные генераторы имеют достаточно сложную конструкцию, состоящую из трех машин - основного генератора, возбудителя и подвозбудителя.

Альтернативными генераторам с электромагнитным возбуждением являются генераторы с возбуждением от высокоэнергетических постоянных магнитов.

Преимущества генераторов с постоянными магнитами, в сравнении с генераторами с электромагнитным возбуждением, состоят в том, что:

- имеют более простую конструкцию ротора,
- могут выполняться с большим количеством полюсов,
- обладают более высокой механической прочностью,

- не требуют затрат мощности на возбуждение и имеют более простую систему охлаждения ротора из-за небольших потерь,
- для размещения магнитов требуют в несколько раз меньше места, чем для размещения ферромагнитных полюсов с обмотками возбуждения,
- имеют низкие индуктивные сопротивления и соответственно более высокую перегрузочную способность,
- наличие стартерного режима.

Недостатки этих генераторов состоят:

- в трудности изменения магнитного потока и регулирования напряжения генератора,
- в трудности развозбуждения при внутренних коротких замыканиях, повышенных потерях в стали при максимальных оборотах,
- в невысоких рабочих температурах магнитов [80, 84, 87].

На рисунке 1.9 представлена конструкция ротора с постоянными магнитами.

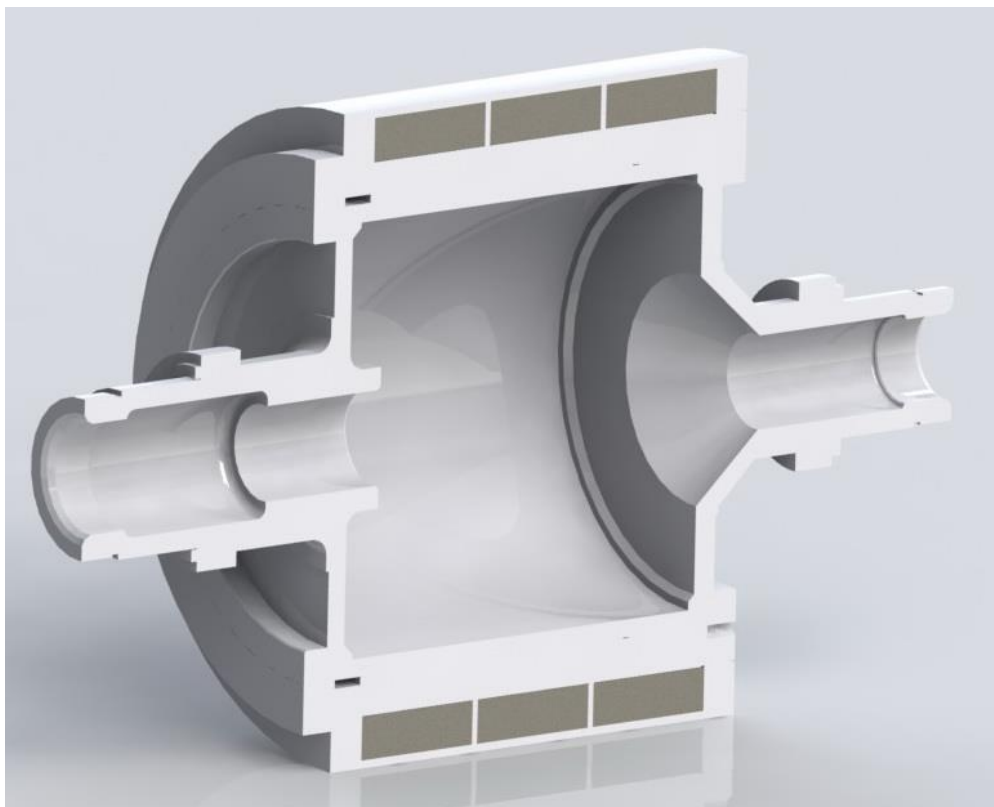


Рисунок 1.9 - Ротор генератора с постоянными магнитами.

Из сопоставления поперечных разрезов активных зон генераторов с электромагнитным возбуждением и с постоянными магнитами видно, что пространство для размещения вала в генераторе с постоянными магнитами существенно больше. Это позволяет поднять диаметр вала для обеспечения увеличения мощности при предельно допустимом по прочности диаметре за счет увеличения длины машины. В генераторе ГТ-90 мощностью 90 кВА при диаметре якоря 195 мм высота магнитов составляет 12 мм и с учетом толщины обоймы равной 2.5 мм и ярма ротора под магнитами – 24 мм, внутренний диаметр ярма индуктора составляет более 100 мм, который определяет максимальный возможный диаметр вала. При использовании магнитного вала магниты можно размещать на валу без ярма. Генератор ГТ-90 выполнен с относительной длиной  $l/D$  меньше единицы. При диаметре вала в 100 мм относительная длина генератора может быть выполнена в несколько раз больше, а его мощность увеличена до нескольких сотен и более кВА.

Таким образом, для авиационных генераторов повышенной мощности на уровне нескольких сотен и более кВА возможно и рационально использование системы возбуждения на основе постоянных магнитов, позволяющей обеспечить повышенную критическую частоту и соответственно повышение максимальной частоты вращения генератора.

### **1.3. Этапы проектирования авиационных генераторов.**

Последовательность проектирования авиационных синхронных генераторов может быть представлена схемой, приведенной на рисунке 1.10.

Номинальные данные определяют уровень номинальной мощности, напряжение, характер нагрузки, число фаз и другие данные, входящие в ГОСТ на авиационные синхронные генераторы. Номинальные данные связаны с системой электроснабжения, для которой предназначается разрабатываемый генератор. Система генерирования является частью системы электроснабжения, которая включает в себя генератор, электронные преобразователи, регулятор напряжения и механический привод. Размещение генератора может быть как вне, так и внутри авиадвигателя или в составе ВСУ. Система охлаждения двигателя с использованием встречного потока воздуха, масла или водяной смеси существенно определяют конструкцию генератора.

Среди наиболее перспективных типов синхронных генераторов необходимо рассмотреть и выбрать наиболее рациональный по принятым критериям. Наиболее важными являются масса, КПД, ресурс, при соблюдении ограничений по мощности и нагреву.

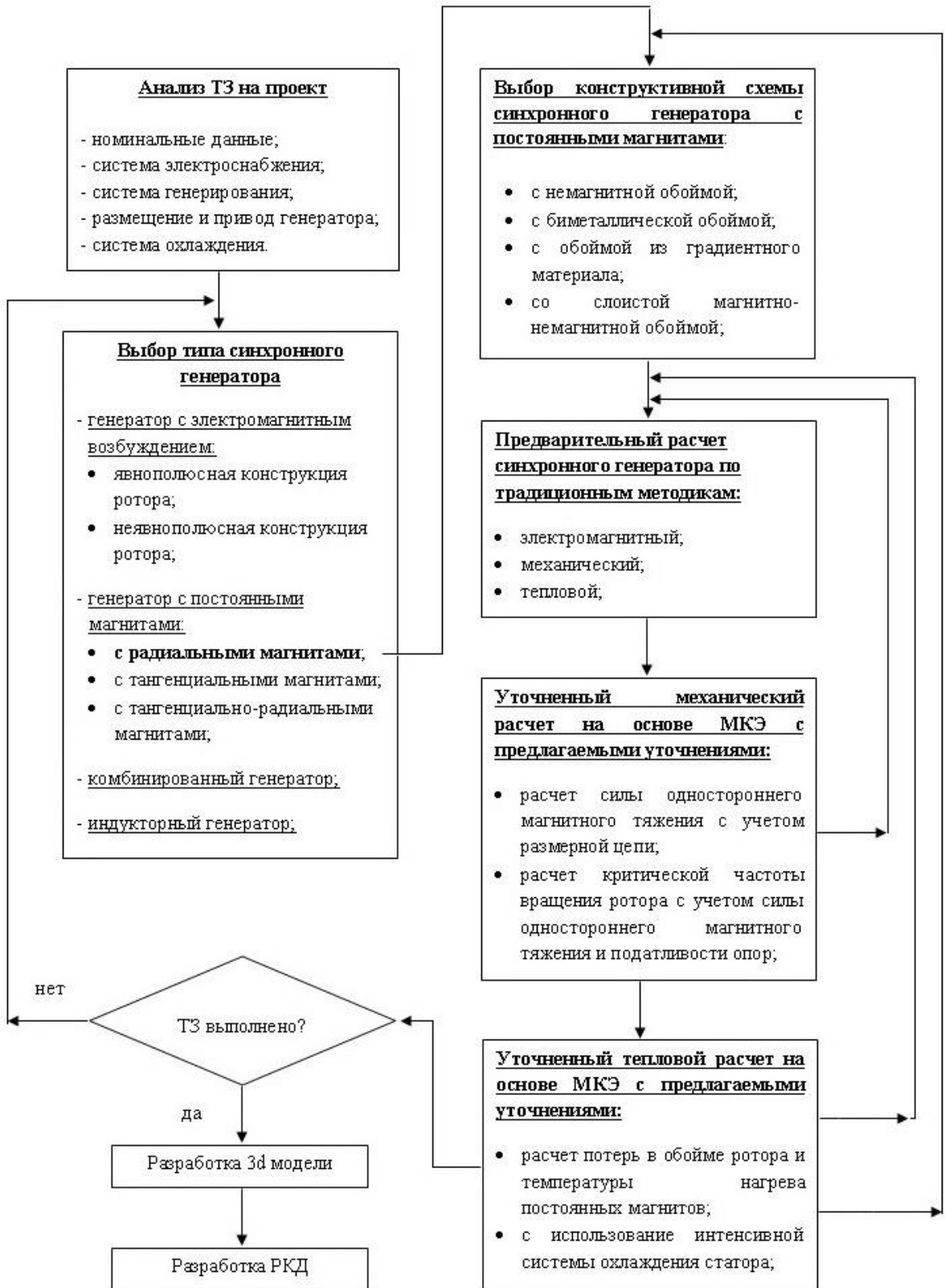


Рисунок 1.10 – Схема расчета авиационного синхронного генератора.

Наиболее эффективными являются классические синхронные генераторы с электромагнитным возбуждением с подвозбудителем и возбудителем,

обеспечивающими их бесконтактность. Все другие типы синхронных машин рационально сравнивать с этими генераторами [6, 8, 10, 17, 50, 74]. В частности при относительно небольшой мощности до 10-15 кВА конструкция этих генераторов весьма сложна. При мощности более нескольких сотен кВА затруднительно выполнение классических синхронных генераторов при частоте вращения выше 16 000...20 000 об/мин., так как из-за большого объема системы электромагнитного возбуждения, они не проходят по критической частоте вращения даже при использовании неявнополюсной конструкции ротора. Кроме того неявнополюсные генераторы допускают небольшое количество полюсов, порядка 4-6. В то время как для систем электроснабжения постоянного тока для снижения массы фильтров рационально количество полюсов порядка 8-12.

Для генераторов мощностью в сотни и более кВА рациональны генераторы с постоянными магнитами, которые из-за относительно небольших размеров магнитов, по сравнению с ферромагнитными полюсами с обмотками, могут выполняться с существенно большим диаметром вала, обеспечивающим более высокое значение критической частоты. Генераторы с постоянными магнитами широко используются в авиации, как в виде отдельной электрической машины, так и в сочетании с другими видами электрических машин. На рисунке 1.11 представлен машинный преобразователь, в котором генератор с постоянными магнитами размещен на одном валу с двигателем постоянного тока для преобразования постоянного тока в переменный.



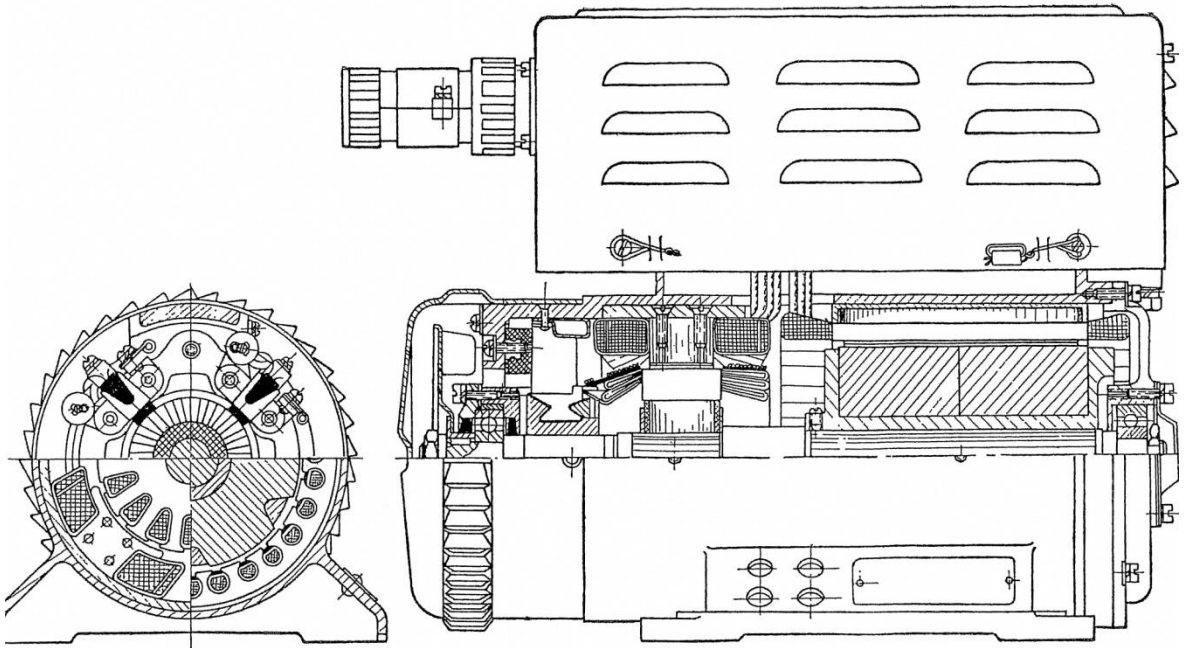


Рисунок 1.11 - Машинный преобразователь.

На рисунке 1.12 представлен генератор с комбинированной системой возбуждения, в котором генератор с постоянными магнитами служит для питания потребителей однофазным и трехфазным переменным током.

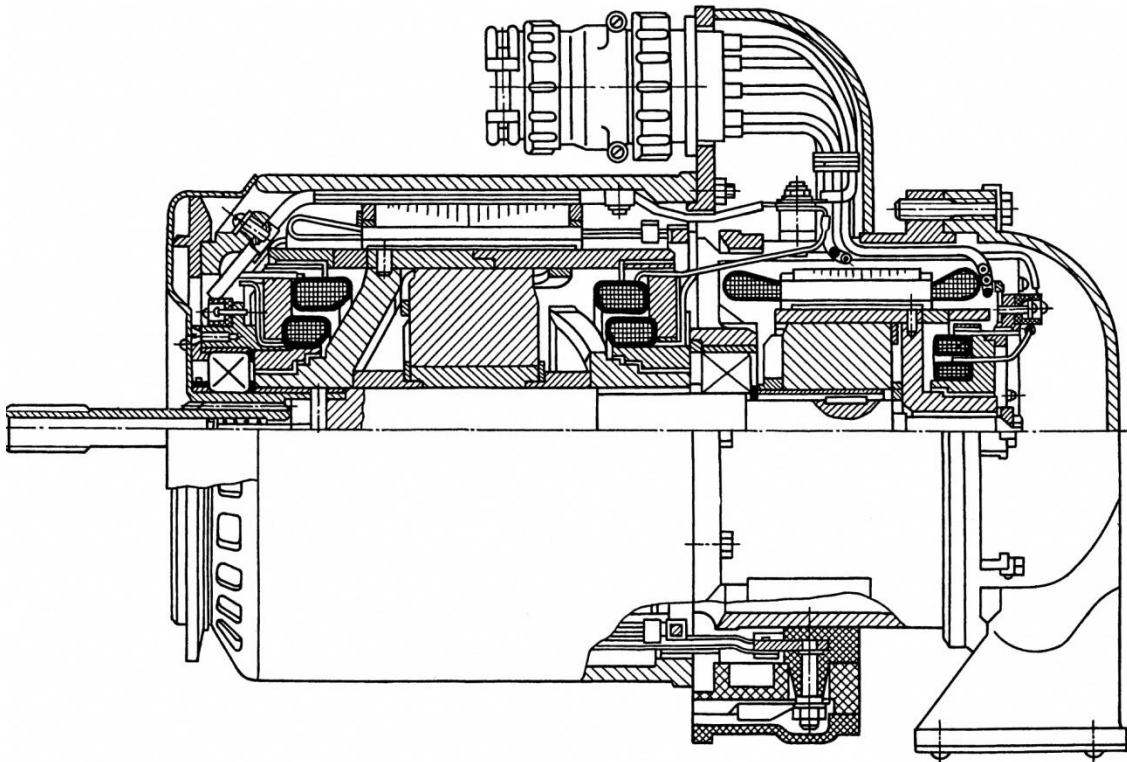


Рисунок 1.12 – Генератор с комбинированной системой возбуждения.

На рисунке 1.13 представлен внешний вид генератора с постоянными магнитами, который служит для питания потребителей переменным трехфазным током.

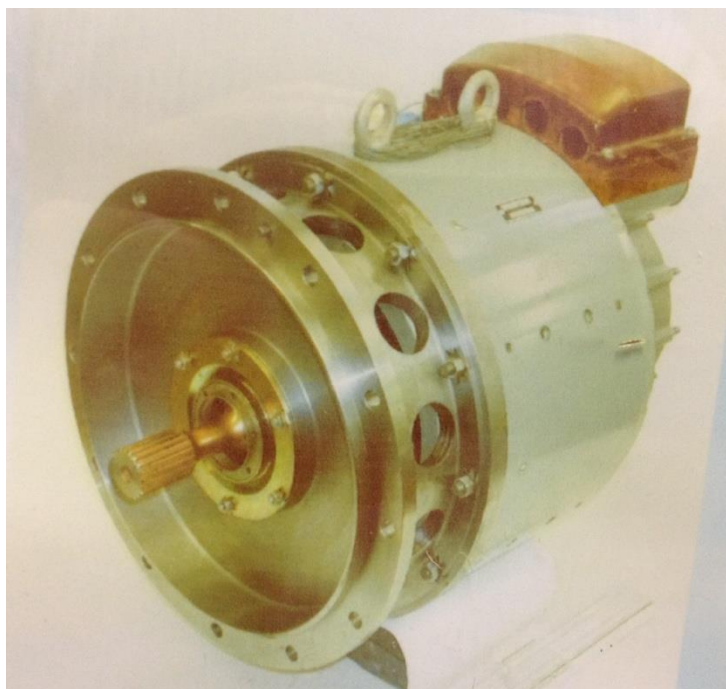


Рисунок 1.13 – Внешний вид генератора ГТ-90 разработки «АКБ «Якорь»

В системах генерирования повышенной частоты выше 2 кГц рационально использование индукторных генераторов.

В системах электроснабжения небольшой мощности до 30 кВА рационально применение генераторов с комбинированным возбуждением, представляющих собой объединение генератора с постоянными магнитами и одного из типов бесконтактных генераторов – индукторного или с внутривыключенным магнитопроводом.

В диссертации в качестве альтернативы синхронному генератору с электромагнитным возбуждением рассматривается генератор с постоянными магнитами. Наиболее эффективно применение генераторов с постоянными магнитами в системах генерирования постоянного тока повышенной мощности. Они имеют более высокую механическую прочность и могут выполняться с повышенным количеством полюсов.

Статоры – якоря генераторов с постоянными магнитами не отличаются от классических синхронных машин. Их отличия состоят в конструкции роторов-индукторов. Генераторы с постоянными магнитами повышенной мощности проектируются на высокие электромагнитные, механические и тепловые нагрузки. В диссертации предпочтение отдается роторам с радиальными магнитами, имеющими меньшую массу и повышенную прочность по сравнению с тангенциальными магнитами.

Особенности проектирования ротора-индуктора с постоянными магнитами обусловлены его конструкцией. При этом существенное значение имеет выбор конструкции бандажа. Конструкция бандажа существенно влияет на прочность ротора и на нагрев магнитов. После определения конструкции ротора рационально провести предварительный электромагнитный, тепловой и механический расчеты по традиционным методикам расчета синхронных машин, что позволяет определить все геометрические размеры статора и ротора. На основе предварительного расчета представляется возможным проведение уточненных расчетов с использованием конечно-элементного анализа.

Этапы уточненного механического и теплового расчета представляют собой уточнение и развитие методики проектирования генераторов с постоянными магнитами.

Проведенные предварительные расчеты показывают возможность проектирования генераторов с постоянными магнитами мощностью в несколько сотен и более кВА с удельной массой активных материалов на уровне 0.1—0.15 кг/кВА. С учетом конструктивного коэффициента порядка 1.75—2.0 и массы электронного преобразователя и фильтра подобные генераторы можно рассматривать как альтернативные генераторам с электромагнитным возбуждением.

### **Выводы по главе**

- Показаны преимущества и недостатки использования генераторов с электромагнитным возбуждением и с постоянными магнитами в системах генерирования повышенной мощности.
- Дана оценка повышения прочности генераторов с электромагнитным возбуждением при переходе от традиционной явнополюсной конструкции ротора к неявнополюсной.
- На основе анализа тенденций развития авиационных систем электропитания обоснована целесообразность использования генераторов с высокоэнергетическими постоянными магнитами в системах генерирования постоянного тока повышенной мощности на уровне сотен и более кВА как альтернатива генераторам с электромагнитным возбуждением.
- Сформулированы проблемы разработки генераторов повышенной мощности в несколько сот и более кВА.

## ГЛАВА 2. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВИАЦИОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ОТ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ.

### 2.1. Особенности проектирования генераторов с постоянными магнитами.

Отличие генераторов с возбуждением от постоянных магнитов от классических синхронных машин с электромагнитным возбуждением состоит в конструкции ротора. Этим конструктивным отличием обусловлены и особенности их расчетного проектирования. Это относится и к электромагнитному, и к механическому и к тепловому расчетам.

В настоящее время разработано большое количество различных конструктивных схем машин с возбуждением от постоянных магнитов. В диссертации рассматриваются две основные конструктивные схемы генераторов - схемы с радиальными и тангенциальными призматическими магнитами, представленными на рисунках 2.1-2.2.

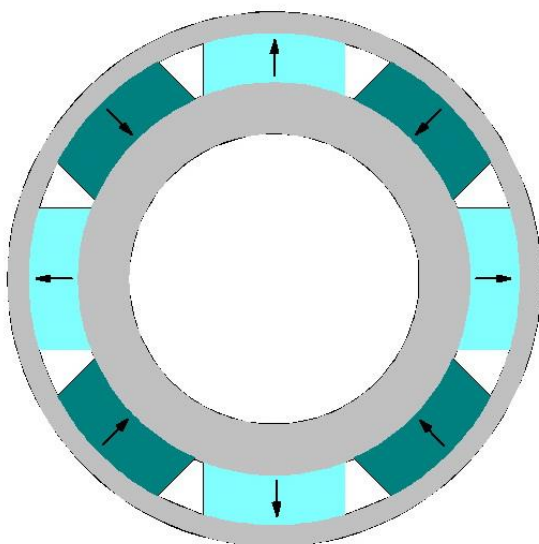


Рисунок 2.1 - Схема ротора с радиальными магнитами.

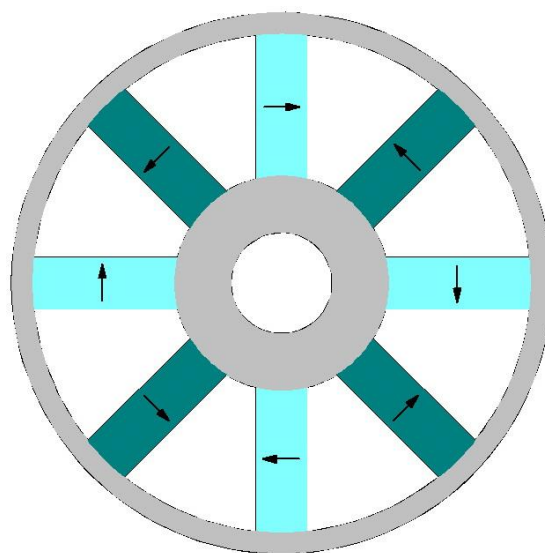


Рисунок 2.2 - Схема ротора с тангенциальными магнитами.

Эти конструктивные схемы также отличаются большим разнообразием способов крепления постоянных магнитов на роторе. Генераторы с радиаль-

ными и тангенциальными магнитами имеют свои преимущества и недостатки. 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 тяжёлые ротор и статор по сравнению с радиальными магнитами при одинаковой мощности [72, 73, 90].

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.

Проектирование генераторов включает электромагнитный, механический и тепловой расчеты [11, 13, 24, 46, 70, 92, 96]. Как и в классических синхронных машинах, основой проектирования является электромагнитный расчет, который, с учетом прочности и теплового состояния генератора, определяет основные геометрические размеры машины: диаметр расточки, осевую длину пакета якоря и величину рабочего или немагнитного зазора с учетом бандажа.

В настоящее время расчетное проектирование включает в себя предварительный расчет на основе методик, базирующихся на теории цепей и схемах замещения с последующим исследованием электромагнитных, механических и тепловых процессов численными методами, на основе теорий электродинамики, прочности и термодинамики, т.е. на уровне соответствующих полей [30, 38, 52, 58, 59]. Численные методы позволяют определять состояние машины в каждой точке, в каждый момент времени [91].

В период использования постоянных магнитов с невысоким уровнем удельной энергии в системах возбуждения электрических машин, объем магнитов на роторе превышал объем ферромагнитных полюсов с обмотками возбуждения. При этом, размеры ротора определяли размеры машины и методики электромагнитного расчета исходили из объема ротора, обеспечивающего размещение магнитов [29, 32]. С ростом удельной энергии магнитов

до уровня  $B_r = 1 \dots 1.4$  Тл и  $H_c = 1000$  А/см их объем стал сопоставим с объемом системы электромагнитного возбуждения. На рисунке 2.3 представлены характеристики высокоэнергетических магнитов на основе Sm-Co и Nd-Fe-B [101, 102].

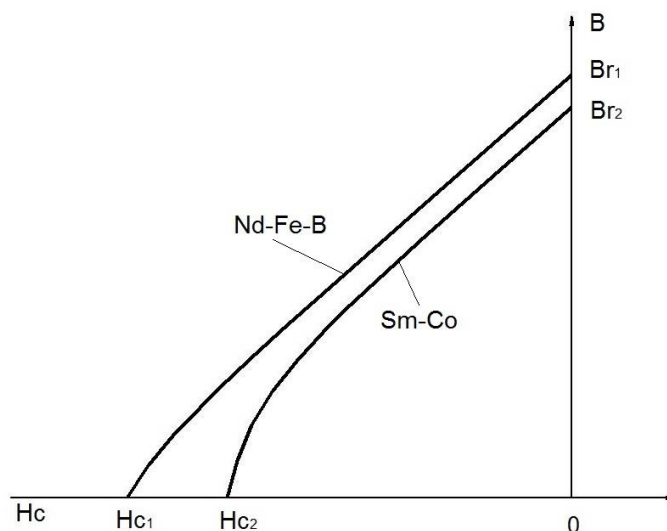


Рисунок 2.3 - Характеристики редкоземельных магнитов Sm-Co и Nd-Fe-B при температуре 100°C.

Использование высокоэнергетических редкоземельных постоянных магнитов с  $B_r = 1 \dots 1.4$  Тл и  $H_c = 10000$  А/см привело к тому, что объем постоянных магнитов в системе возбуждения синхронных генераторов стал в два и более раз меньше объема ферромагнитных полюсов с обмотками в системах электромагнитного возбуждения [37, 42]. При этом, расчет машины с постоянными магнитами проводится, как и в классических электрических машинах, без опасения трудности размещения магнитов на роторе. Исходным является расчет на основе допустимых электрических, магнитных (с учетом свойств магнитов) и тепловых нагрузок якоря, как и в машинах с электромагнитным возбуждением, а расчет ротора-индуктора по методикам, учитывающим свойства магнитов в электромагнитном расчете и прочности конструктивных элементов крепления магнитов при механическом расчете [3, 5, 35, 36].

При предварительном расчете генератора рационально использовать линеаризованные характеристики редкоземельных постоянных магнитов. Это

позволяет использовать аналитические методы расчета магнитного поля в активной зоне машины с постоянными магнитами. Аналитические зависимости геометрических размеров магнитов с их свойствами дают возможность включения их в методику предварительного расчета генератора. Характеристики  $B=f(H)$  редкоземельных магнитов за счет больших значений  $H_c$  ближе к линейным, чем у магнитов с более низкими значениями  $H_c$ . При этом значения  $B_r / H_c = \mu_m$  не сильно отличаются от  $\mu_0$ . Для получения аналитических зависимостей можно принять  $\mu_m = \mu_0$ . Подобное допущение принято в [34]. При этом используются два подхода к анализу магнитов с  $\mu = \mu_0$ . Один из них базируется на  $B_r$ , магнитных зарядах и скалярном магнитном потенциале, а второй – на поверхностных токах и векторном магнитном потенциале. При этом, аналитические выражения оказываются одинаково выраженными через намагниченность  $J$ . При использовании  $B_r$  и магнитных зарядов, когда намагниченность  $J = B_r / \mu_0$  полученные результаты более оправданы. При использовании поверхностных токов необходимо исходить не из  $H_c$ , а из  $H_c' = B_r / \mu_0$ , как это представлено на рисунке 2.4.

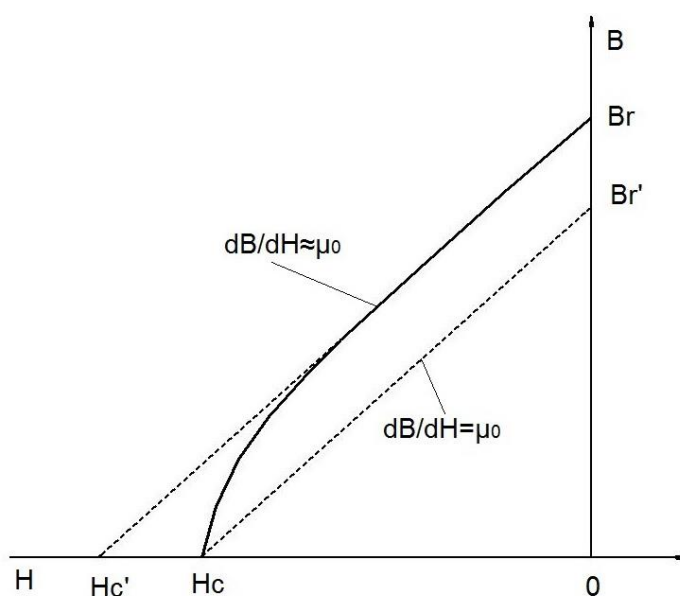


Рисунок 2.4 - Линейризованная характеристика редкоземельного магнита Sm-Co.

При численном расчете можно использовать как реальную зависимость  $B=f(H)$ , так и линейризованную зависимость, но с  $B_r$  и  $H_c'$ .

Особенность расчета электрических машин с постоянными магнитами



на этапе предварительного проектирования на уровне теории цепей состоит в том, что свойства постоянных магнитов представляются характеристиками  $B=f(H)$  по оси намагничивания магнитов. При предварительном расчете магнит в цепи машины должен быть представлен МДС  $F_m$  и магнитным потоком  $\Phi_m$ . Обоснованный выбор их значений является весьма существенным. Целесообразно при расчете представлять МДС машины  $F_c = H_c \cdot h_m$ , где  $h_m$  – высота магнита по оси намагничивания и нелинейное внутреннее магнитное сопротивление  $R_m(H)$ . В совокупности  $F_c$  и  $R_m(H)$  полно характеризуют постоянные магниты, как элементы магнитной цепи машины. Необходимо также учесть потоки рассеяния магнитов. На рисунках 2.5-2.6 представлены характеристики магнита и аккумулятора, их схемы замещения представлены на рисунках 2.7-2.8 [12, 93]. Характерным для обоих этих активных элементов магнитных и электрических цепей является то, что их зависимости  $\Phi=f(F)$  и  $U=f(I)$  не проходят через ноль.

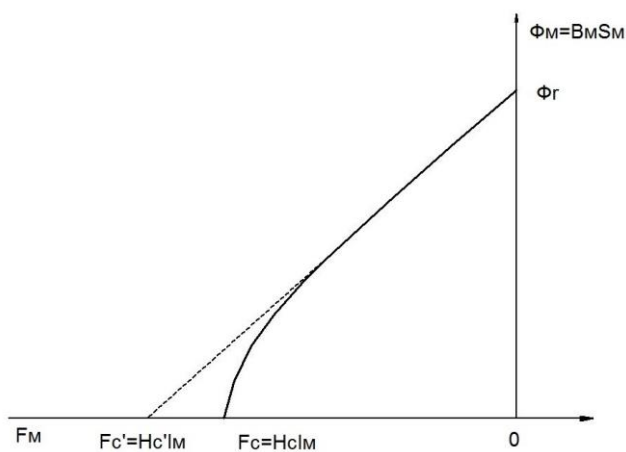


Рисунок 2.5 - Характеристика магнита как элемента магнитной цепи.

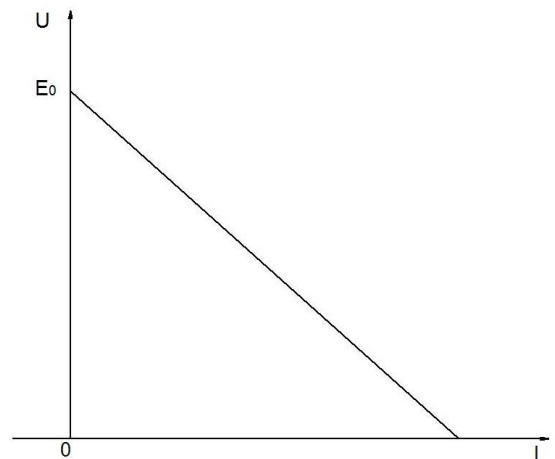


Рисунок 2.6 - Характеристика аккумулятора как элемента электрической цепи.

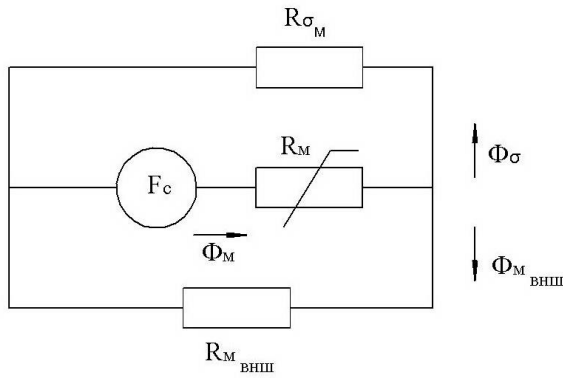


Рисунок 2.7 - Схема замещения постоянного магнита.

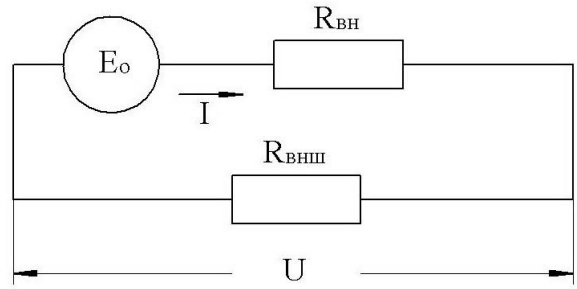


Рисунок 2.8 - Схема замещения аккумулятора.

На рисунках 2.9-2.10 представлена схема замещения генератора с постоянными магнитами на основе аналогии постоянного магнита, как активного элемента цепи – электрическим аккумулятором, являющимся активным элементом электрической цепи.

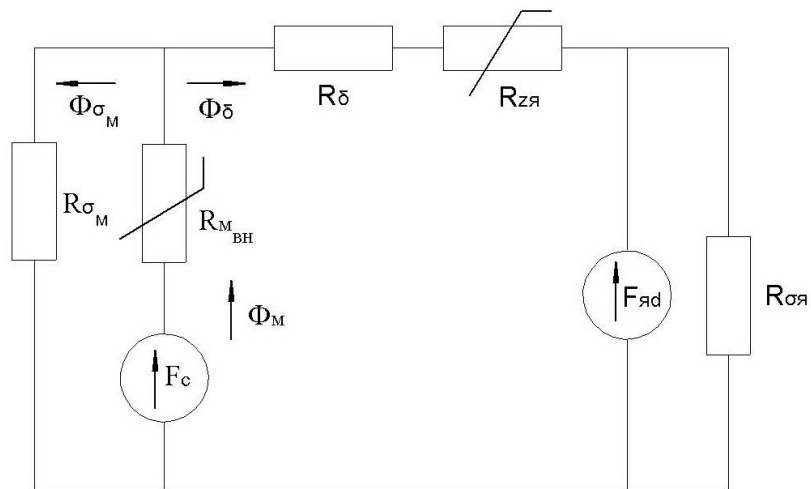


Рисунок 2.9 - Схема замещения генератора с постоянными магнитами.

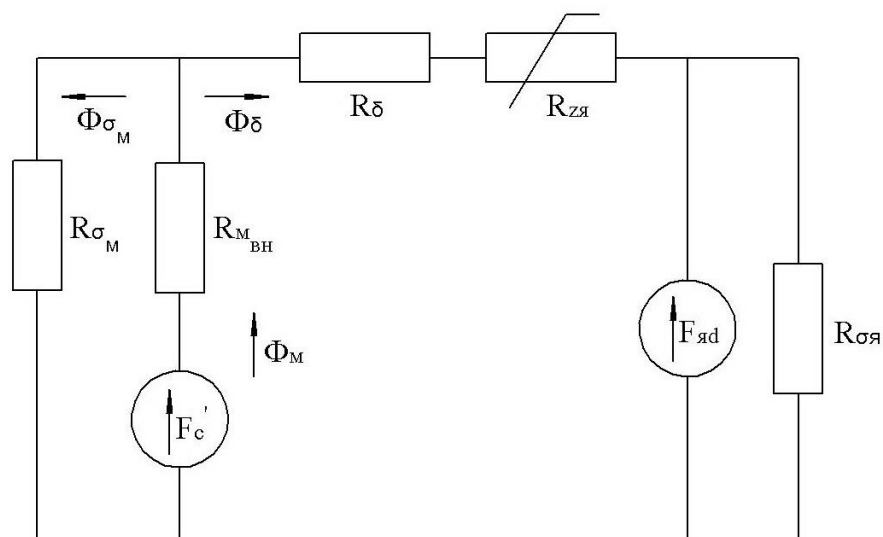


Рисунок 2.10 - Схема замещения генератора с линейным постоянным магнитом.

На уровне цепей редкоземельные магниты можно характеризовать как линейный элемент магнитной цепи, заменив реальную зависимость  $B=f(H)$  линейной с магнитной проницаемостью  $\mu_0$  и коэрцитивной силой  $H_c'$ .

На рисунке 2.11 представлена блок - схема расчета генератора с постоянными магнитами с уточнениями, полученными в настоящей диссертации при расчете магнитного притяжения с учетом анализа размерной цепи, потерь в бандажах ротора и критической частоты машины.

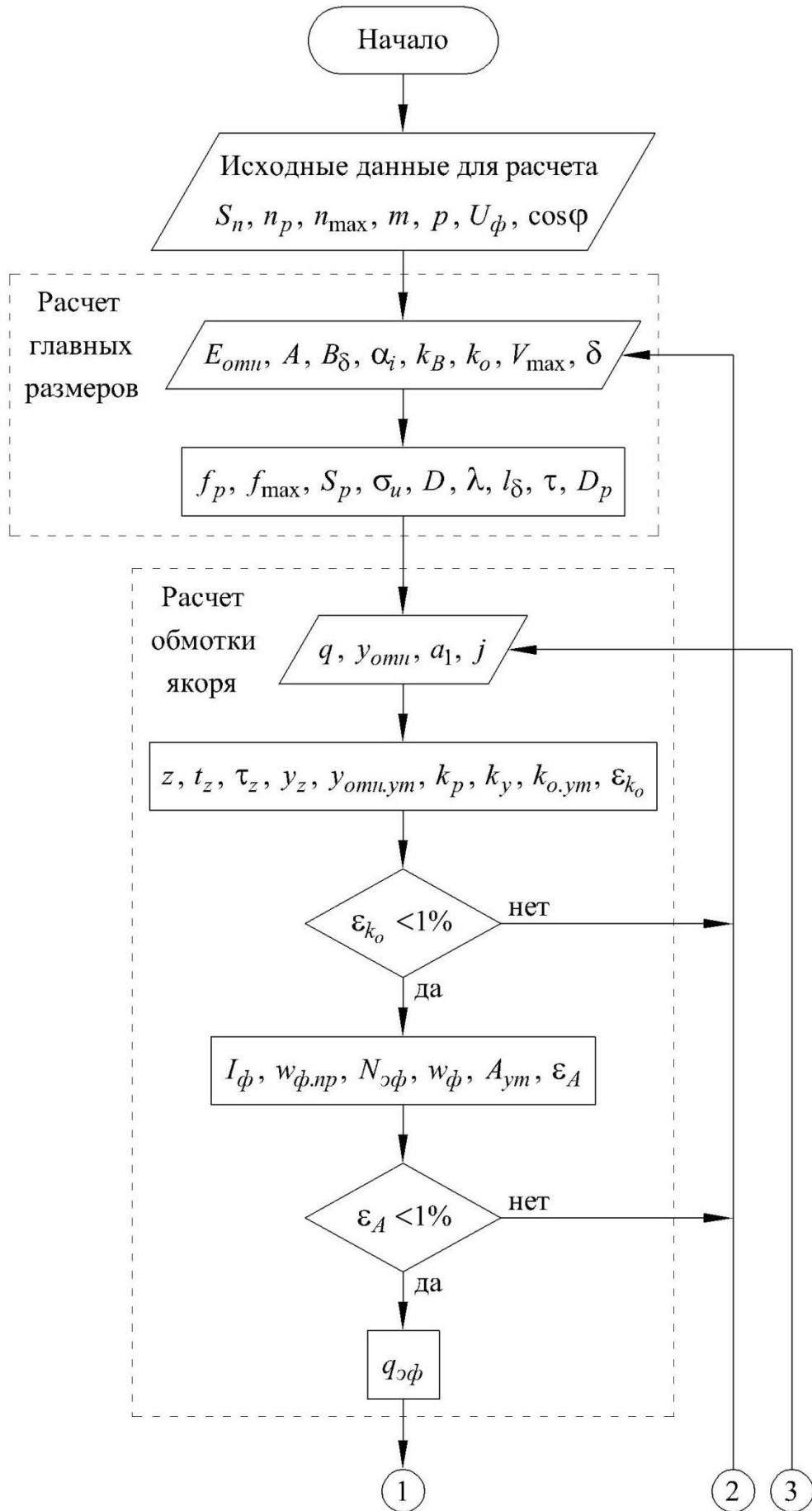


Рисунок 2.11 - Блок-схема расчета генератора с постоянными магнитами.

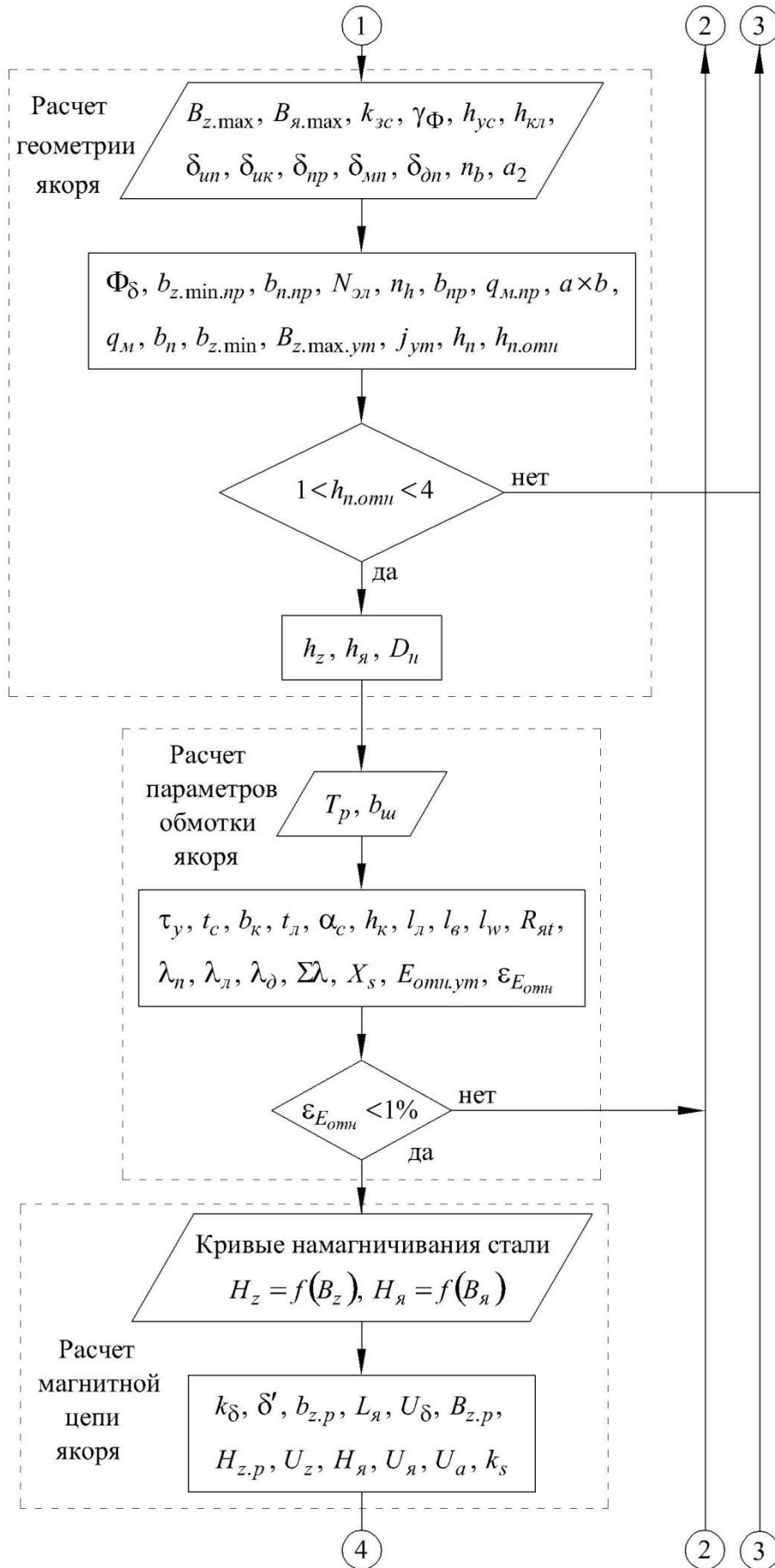


Рисунок 2.11 - Блок-схема расчета генератора с постоянными магнитами.



Рисунок 2.11 - Блок-схема расчета генератора с постоянными магнитами.

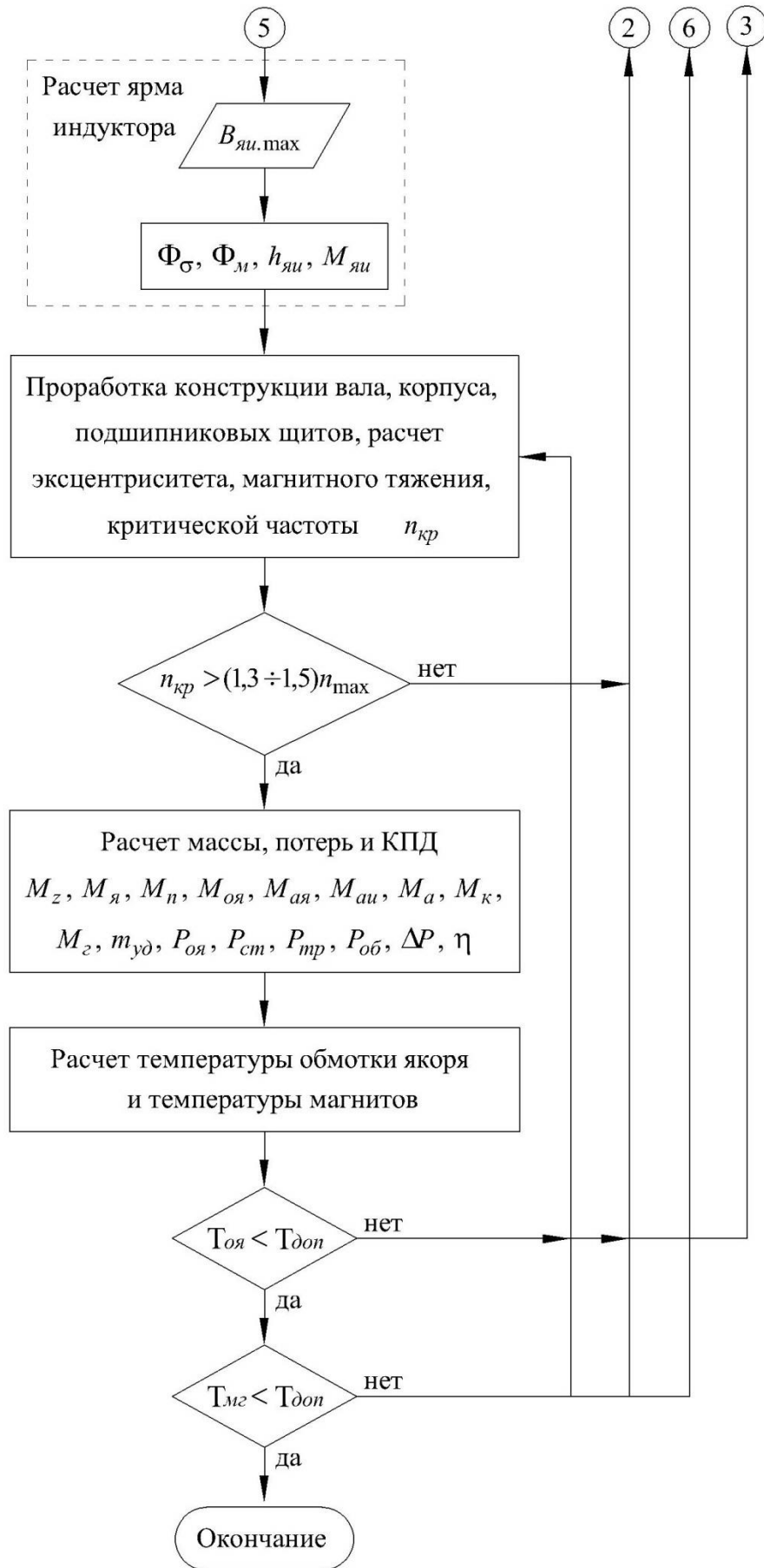


Рисунок 2.11 - Блок-схема расчета генератора с постоянными магнитами.

По этой схеме проведен предварительный электромагнитный расчет авиационного генератора с постоянными магнитами мощностью 500 кВА, представленный в приложении.

Как и в классических синхронных машинах соотношение ЭДС и напряжений в генераторе характеризуется векторной диаграммой [86, 99]. Особенностью векторной диаграммы генератора с редкоземельными магнитами является практическое равенство  $X_{ad}$  и  $X_{aq}$ , при допущении о том, что магнитная проницаемость магнита по осям  $d$  и  $q$  равна  $\mu_0$  и в несколько раз меньше их значения в классических синхронных машинах. ЭДС  $E_0$ , определяемая векторной диаграммой, обеспечивается МДС обмотки возбуждения, а в генераторах с постоянными магнитами обеспечивается МДС магнитов. Расчет  $X_{ad}$ ,  $X_{aq}$ , ЭДС магнитов  $E_0$  на предварительном этапе расчета можно определять на основе выражений для индукции в рабочем зазоре [103].

В работе [34] методом гармонического анализа с использованием скалярного магнитного потенциала получено решение для активной зоны с радиальными редкоземельными постоянными магнитами, согласно которому составляющие индукции магнитного поля редкоземельных постоянных магнитов (холостой ход) определяются выражениями:

- в области постоянных магнитов (область I)

$$B_{Ix}(x, y) = -\mu_0 \sum_{n=1,3,\dots}^{N \rightarrow \infty} \left[ J_n \frac{\sinh\left(\frac{n\pi}{\tau} \delta\right)}{\sinh\left(\frac{n\pi}{\tau} (h_m + \delta)\right)} \sinh\left(\frac{n\pi}{\tau} y\right) \cos\left(\frac{n\pi}{\tau} x\right) \right] \quad (2.1)$$

$$B_{Iy}(x, y) = \mu_0 \sum_{n=1,3,\dots}^{N \rightarrow \infty} \left[ J_n \left( 1 - \frac{\sinh\left(\frac{n\pi}{\tau} \delta\right)}{\sinh\left(\frac{n\pi}{\tau} (h_m + \delta)\right)} \cosh\left(\frac{n\pi}{\tau} y\right) \right) \sin\left(\frac{n\pi}{\tau} x\right) \right] \quad (2.2)$$

- в области рабочего зазора (область II)



$$B_{IIx}(x, y) = \mu_0 \sum_{n=1,3,\dots}^{N \rightarrow \infty} \left[ J_n \frac{\sinh\left(\frac{n\pi}{\tau} h_m\right)}{\sinh\left(\frac{n\pi}{\tau} (h_m + \delta)\right)} \sinh\left(\frac{n\pi}{\tau} (y - (h_m + \delta))\right) \cos\left(\frac{n\pi}{\tau} x\right) \right] \quad (2.3)$$

$$B_{IIy}(x, y) = \mu_0 \sum_{n=1,3,\dots}^{N \rightarrow \infty} \left[ J_n \frac{\sinh\left(\frac{n\pi}{\tau} h_m\right)}{\sinh\left(\frac{n\pi}{\tau} (h_m + \delta)\right)} \cosh\left(\frac{n\pi}{\tau} (y - (h_m + \delta))\right) \sin\left(\frac{n\pi}{\tau} x\right) \right] \quad (2.4)$$

Здесь  $h_m$  - высота магнита;  $\delta$  - величина приведенного рабочего зазора;  $\tau$  - полюсное деление;  $J_n = \frac{4J}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi}{2} \alpha\right) \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right)$  ( $J = \frac{B_r}{\mu_0}$  - намагниченность магнита ( $B_r$  - остаточная индукция);  $\alpha = b_m/\tau$  - конструктивный коэффициент полюсного перекрытия ( $b_m$  - ширина магнита)).

При отсутствии тока в обмотке якоря (режим холостого хода) магнитное поле в активной зоне синхронных машин принято характеризовать системой расчетных коэффициентов [21, 44], включающих в себя:

- коэффициент формы поля возбуждения  $k_f$  (отношение амплитуды основной гармонической индукции в зазоре к максимальному значению индукции под центром полюса):

$$k_f = \frac{B_{\delta 1, \max}}{B_{\delta}} = \frac{B_{IIy}(x, y) \Big|_{y=h_m+\delta}^{x=\tau/2}}{B_{IIy}(x, y) \Big|_{y=h_m+\delta}^{x=\tau/2}} \quad (2.5)$$

- коэффициент потока возбуждения  $k_{\Phi}$  (отношение полного потока через рабочий зазор к потоку от основной гармонической индукции в зазоре):

$$k_{\Phi} = \frac{\Phi_{\delta}}{\Phi_{\delta 1}} = \frac{\int_0^{\tau} B_{IIy}(x, y) \Big|_{y=h_m+\delta} dx}{\int_0^{\tau} B_{IIy}(x, y) \Big|_{y=h_m+\delta} dx} \quad (2.6)$$

- расчетный коэффициент полюсного перекрытия  $\alpha_i$  (отношение среднего значения индукции в зазоре к максимальному значению индукции под

центром полюса):

$$\alpha_i = \frac{B_{\delta.cp}}{B_{\delta}} = \frac{\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} B_{Hy}(x, y) \Big|_{y=h_m+\delta} dx}{B_{Hy}(x, y) \Big|_{x=\tau/2} \Big|_{y=h_m+\delta}} = \frac{2}{\pi} k_f k_{\Phi} \quad (2.7)$$

- коэффициент формы ЭДС  $k_B$  (отношение действующего значения основной гармонической индукции в зазоре к среднему значению индукции):

$$k_B = \frac{B_{\delta1.\delta}}{B_{\delta.cp}} = \frac{\frac{1}{\sqrt{2}} B_{Hy}(x, y) \Big|_{x=\tau/2} \Big|_{y=h_m+\delta}}{\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} B_{Hy}(x, y) \Big|_{y=h_m+\delta} dx} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}k_{\Phi}} \quad (2.8)$$

В работе [104] традиционная система расчетных коэффициентов, характеризующих поле возбуждения, дополнена коэффициентом индукции в зазоре  $k_{B_{\delta}}$ , связывающим максимальное значение индукции под центром полюса в режиме холостого хода  $B_{\delta.xx}$  с остаточной индукцией магнита  $B_r$ :

$$k_{B_{\delta}} = \frac{B_{\delta.xx}}{B_r} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1,3,\dots}^{N \rightarrow \infty} \left[ \frac{1}{n} \frac{\sinh\left(\frac{n\pi}{\tau} h_m\right)}{\sinh\left(\frac{n\pi}{\tau} (h_m + \delta)\right)} \sin\left(\frac{n\pi}{2} \alpha\right) \right] \quad (2.9)$$

Составляющие магнитной индукции поля реакции якоря для синхронной машины с радиальными редкоземельными магнитами и немагнитной обоймой согласно работе [34] определяются следующими выражениями:

$$B_x(x, y) = \mu_0 F_{оя} \frac{\pi}{\tau} \frac{\sinh\left(\frac{\pi}{\tau} y\right)}{\sinh\left(\frac{\pi}{\tau} (h_m + \delta)\right)} \sin\left(\frac{\pi}{\tau} x\right) \quad (2.10)$$

$$B_y(x, y) = -\mu_0 F_{оя} \frac{\pi}{\tau} \frac{ch\left(\frac{\pi}{\tau} y\right)}{sh\left(\frac{\pi}{\tau} (h_m + \delta)\right)} \cos\left(\frac{\pi}{\tau} x\right) \quad (2.11)$$

На основании этих выражений главные индуктивные сопротивления реакции якоря по продольной и поперечной осям

$$X_{ad} = X_{aq} = \frac{4m\mu_0}{p} l_{\delta} (w_{\phi} k_o)^2 f \coth\left(\frac{\pi}{\tau} (h_M + \delta)\right) \quad (2.12)$$

И расчетные коэффициенты поля реакции якоря

$$k_{ad} = k_{aq} = \frac{\pi}{\tau} \delta \coth\left(\frac{\pi}{\tau} (h_M + \delta)\right) \quad (2.13)$$

## **2.2. Конструктивные схемы роторов с редкоземельными магнитами.**

Для крепления магнитов на роторе используются различные конструктивные схемы. 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 [31]. Для снижения потерь в бандажах и нагрева редкоземельных магнитов, допустимые рабочие температуры которых находятся в пределах двухсот градусов, бандажи рационально выполнять шихтованными. Выполнение экспериментального бандажа генератора ГТ-90 в АКБ «Якорь» из массивного ферромагнитного материала привело при испытании к появлению цветов побежалости на роторе. Выполнение канавок в бандаже не позволило значительно снизить его нагрев. Однако, в индукторных генераторах с классической активной зоной с массивным ферромагнитным ротором использование канавок весьма эффективно.

### 2.2.1. Конструктивная схема ротора с немагнитной цилиндрической обоймой.

В рассматриваемой конструкции немагнитная обойма представляет собой сплошной цилиндр с боковыми фланцами, в который на клей устанавливаются постоянные магниты. Затем обойма, с установленными магнитами, напрессовывается на вал, являющийся в данной конструкции ярмом (рисунок 2.12). При высоких скоростях вращения ротора торцевые части обоймы разгружают ее тонкостенную часть, охватывающую цилиндрическую часть постоянных магнитов, позволяя оптимально использовать прочностные характеристики обоймы.

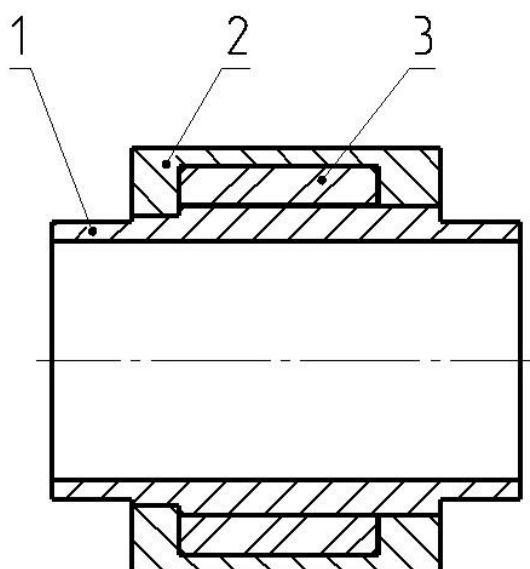


Рисунок 2.12 - Эскиз магнитной системы ротора с немагнитной массивной обоймой: 1 - вал (ярмо), 2 - немагнитная обойма, 3 - постоянный магнит.

Одной из разновидностей немагнитной цилиндрической обоймы является шихтованная обойма (рисунок 2.13).

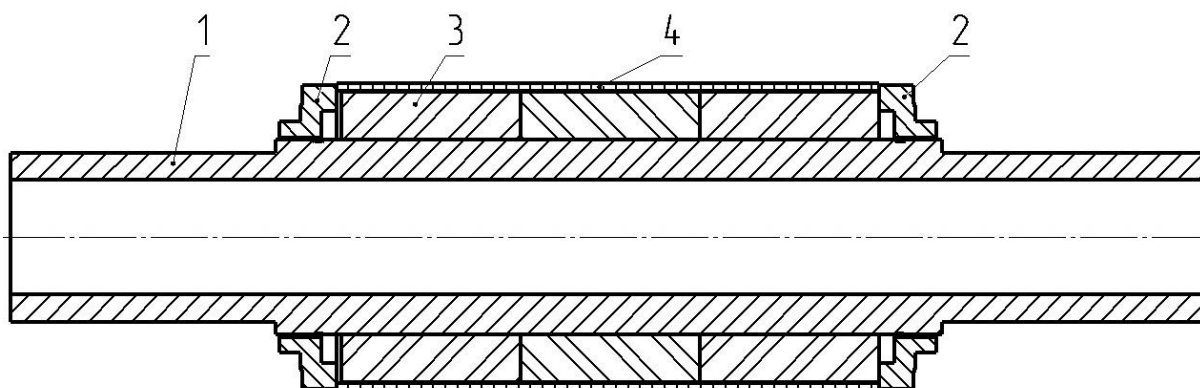


Рисунок 2.13 - Эскиз магнитной системы ротора с немагнитной шихтованной обоймой: 1- вал (ядро), 2- гайка, 3 – постоянный магнит, 4 – немагнитный кольцевая пластина.

В данной конструкции немагнитная обойма представляет собой набор отдельных немагнитных кольцевых пластин, которые стягиваются на валу в осевом направлении гайками.

В роторах с немагнитной цилиндрической обоймой используются, как правило, постоянные магниты радиальной намагниченности. К достоинствам рассматриваемых схем роторов относятся:

- простота конструкции,
- технологичность,
- малая масса,
- большие допустимые механические нагрузки.

К недостаткам можно отнести:

- увеличенный немагнитный зазор между магнитом и ферромагнитной поверхностью статора,
- повышенное по сравнению с другими типами обойм увеличение наружного диаметра ротора при нагружении центробежными силами.

### 2.2.2. Конструктивная схема ротора со слоистой магнитно-немагнитной обоймой.

На рисунке 2.14 представлен эскиз магнитной системы ротора радиальной намагниченности со слоистой магнитно-немагнитной обоймой [78]. В такой обойме магнитные участки в осевом направлении чередуются с немагнитными. Магнитные участки образованы зубцами полюсных наконечников, расположенных над постоянными магнитами и стальными листами, расположенными под постоянными магнитами. В пазах полюсных наконечников проходят титановые листы, являющиеся силовыми элементами, удерживающими на роторе постоянные магниты и полюсные наконечники.

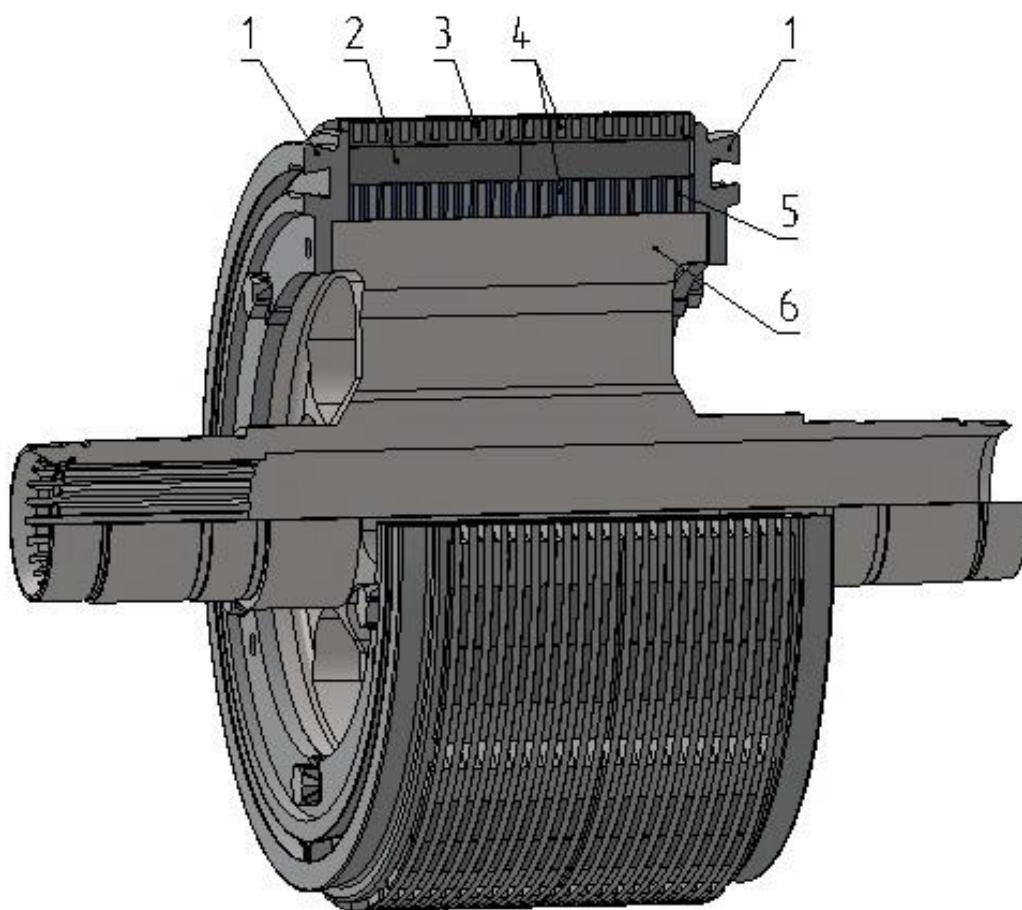


Рисунок 2.14 - Эскиз магнитной системы ротора радиальной намагниченности со слоистой магнитно-немагнитной обоймой: 1 – фланец, 2 – постоянный магнит, 3 – полюсный наконечник, 4 – немагнитная кольцевая пластина (силовой элемент), 5 – ярмо, 6 – вал.

Магнитные и немагнитные участки фиксируются на валу от осевого перемещения с помощью фланцев.

На рисунке 2.15 представлен эскиз магнитной системы ротора тангенциальной намагниченности со слоистой магнитно-немагнитной обоймой [79]. Отличие рассматриваемой конструкции от предыдущей состоит в том, что полюсные наконечники располагаются между магнитами и удерживаются винтами, проходящими через отверстия в титановых листах. Титановые листы удерживают винты и установленные в них постоянные магниты.

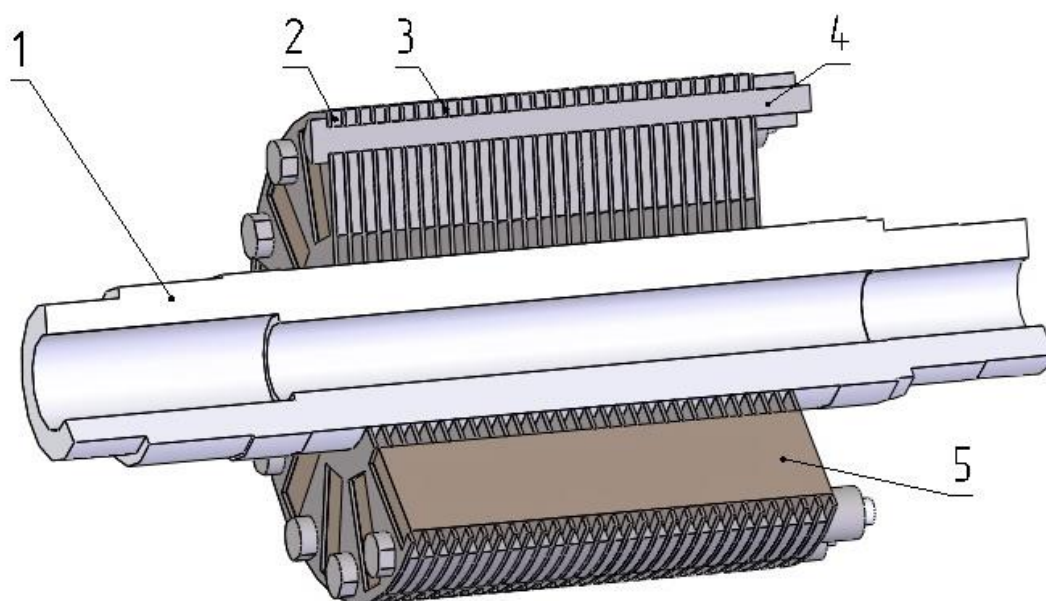


Рисунок 2.15 - Эскиз магнитной системы ротора тангенциальной намагниченности со слоистой магнитно-немагнитной обоймой: 1 – вал, 2 – полюсный наконечник, 3 - немагнитная кольцевая пластина (силовой элемент), 4 – винт, 5 – постоянный магнит.

Отношение толщины силового элемента к толщине магнитного полюса определяет прочность ротора.

Достоинство рассматриваемых роторов:

- меньше немагнитный зазор по сравнению с ротором, имеющим немагнитную цилиндрическую обойму,
- лучшее использование объема ротора.

Недостатки рассматриваемых роторов:



- неравномерность распределения магнитного поля в осевом направлении ротора,
- сложность конструкции,
- сложная технология сборки,
- большая масса.

### 2.2.3. Конструктивная схема ротора с биметаллической обоймой.

В рассматриваемой конструкции обойма выполнена в виде равнопрочного сплава 2-х металлов, полученного методом намораживания, образуя чередование магнитных и немагнитных зон в тангенциальном направлении. Одним из свариваемых металлов является магнитомягкая сталь, которая выполняет роль полюсного наконечника, другим – медно-никелевый сплав, который образует немагнитные зоны между полюсными наконечниками. На рисунке 2.16 представлен эскиз магнитной системы ротора радиальной намагниченности с биметаллической обоймой.

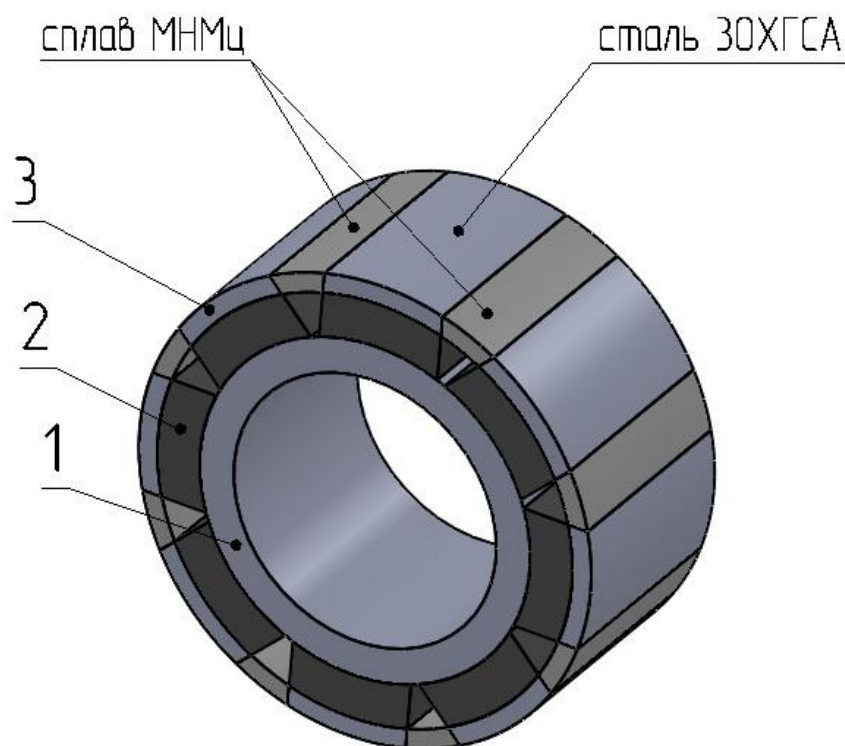


Рисунок 2.16 - Эскиз магнитной системы ротора радиальной намагниченности с биметаллической обоймой: 1 – вал (ярмо), 2 – постоянный магнит, 3 – биметаллическая обойма.

В такой конструкции магнитная зона располагается над магнитом. На рисунке 2.17 представлен эскиз магнитной системы ротора тангенциальной намагниченности с биметаллической обоймой. Отличием от предыдущей схемы является наличие полюсного наконечника.

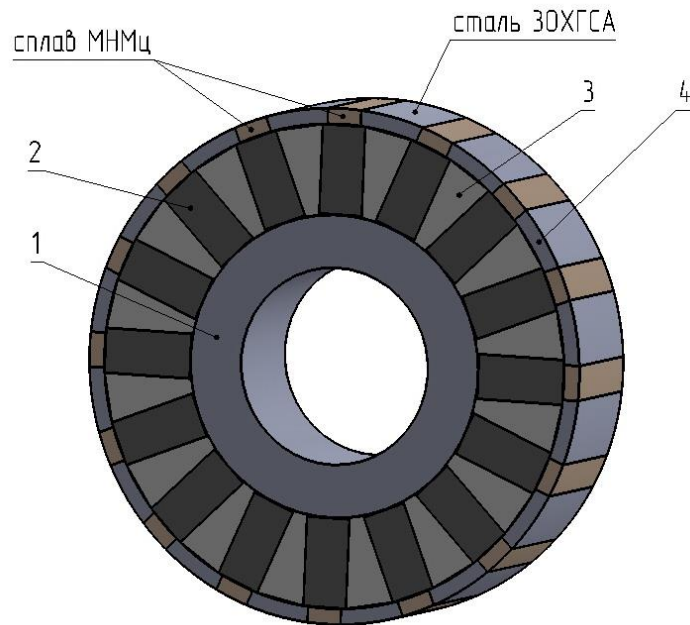


Рисунок 2.17 - Эскиз магнитной системы ротора тангенциальной намагниченности с биметаллической обоймой: 1 – вал (ядро), 2 - постоянный магнит, 3 – полюсный наконечник, 4 – биметаллическая обойма.

Достоинством рассматриваемых конструктивных схем является:

- простота конструкции,
- немагнитный зазор равен рабочему зазору.

Недостаток рассматриваемой схемы:

- большая масса,
- сложная технология сварки немагнитного и ферромагнитного металлов.

#### 2.2.4. Конструктивная схема ротора с обоймой из градиентного материала.

В рассматриваемой конструкции обойма представляет собой набор идентичных кольцевых пластин, стянутых в осевом направлении. Пластины изготовлены из специального магнитного материала, в котором после специальной термической обработки образуют немагнитные зоны необходимой геометрии. Обойма из градиентного материала в электромагнитном отношении является одним из вариантов биметаллической обоймы. На рисунке 2.18 представлен эскиз магнитной системы ротора радиальной намагниченности с обоймой из градиентного материала [77].

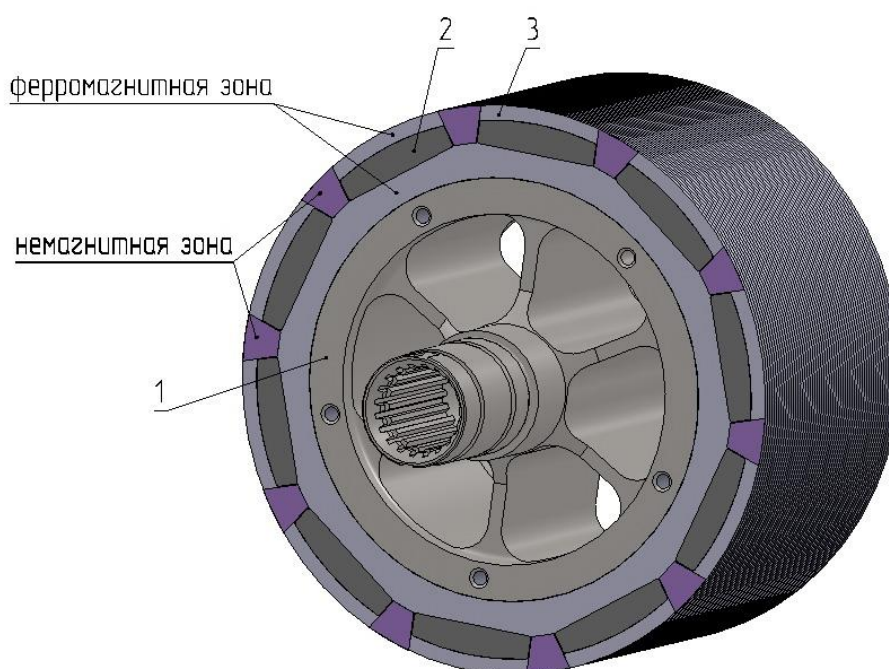


Рисунок 2.18 - Эскиз магнитной системы ротора радиальной намагниченности с градиентным материалом: 1- вал, 2 – постоянный магнит, 3 – обойма.

В обойме такого ротора немагнитные зоны выполнены между магнитами. На рисунке 2.19 представлен эскиз магнитной системы ротора тангенциальной намагниченности [77].

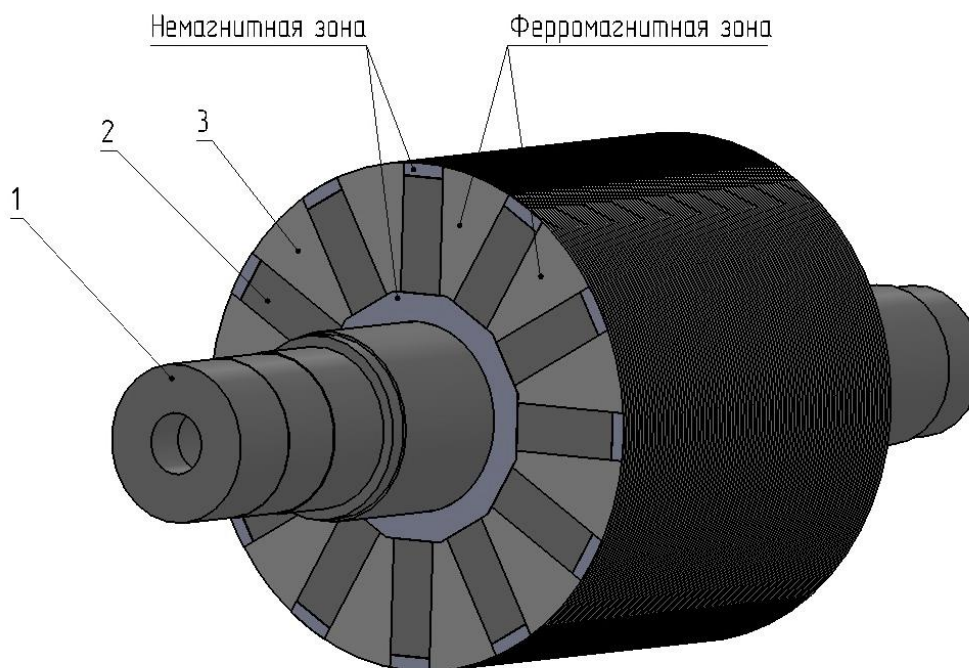


Рисунок 2.19 - Эскиз магнитной системы ротора тангенциальной намагниченности с градиентным материалом: 1- вал, 2 – постоянный магнит, 3 – обойма.

Достоинством рассматриваемых конструктивных схем является:

- немагнитный зазор равен рабочему,
- лучшее использование объема ротора.

Недостаток рассматриваемых конструктивных схем:

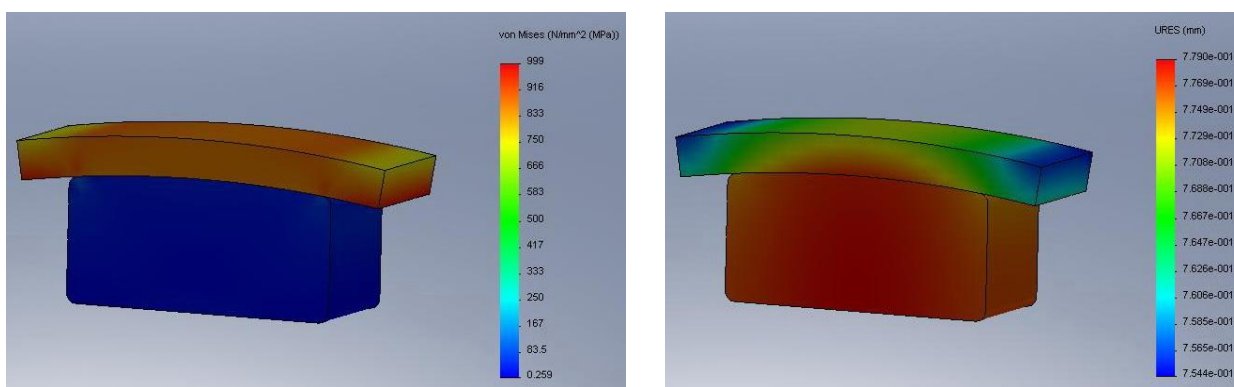
- большая масса,
- меньше допустимые механические нагрузки,
- трудоемкость изготовления,
- высокая стоимость.

### **2.3. Механический и электромагнитный анализ удерживающих обойм роторов с постоянными магнитами.**

Одной из особенностей электрических машин с постоянными магнитами является наличие на роторе обоймы, удерживающей постоянные магниты [19, 56, 57]. На примере ротора радиальной намагниченности проводится исследование удерживающих обойм широко используемых магнитных систем по допустимым значениям механических напряжений и перемещений. При анализе используется следующий алгоритм: при неизменном наружном диаметре ротора, размерах магнита и постоянной частоте вращения подбирается минимально необходимая толщина удерживающей обоймы, каждой рассматриваемой магнитной системы, для обеспечения требуемого запаса прочности.

При проведении анализа используются стандартные программы конечно-элементного исследования. Для сокращения времени прочностного расчета будем моделировать часть ротора путем использования граничного условия циклической симметрии [2]. Полагаем, что при работе на обойму ротора действуют собственные центробежные силы, центробежные силы постоянных магнитов и центробежные силы полюсных наконечников, для роторов со слоистой магнитно-немагнитной обоймой. Поэтому ко всем элементам конечно-элементной модели была приложена центробежная нагрузка, а на поверхностях между деталями ротора установлено контактное взаимодействие.

На рисунке 2.20 представлены результаты прочностного расчета ротора с немагнитной цилиндрической обоймой. В рассматриваемой конструктивной схеме обойма представляет собой тонкостенный цилиндр, воспринимающий все нагрузки, возникающие при вращении ротора и выполненный из немагнитного материала, для исключения возможности замыкания магнитного потока ротора через обойму. В связи с этим ее целесообразно выполнять из титанового сплава марки ВТ-14, имеющим большой предел текучести и малую магнитную проводимость. При вращении ротора обойма воспринимает максимальные эквивалентные изгибные напряжения на участке между магнитами, а максимум ее перемещений располагается по оси магнита.

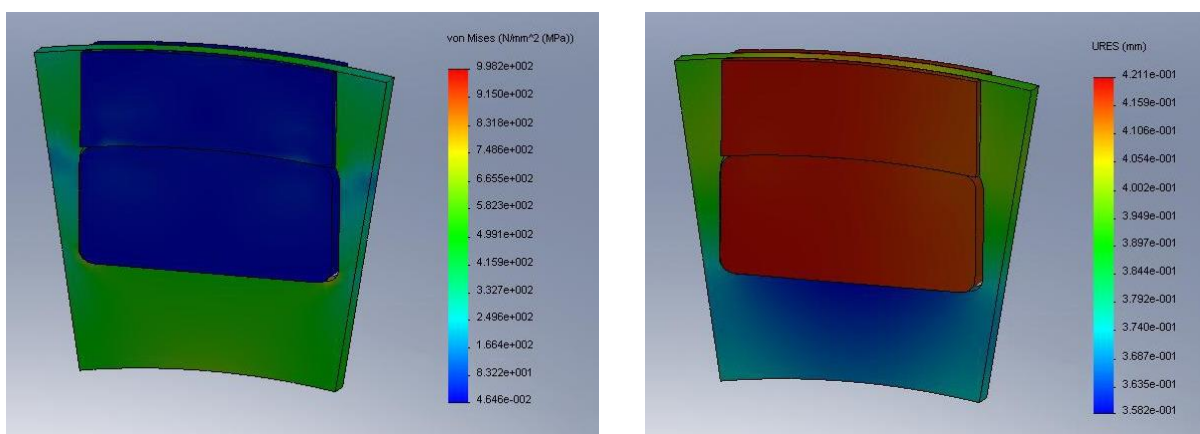


а) эквивалентные механические напряжения, Па.

б) перемещения в радиальном направлении, мм.

Рисунок 2.20 - Результаты численного прочностного расчета немагнитной цилиндрической обоймы.

На рисунке 2.21 представлены результаты прочностного расчета ротора со слоистой магнитно-немагнитной обоймой. В рассматриваемой конструктивной схеме удерживающая обойма выполнена в виде двух концентрических колец соединенных между собой перемычками, образуя, таким образом, окна для установки постоянных магнитов с полюсными наконечниками, которые располагаются над магнитами. Такая форма позволяет воспринимать большие нагрузки за счет использования в работе сечения внутреннего кольца и используется преимущественно в роторах со слоистой магнитно-немагнитной структурой обоймы. Как и в предыдущей конструкции, для исключения возможности шунтирования магнитов и обеспечения требуемого запаса прочности, обойма выполнена из титанового сплава ВТ-14. В этом случае на обойму, кроме центробежных сил от магнита и самой обоймы, еще действует центробежная сила от полюсного наконечника. При этом максимум механических напряжений обоймы наблюдается в месте соединения перемычек с кольцами и представляет собой концентратор напряжений, максимум перемещения обоймы располагается по оси магнитного полюса, но величина перемещения обоймы меньше перемещения полюсного наконечника.



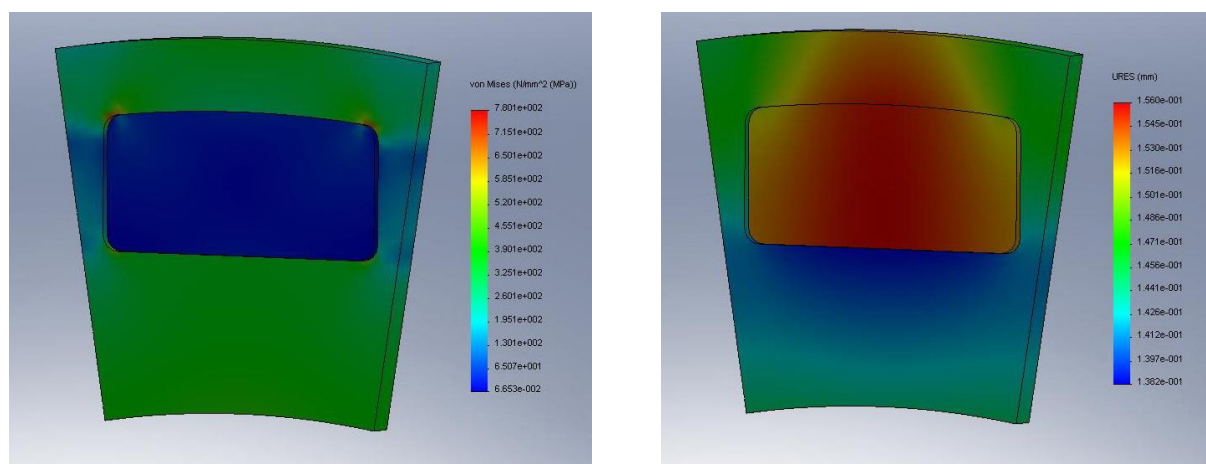
а) эквивалентные механические напряжения, Па.

б) перемещения в радиальном направлении, мм.

Рисунок 2.21 - Результаты численного прочностного расчета обоймы со слоистой магнитно-немагнитной структурой.

На рисунке 2.22 представлены результаты прочностного расчета ротора с обоймой из градиентного материала. Форма рассматриваемой обоймы повторяет форму обоймы предыдущей конструктивной схемы с тем отличием, что геометрия окна под магнит полностью совпадает с геометрией магнита, так как в этой схеме нет необходимости установки над магнитом полюсного наконечника. В связи с этим на обойму действуют только центробежные силы от магнита и от самой обоймы, поэтому обойма может быть выполнена из градиентного материала, представляющим собой магнитную сталь, обеспечивая необходимый запас прочности за счет использования в работе сечения внутреннего кольца. Как и в предыдущей схеме максимум механических напряжений обоймы наблюдается в месте соединения перемычек с кольцами и представляет собой концентратор напряжений, максимум перемещения обоймы располагается по оси магнита.





а) эквивалентные механические напряжения, Па.

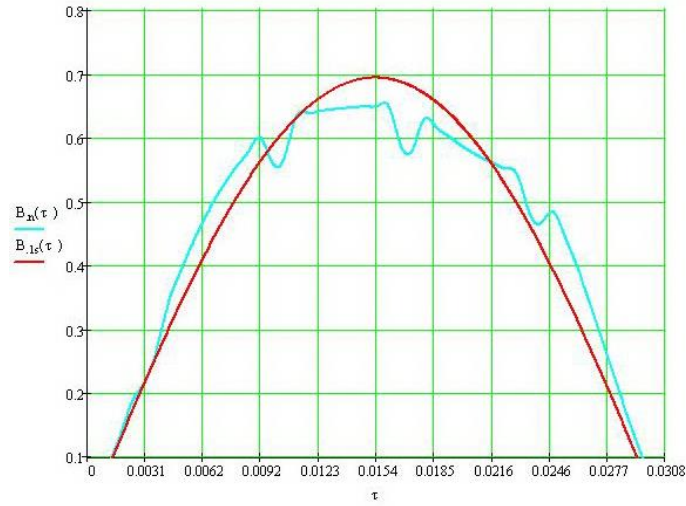
б) перемещения в радиальном направлении, мм.

Рисунок 2.22 - Результаты численного прочностного расчета обоймы из градиентного материала.

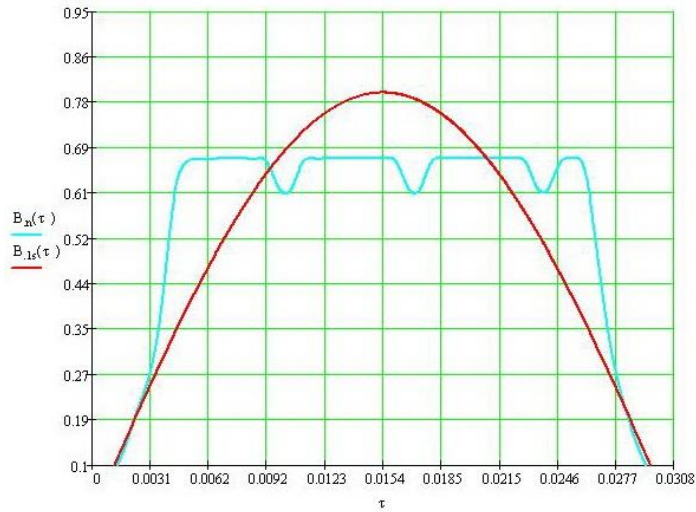
Величина и характер удерживающей обоймы ротора оказывают существенное влияние на электромагнитные характеристики электрической машины. Обойма может удовлетворять всем требованиям по прочности, но при этом уменьшать магнитный поток в рабочем зазоре и, как следствие, мощность машины, так как представляет собой дополнительный немагнитный (паразитный) зазор. Поэтому исследование прочности удерживающих обойм роторов и выбор наиболее оптимальной целесообразно проводить в сочетании с электромагнитным анализом.

Для электромагнитного исследования обойм роторов использовался конечно-элементный анализ, позволяющий учитывать нелинейности В-Н характеристик электротехнических сталей. При этом В-Н характеристики постоянных магнитов приняты линейными. В качестве геометрии активной зоны использовались размеры магнитных систем, полученные после выполнения прочностного расчета. Исследование заключалось в определении удельного магнитного потока в воздушном зазоре, который был вычислен путем численного интегрирования нормальной составляющей индукции.

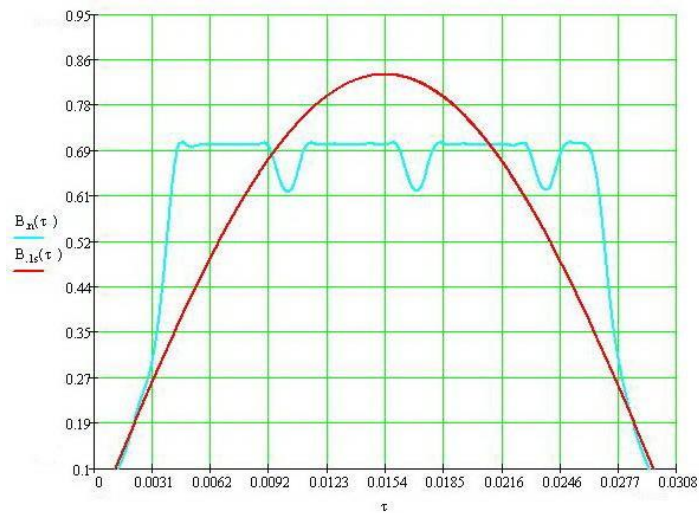
На рисунке 2.23 а, б, в, представлены распределения нормальной составляющей магнитной индукции в рабочем зазоре и выделение первой гармонической кривой индукции для рассматриваемых роторов.



а) ротор с немагнитной цилиндрической обоймой



б) ротор со слоистой магнитно-немагнитной структурой обоймы



в) ротор с обоймой из градиентного материала

Рисунок 2.23 - Распределение нормальной составляющей индукции в рабочем зазоре и первая гармоническая кривой индукции.

В таблице 2.1 представлены результаты проведенных механических и электромагнитных расчетов роторов.

Таблица 2.1.

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

Из таблицы 2.1 видно, что наибольшие радиальные перемещения имеет немагнитная обойма из титана. Это необходимо учитывать при выборе величины рабочего зазора. Одним из преимуществ конечно-элементного анализа является наглядность его результатов, которая позволяет исследовать концентраторы механических напряжений при выполнении прочностных расчетов.

## **2.4. Исследование концентраторов механических напряжений в обойме ротора.**

Для уменьшения величины и устранения концентраторов механических напряжений было проведено исследование влияния формы обоймы на характер и величину возникающих механических напряжений.

При проведении исследования использовался универсальный программный комплекс конечно-элементного анализа. Для уменьшения времени расчета моделировался сегмент ротора с магнитом путем использования граничного условия циклической симметрии. Полагаем, что на обойму действует центробежная сила самой обоймы и магнита. В связи с этим, ко всем элементам конструкции была приложена нагрузка в виде центробежной силы, между элементами установлено контактное взаимодействие. При исследовании следующие величины были постоянными: наружный диаметр ротора, частота вращения ротора, ширина магнита, высота магнита, толщина обоймы по оси магнита.

На рисунке 2.24 представлен эскиз концентричной обоймы. В такой обойме наружный радиус обоймы  $R1$  и радиус  $R2$  наружной цилиндрической поверхности магнитов имеют общий центр, при этом  $R1 > R2$ . На рисунке 2.25 представлены результаты численного прочностного расчета концентричной обоймы. Из рисунка 2.25 видно, что максимум механических напряжений в месте концентрации составляет 695 МПа.

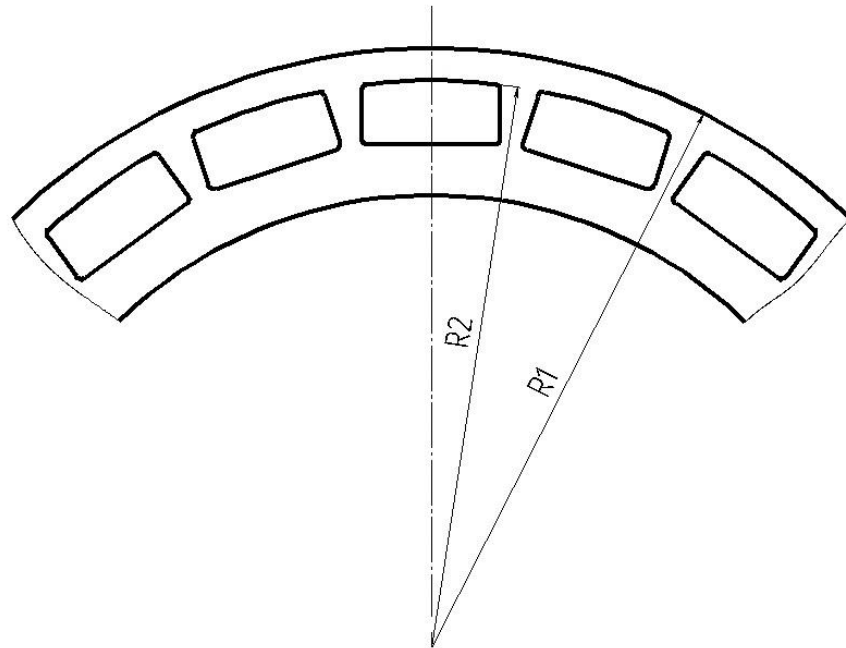


Рисунок 2.24 - Эскиз концентричной обоймы ( $R1 > R2$ ).

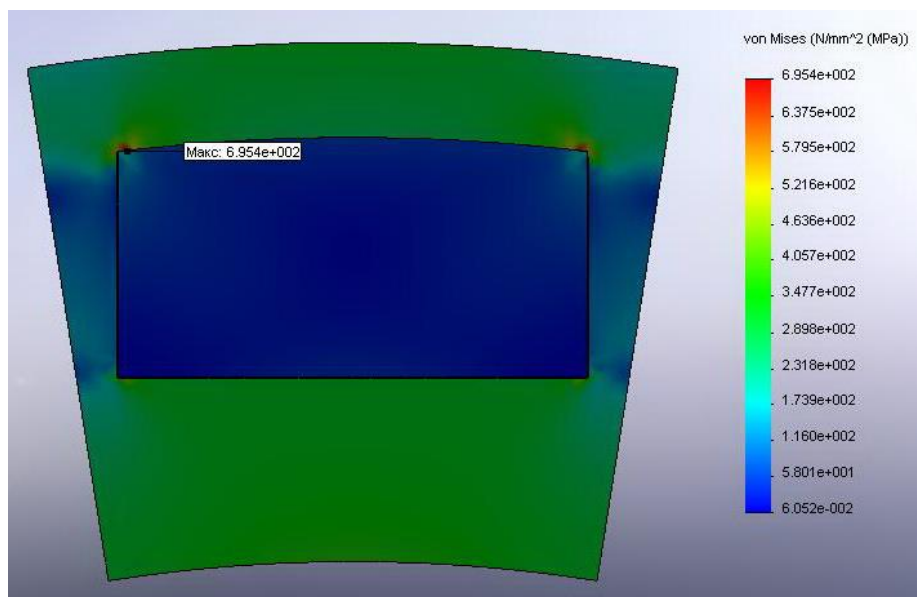


Рисунок 2.25 - Результат численного прочностного расчета концентричной обоймы.

На рисунке 2.26 представлен эскиз эксцентричной обоймы. В рассматриваемой обойме центр радиуса  $R2$  наружной цилиндрической поверхности магнитов смещен относительно центра наружного радиуса обоймы  $R1$  вдоль продольной оси магнита в сторону наружной поверхности обоймы на величину  $Y$ , образуя плавное увеличение сечения обоймы над магнитом от продольной оси магнита к его боковым сторонам, при этом  $R1 \gg R2$ .

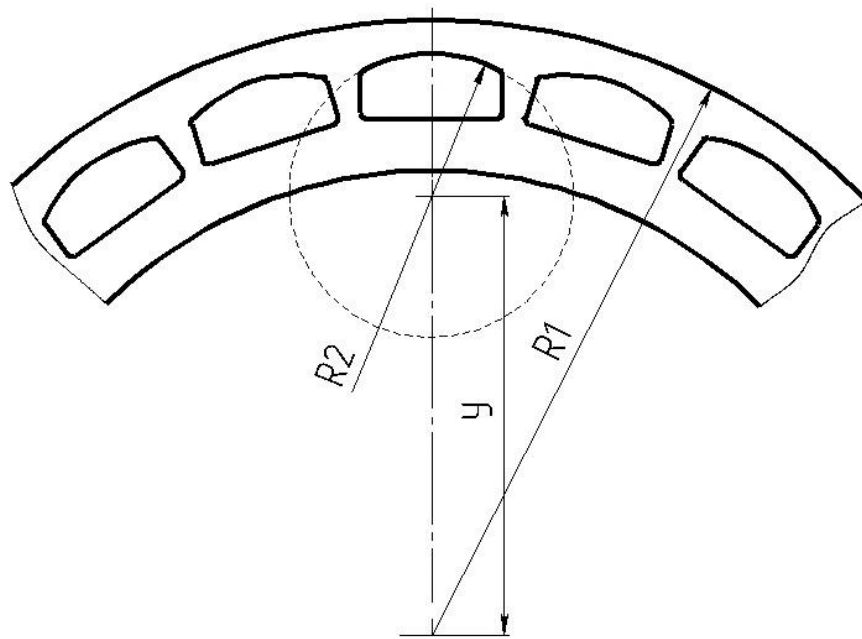


Рисунок 2.26 - Эскиз эксцентричной обоймы ( $R1 \gg R2$ ).

На рисунке 2.27 представлены результаты численного прочностного расчета эксцентричной обоймы.

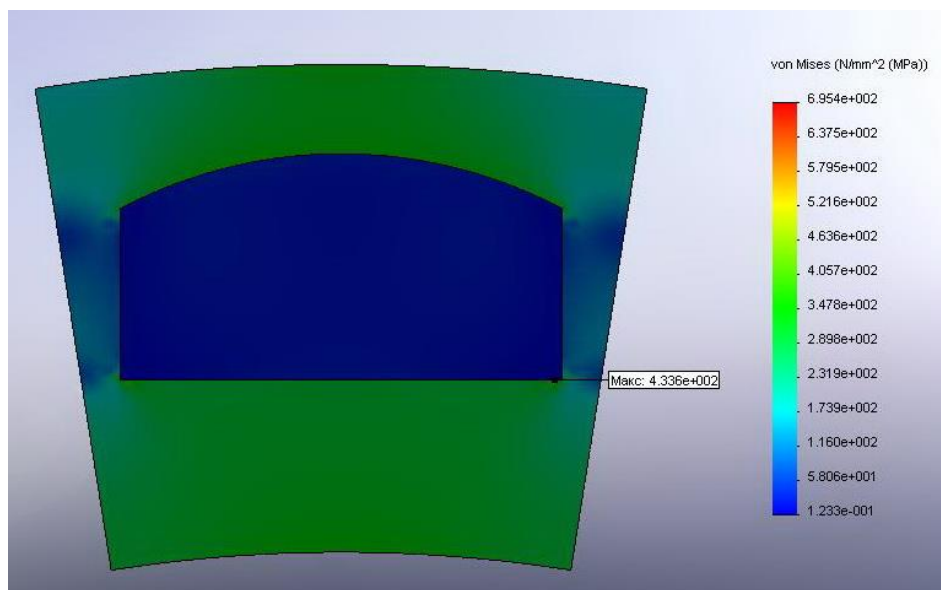


Рисунок 2.27 - Результаты численного прочностного расчета эксцентричной обоймы.

Из рисунка 2.27 видно, что максимум механических напряжений в месте концентрации составляет 433 МПа, при этом толщина обоймы над магнитом соответствует концентричной обойме.

При работе ротора, величина концентраторов механических напряжений меньше, максимальные напряжения приближаются по модулю к средним,

что дает возможность дальнейшего повышения частоты вращения ротора и, как следствие, увеличение мощности при неизменных размерах электрической машины. Представленный способ уменьшения концентрации напряжений разработан с участием автора [75].

Для проверки работоспособности предлагаемого способа уменьшения концентрации механических напряжений, был использован ротор синхронного двигателя с редкоземельными постоянными магнитами, который спроектирован с использованием предлагаемого способа. Данный двигатель является разработкой ОАО «АКБ «Якорь». Прочность ротора (рисунок 2.28) рассматриваемого двигателя проверялась на стенде (рисунок 2.29) испытательной лаборатории ОАО «АКБ «Якорь», путем его вращения со скоростью на 20% больше рабочей.



Рисунок 2.28 - Ротор синхронного двигателя.



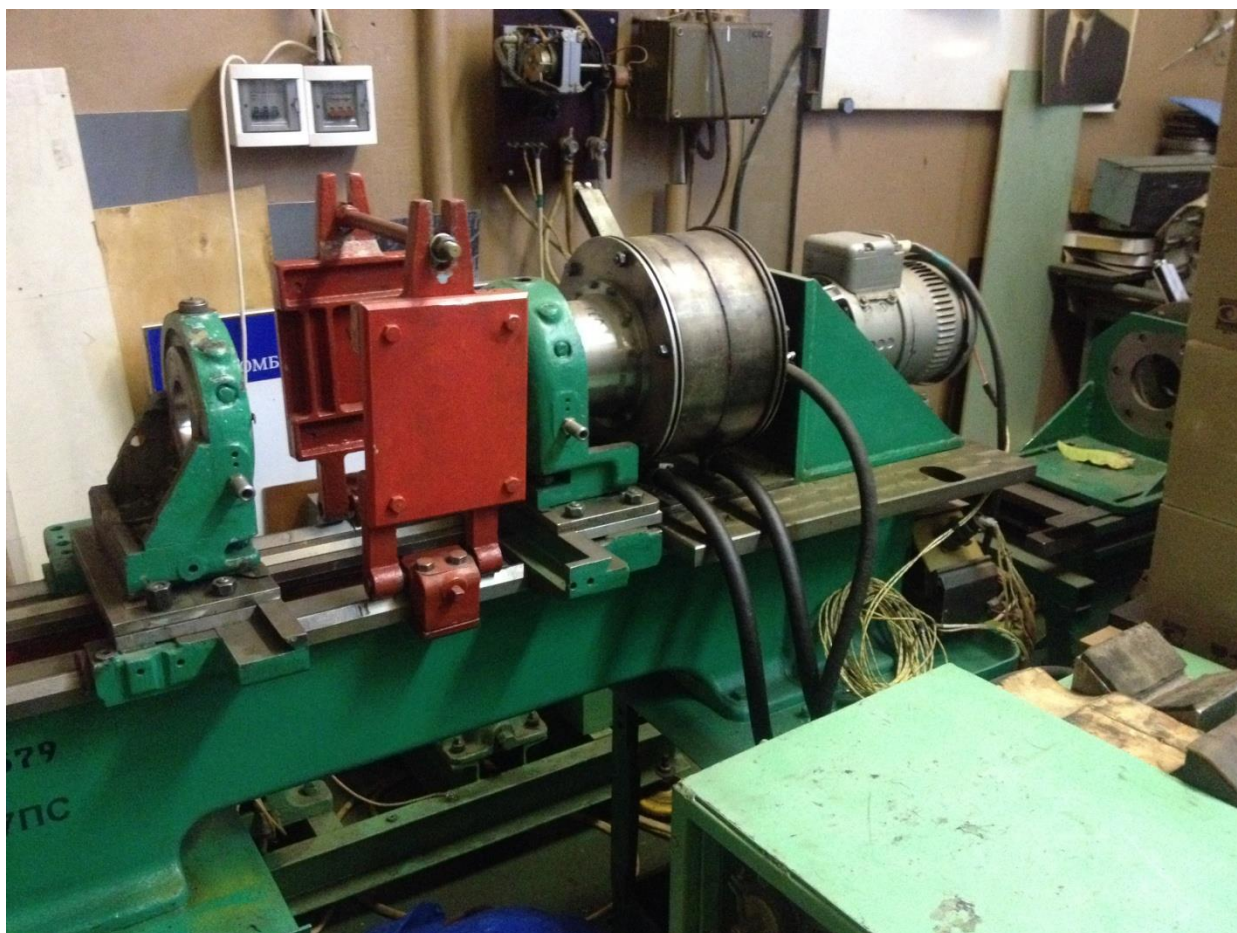


Рисунок 2.29 - Испытательный стенд для проверки механической прочности ротора.

Перед проведением испытаний был выполнен замер наружного диаметра обоймы ротора. После завершения испытаний путем замера было установлено, что наружный диаметр обоймы ротора не изменился. Данный результат свидетельствует об отсутствии остаточных деформаций обоймы ротора, что подтверждает достоверность численного эксперимента и эффективность предлагаемого способа.



### **Выводы по главе**

- Особенности конструкций генераторов с возбуждением от постоянных магнитов обусловлены конструкциями роторов, а их статоры не отличаются от статоров классических синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением.
- Расчетное проектирование генераторов с постоянными магнитами, как и классических синхронных базируется на электромагнитном расчете, а тепловой и механический расчеты определяют функциональные ограничения.
- На основе проведенных исследований уточнена методика конструирования авиационных генераторов с высокоэнергетическими постоянными магнитами.
- Показаны преимущества и недостатки основных конструктивных схем роторов с постоянными магнитами.
- Предложен один из возможных способов уменьшения концентрации механических напряжений в обойме ротора.

### **ГЛАВА 3. АЛГОРИТМ РАСЧЕТА КРИТИЧЕСКИХ ЧАСТОТ ВРАЩЕНИЯ РОТОРОВ АВИАЦИОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ.**

На основе объединения традиционных методов расчета с методом конечно-элементного анализа был разработан алгоритм автоматизированного расчета критических частот вращения роторов электрических машин с постоянными магнитами (рисунок 3.1).

Исходными данными для выполнения расчета критических частот вращения ротора являются:

- геометрия электрической машины;
- используемые материалы и их свойства;
- тип используемых подшипниковых опор;
- характер посадки сопрягаемых деталей.

Основные факторы, оказывающие влияние на величину критической частоты вращения ротора:

- расстояние между опорами;
- вес ротора;
- податливость опоры;
- сила магнитного притяжения;
- гироскопический момент;
- различная жесткость ротора в главных плоскостях изгиба.



Рисунок 3.1 - Алгоритм расчета критических частот вращения роторов электрических машин с постоянными магнитами.

На основе исходных данных проводится расчет. Алгоритм расчета содержит ряд блоков:

### 3.1. Блок расчета размерной цепи электрической машины.

Расчет размерной цепи позволяет определить наилучшее возможное сочетание размеров деталей и узлов электрической машины. Стартовой точкой для выполнения расчета силы магнитного притяжения является расчет размерной цепи. Расчет размерной цепи для электрических машин с радиальными постоянными магнитами отличается от расчета для машин с тангенциальными магнитами, что связано с конструктивными особенностями их роторов. На рисунке 3.2 представлена схема расчета размерной цепи машины с постоянными магнитами для определения максимально возможной величины эксцентриситета ротора и статора и минимально возможной величины немагнитного зазора. Конечной точкой данного расчета является величина минимально возможного немагнитного зазора между ротором и статором и максимально возможного эксцентриситета.

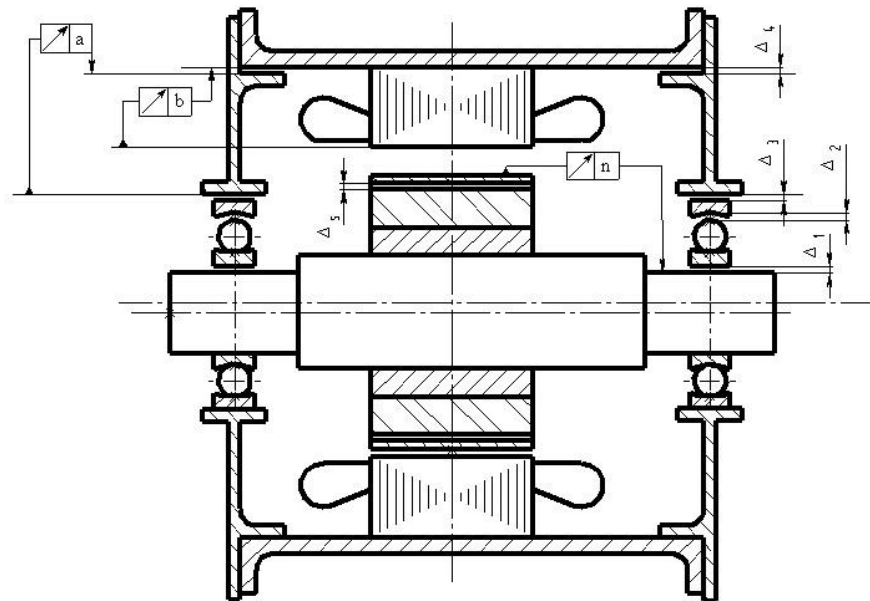


Рисунок 3.2 - Схема размерной цепи для машины с постоянными магнитами.

$\Delta_1$  – максимальный зазор в месте посадки подшипника,  $\Delta_2$  – максимальный радиальный зазор в подшипнике,  $\Delta_3$  – максимальный зазор в месте посадки подшипника в щит,  $\Delta_4$  – максимальный зазор в месте посадки щита в корпус,  $\Delta_5$  – максимальный зазор в месте посадки магнита в обойму,  $a$  – радиальное биение посадочного бурта щита относительно гнезда под подшипник,  $b$  – радиальное биение посадочного места под щит относительно расточки статора,  $n$  – радиальное биение шейки вала под подшипник относительно наружного диаметра пакета ротора.

Максимально возможная величина эксцентриситета  $e$  ротора и статора электрической машины с постоянными магнитами может быть вычислена как:

$$e = 1/2(a + b + n + \Delta 1 + \Delta 2 + \Delta 3 + \Delta 4). \quad (3.1)$$

Если в машинах с электромагнитным возбуждением величина немагнитного зазора равна воздушному, то в машинах с магнитоэлектрическим возбуждением эти величины разные.

Для машин с тангенциальными постоянными магнитами величина минимально возможного немагнитного зазора может быть вычислена как:

$$\delta_{\min} = \delta - e. \quad (3.2)$$

где  $\delta$  - номинальная величина воздушного зазора.

В машинах с радиальными постоянными магнитами для удержания магнитов на роторе используются силовые бандажи, как правило, из немагнитного материала. При расчете величины минимально возможного немагнитного зазора в машинах с таким ротором необходимо учитывать толщину немагнитного силового бандаж. Для таких машин величина минимально возможного немагнитного зазора может быть вычислена как:

$$\delta_{\min} = \delta + \delta_{\text{БАН}} - e + \Delta 5. \quad (3.3)$$

где  $\delta_{\text{БАН}}$  - толщина немагнитного силового бандаж.

Полученная величина минимального немагнитного зазора используется при создании конечно-элементной модели в блоке расчета силы одностороннего магнитного притяжения [16, 48, 97], а величина максимально возможного эксцентриситета используется для аналитического определения силы одностороннего магнитного притяжения.

### **3.2. Блок расчета силы одностороннего магнитного притяжения.**

При конструировании электрических машин с постоянными магнитами необходим учет силы одностороннего магнитного притяжения, увеличивающей прогиб вала и снижающей критическую частоту вращения ротора. Указанная сила обусловлена, главным образом, наличием эксцентриситета между осями ротора и статора. При сборке электрических машин с постоянными магнитами данная сила создает технологические трудности при установке ротора в статор, которые решаются путем использования специальных технологий. Сила одностороннего магнитного притяжения зависит не только от величины эксцентриситета, но и от числа полюсов. С увеличением числа полюсов магнитное притяжение возрастает это связано с увеличением магнитной индукции из-за уменьшения расчетного коэффициента полюсного перекрытия.

Аналитически сила одностороннего магнитного притяжения может быть определена по методике [1]. В данной методике используются следующие допущения: внутренний диаметр статора и наружный диаметр ротора приняты идеально цилиндрическими. Рассмотрим схему, представленную на рисунке 3.3. Наличие эксцентриситета приводит к уменьшению величины рабочего зазора под одним полюсом и его увеличению под диаметрально противоположным, что влечет за собой увеличение магнитной индукции под полюсом с меньшим рабочим зазором и как следствие возникает сила притяжения к этому полюсу. Соответственно направление силы одностороннего магнитного притяжения определяется направлением возникающего эксцентриситета.

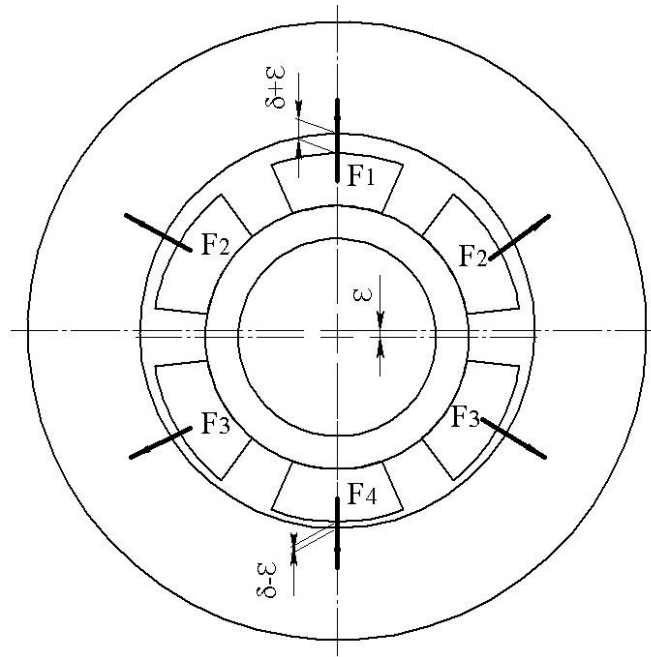


Рисунок 3.3 - Силы одностороннего магнитного притяжения при  $2p=6$ .

Начальная величина силы одностороннего магнитного притяжения  $P_0$  может быть определена как [1]:

$$P_0 = 3 \times D_a l_a \frac{e_0}{\delta} = K_0 e_0 \quad (3.4)$$

Начальное значение силы одностороннего магнитного притяжения, отнесенное к 1 см величины начального эксцентриситета:

$$K_0 = 3 \times \frac{D_a l_a}{\delta} \quad (3.5)$$

где  $\delta$  - односторонний зазор машины в см;  $D_a$  и  $l_a$  - диаметр и активная длина сердечника машины в см.

Под действием силы одностороннего магнитного притяжения вал машины прогибается, вызывая одновременно с увеличением прогиба и увеличение действующей силы. По мере увеличения прогиба вала возникает сила упругого сопротивления.

Конечная величина силы одностороннего магнитного притяжения равна:

$$P_{м.уст.} = \frac{KK_0}{K - K_0} e_0 \quad (3.6)$$

где  $K$  - жесткость вала, в кг/см.

Для расчета начальной силы одностороннего магнитного притяжения в электрических машинах с постоянными магнитами автором предлагается аналитическая методика, учитывающая изменение индукции в рабочем зазоре при эксцентриситете с учетом потоков рассеяния.

Предлагаемая методика состоит в следующем:

- определяется средняя величина немагнитного зазора под каждым полюсом;
- используя выражение для активной зоны с радиальными редкоземельными постоянными магнитами, определяется величина магнитной индукции под каждым полюсом по среднему немагнитному зазору;

$$B_{\delta}(x) = \frac{4B_r}{\pi} \sum_{n=1,3,\dots}^{N \rightarrow \infty} \left[ \frac{1}{n} \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi}{2} \cdot \alpha\right) \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi}{2}\right) \frac{\sinh\left(\frac{n\pi}{\tau} h_m\right)}{\sinh\left(\frac{n\pi}{\tau} (h_m + \delta)\right)} \sin\left(\frac{n\pi}{\tau} x\right) \right] \quad (3.7)$$

- строится график распределения нормальной составляющей магнитной индукции под полюсами (рисунок 3.4);

- определяется удельная сила;

$$F(\varphi) = \frac{B_{\delta}(\varphi)^2}{2 \cdot \mu_0} \quad (3.8)$$

где

$$B_{\delta}(\varphi) = B_{\delta} \left[ \left( \varphi + \frac{\alpha_{\tau}}{2} \right) \cdot \frac{\tau}{\alpha_{\tau}} \right] \quad (3.9)$$



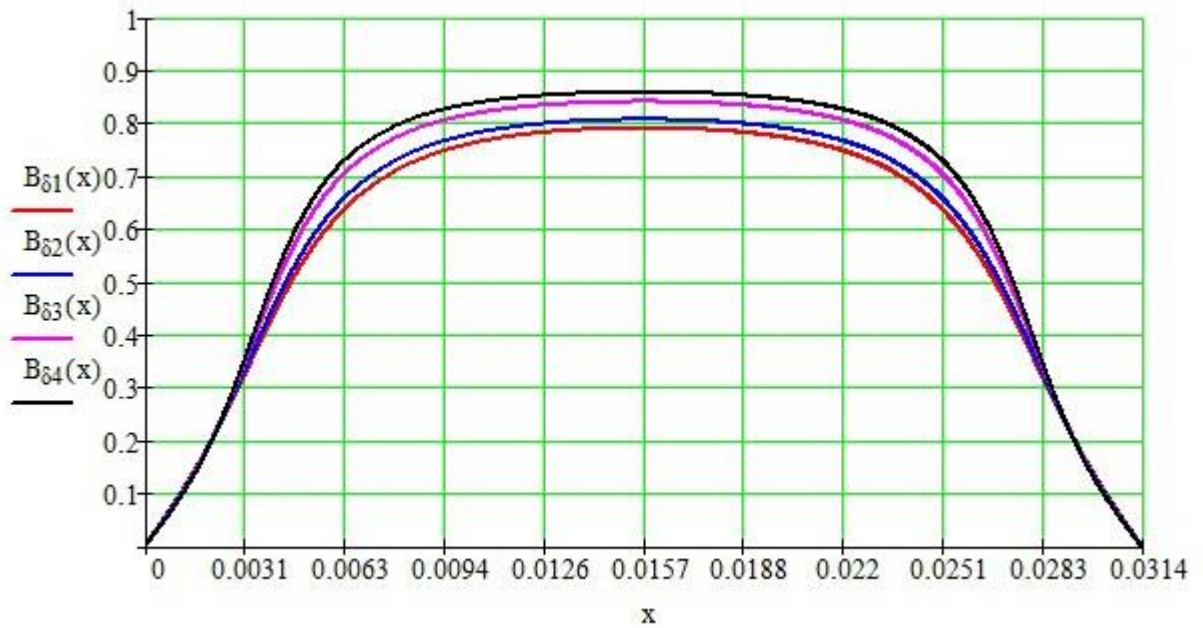


Рисунок 3.4-Нормальная составляющая магнитной индукции под полюсом.

- строится график изменения магнитной индукции при изменении  $\varphi = \pi x / (p\tau)$ ;

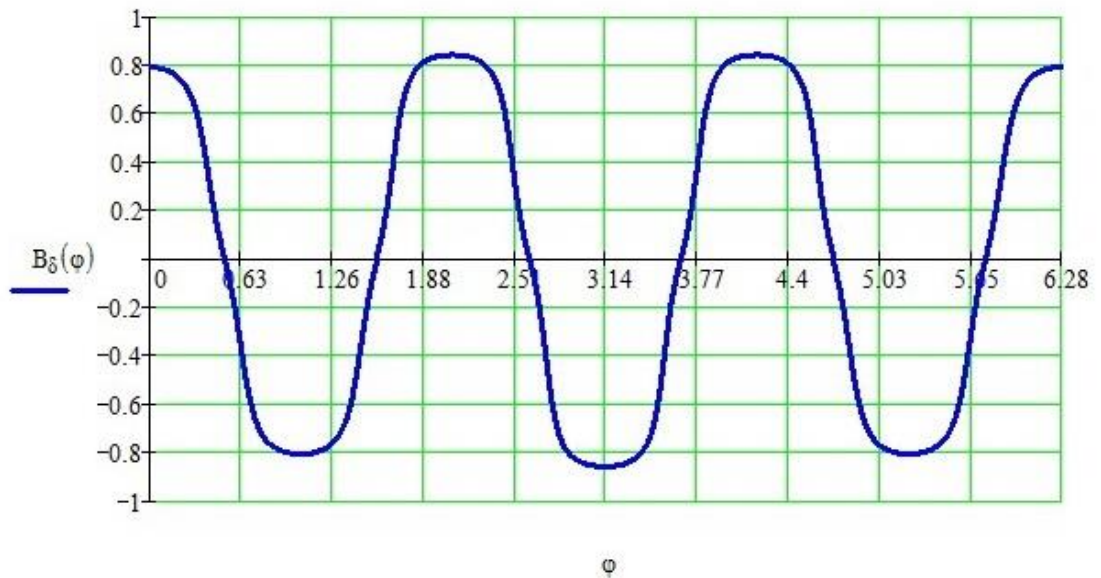


Рисунок 3.5 - Изменение магнитной индукции в зависимости от угла.

- определяется составляющая удельной силы по направлению эксцентриситета

$$F_x(\varphi) = F(\varphi) \cdot \cos(\varphi) \quad (3.10)$$

- определяется сила одностороннего магнитного притяжения по направлению эксцентриситета, кг

$$F_x = \frac{l_\delta R \cdot \int_0^{2\pi} F_x(\varphi) \partial\varphi}{10} \quad (3.11)$$

где  $R$  – радиус расточки якоря.

- строится график изменения силы магнитного притяжения по расточке якоря

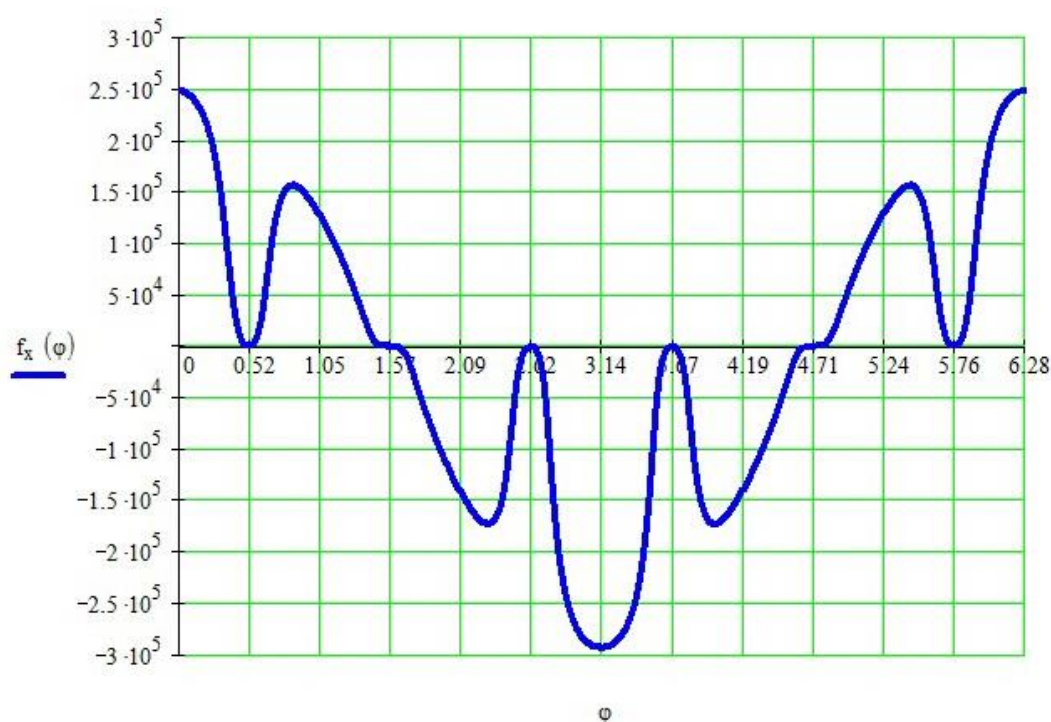


Рисунок 3.6 – График изменения силы магнитного притяжения по расточке якоря.

Для проверки корректности предлагаемой методики выполнен расчет силы одностороннего магнитного притяжения методом конечно-элементного анализа. Расчет выполнен для электрических машин с числом полюсов 4, 6, 12. Результаты расчета представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

	существующий метод [1]	Число полюсов					
		4		6		12	
		предлагаемый метод	МКЭ	предлагаемый метод	МКЭ	предлагаемый метод	МКЭ
сила одностороннего магнитного притяжения, кг	12,199	7	7,62	8,101	8,41	9,354	8,896

Результаты таблицы 3.1 подтверждают корректность предлагаемого способа и необходимость учета числа полюсов при расчете силы одностороннего магнитного притяжения.

На рисунках 3.7-3.9 представлены картины распределения магнитной индукции в активной зоне машины с числом полюсов 4, 6, 12.

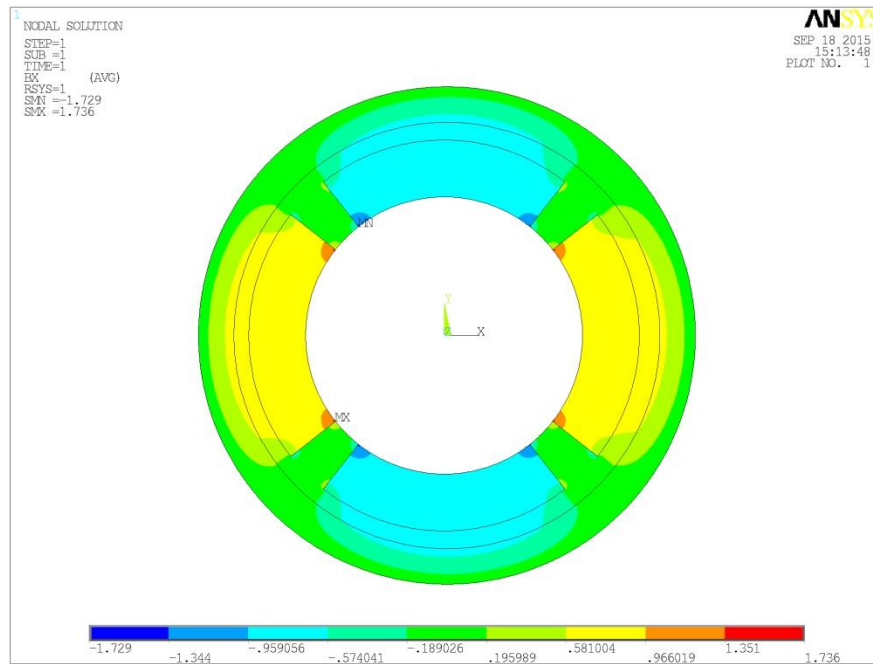


Рисунок 3.7 - Картина распределения магнитной индукции в активной зоне машины с

$2p=4$ .

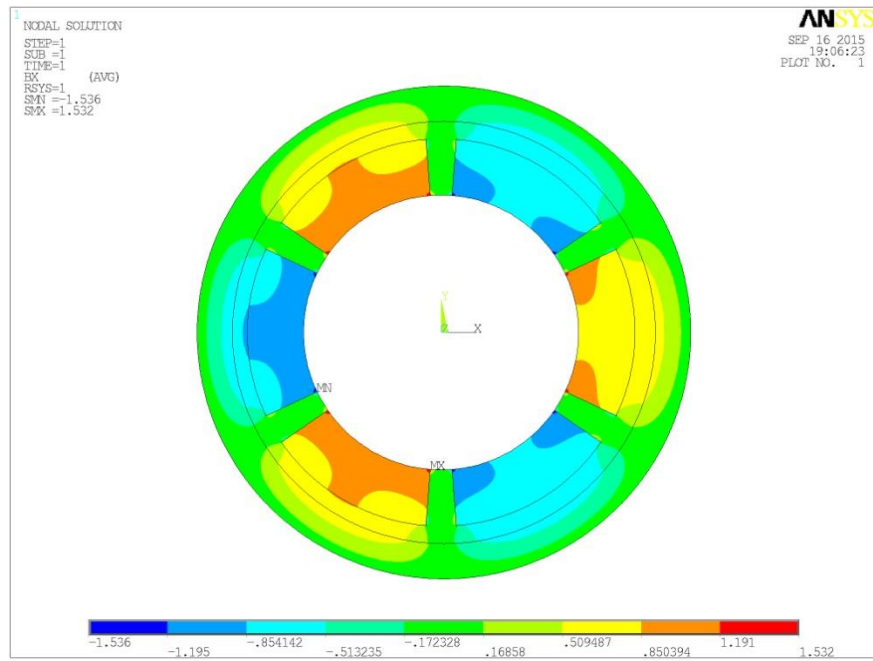


Рисунок 3.8 -Картина распределения магнитной индукции в активной зоне машины с  $2p=6$ .

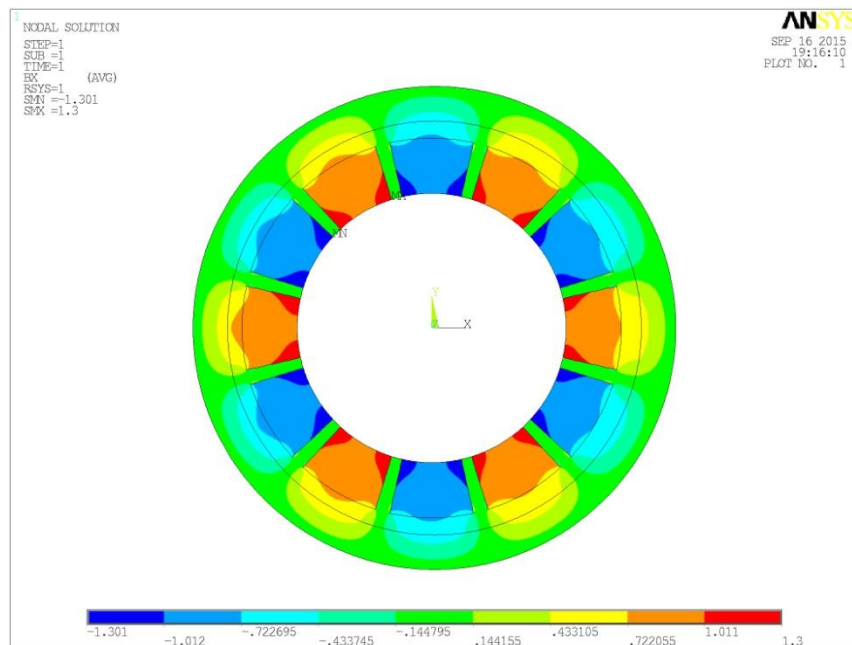


Рисунок 3.9 - Картина распределения магнитной индукции в активной зоне машины с  $2p=12$ .

Расчет установившейся величины силы одностороннего магнитного притяжения при использовании метода конечных элементов выполняется по алгоритму, представленному на рисунке 3.10. Данный расчет состоит из нескольких итераций.

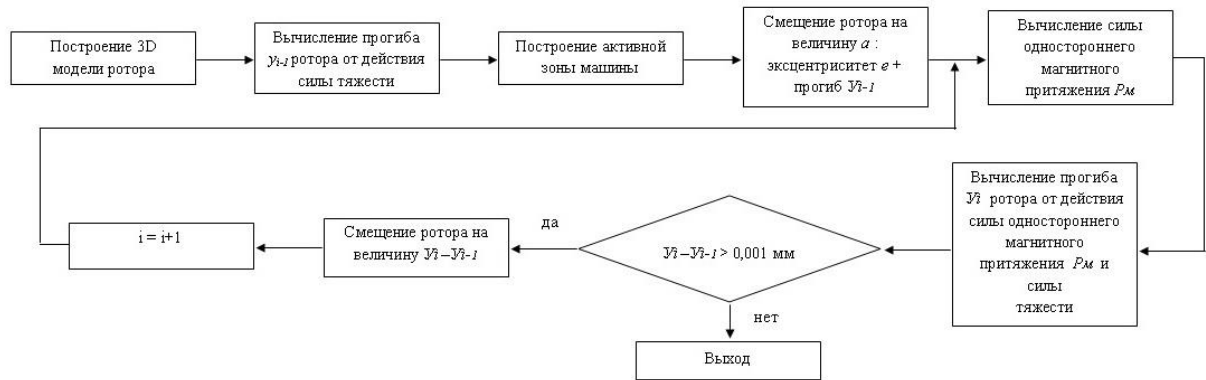


Рисунок 3.10 - Алгоритм расчета силы одностороннего магнитного притяжения.

В ряде случаев силу одностороннего магнитного притяжения рационально использовать для полной или частичной компенсации веса ротора, снижая тем самым нагрузку на подшипники и увеличивая их ресурс.

### 3.3. Определение силы от остаточной неуравновешенности ротора.

При конструировании ротора электрической машины с постоянными магнитами из-за эксцентricности пакета листов силового бандаж, допусков на размеры магнитов и деталей ротора возникает несовпадение главной оси инерции ротора с осью вращения, которое называется неуравновешенностью (дисбалансом) ротора.

Определим силу от остаточной неуравновешенности ротора [85]:

$$P_{осм} = 1,0955 * 10^{-2} m_{ром} n^2 e_{см} \quad (3.12)$$

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

Величина допустимого дисбаланса жесткого ротора определяется согласно ГОСТ 22061-76. Согласно ГОСТ 22061-76 существует 11 классов точности балансировки роторов. Роторы электрических машин входят с первого по четвертый класс: первый класс – роторы электродвигателей прецизионных шлифовальных станков, второй класс – роторы небольших электродвигателей специального назначения, третий класс – роторы средних и крупных электродвигателей со специальными требованиями, четвертый класс – роторы обычных электродвигателей [63].

Расположение полей классов точности балансировки показано на рисунке 3.11. Роторы в изделиях с горизонтальной осью вращения, попадающие в область ниже линии Н-Н, создают в опорах динамические нагрузки от дисбалансов меньшие, чем статические нагрузки от веса ротора. Роторы в изделиях с горизонтальной осью вращения, попадающие в область выше линии Н-Н, создают в опорах динамические нагрузки, большие, чем статические нагрузки от веса ротора. Границы классов показаны сплошными линиями. По оси ординат отложены значения удельного дисбаланса  $e_{см}$  в мкм.

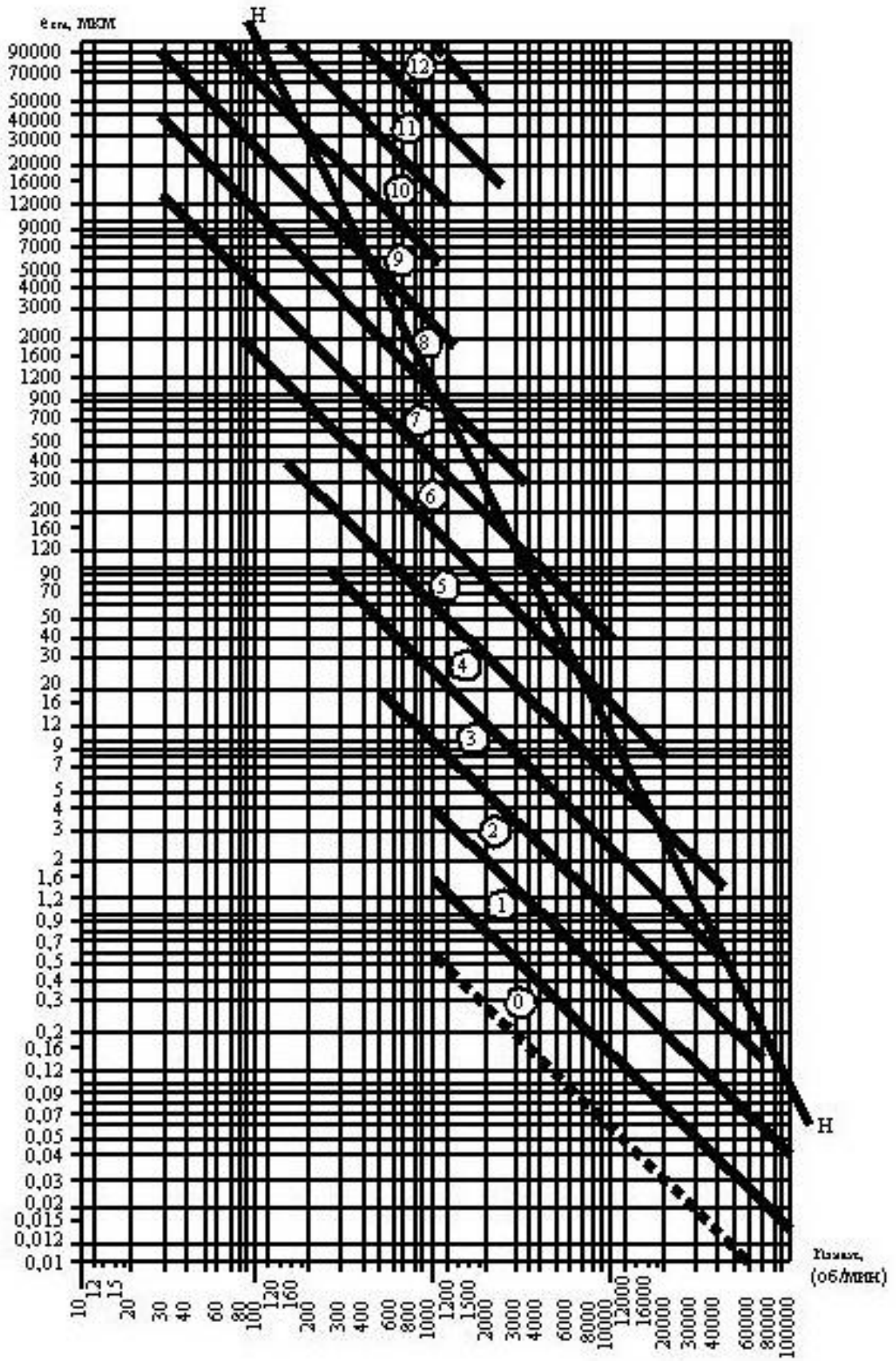


Рисунок 3.11.

По оси абсцисс отложены значения максимальной эксплуатационной частоты вращения ротора  $n_{\text{макс}}$  в об/мин.

Полученная величина дисбаланса используется в блоке расчета критической частоты вращения ротора и прикладывается к конечно-элементной модели ротора в виде силы.



### 3.4. Расчет жесткости опор.

Расчет проводится по аналитическим формулам изложенным в [ 81].

Радиальная жесткость шарикового подшипника в узле может быть определена как, Н/мкм

$$J_r = \frac{F_r}{\delta_r} \quad (3.13)$$

где  $F_r$  - радиальная нагрузка на опору, Н;  $\delta_r$  - радиальная податливость (деформация) подшипника под нагрузкой, мкм.

$$\delta_r = \delta_r' + \delta_r'' \quad (3.14)$$

где  $\delta_r'$  - радиальная податливость в контакте наиболее нагруженного тела качения с дорожкой качения, мкм;  $\delta_r''$  - радиальная податливость в контакте колец подшипника с посадочными поверхностями вала и корпуса, мкм.

Радиальная податливость в контакте наиболее нагруженного тела качения с дорожкой качения в подшипнике:

с предварительным натягом

$$\delta_r' = \beta \delta_{r0} \quad (3.15)$$

с радиальным зазором  $G_r$ , мкм,

$$\delta_r' = \beta \delta_{r0} - \frac{G_r}{2} \quad (3.16)$$

где  $\delta_{r0}$  - радиальная податливость в контакте наиболее нагруженного тела качения с дорожкой качения при нулевом зазоре, мкм;  $\beta$  - коэффициент, учитывающий натяг или зазор в подшипнике.

Величину  $\delta_{r0}$  (мкм) для подшипников различных типов можно определить из уравнений (см. табл. 3.2) в зависимости от чисто радиальной нагруз-

ки, воспринимаемой наиболее нагруженным телом качения:

$$Q = \frac{5F_r}{iZ \cos \alpha} \quad (3.17)$$

где  $i$  - число рядов тел качения;  $Z$  - число тел качения в одном ряду;  $\alpha$  - угол контакта, °.

Таблица 3.2

Тип подшипника	Радиальное перемещение колец подшипника $\delta_{r0}$ , мкм
Шариковый радиальный однорядный	$4 \times 10^{-4} \sqrt[3]{\frac{Q^2}{D_w}}$
Шариковый радиально-упорный однорядный	$\frac{4 \times 10^{-4}}{\cos \alpha} \sqrt[3]{\frac{Q^2}{D_w}}$
Шариковый радиальный двухрядный сферический	$\frac{7 \times 10^{-4}}{\cos \alpha} \sqrt[3]{\frac{Q^2}{D_w}}$

где  $Q$  - усилие, воспринимаемое наиболее нагруженным телом качения, Н;  
 $D_w$  - диаметр шарика, мм;  $\alpha$  - угол контакта подшипника, °.

На рисунке 3.12 показана номограмма для определения  $\delta_{r0}$  в подшипниках. Коэффициент  $\beta$ , учитывающий натяг или зазор в подшипнике, определяется по графику на рисунке 3.13 для радиального подшипника в зависимости от относительного натяга или зазора  $G_r/\delta_{r0}$ .

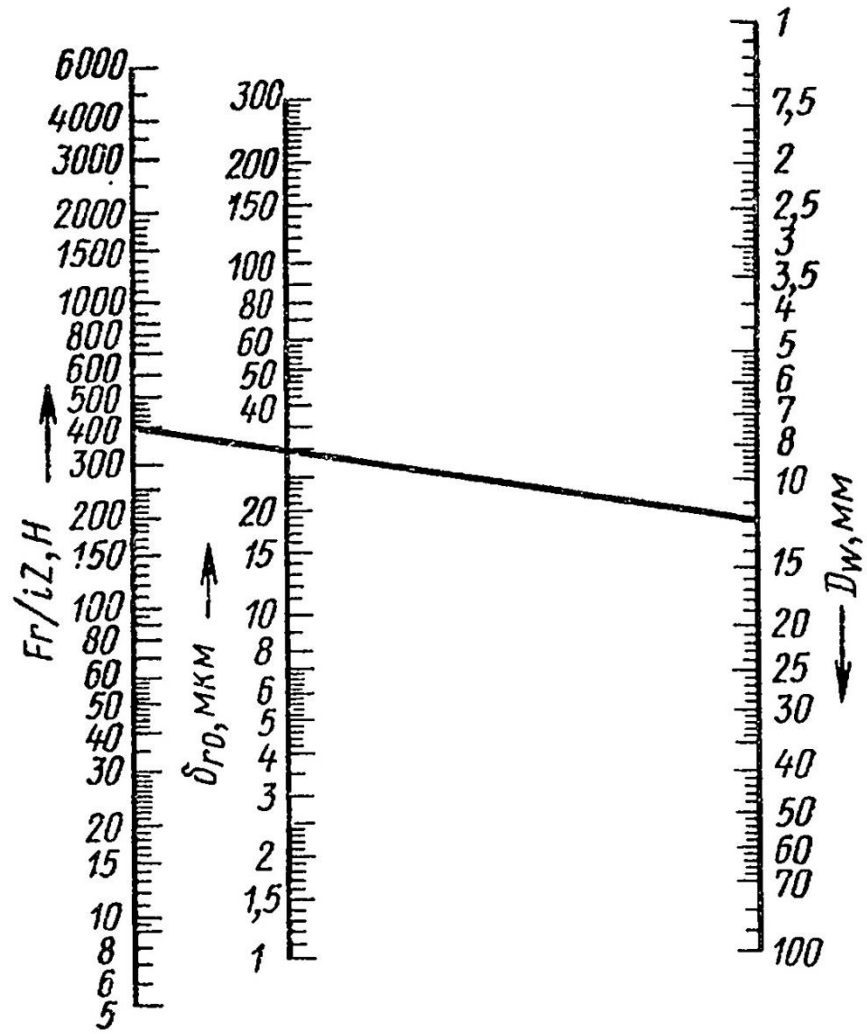


Рисунок 3.12

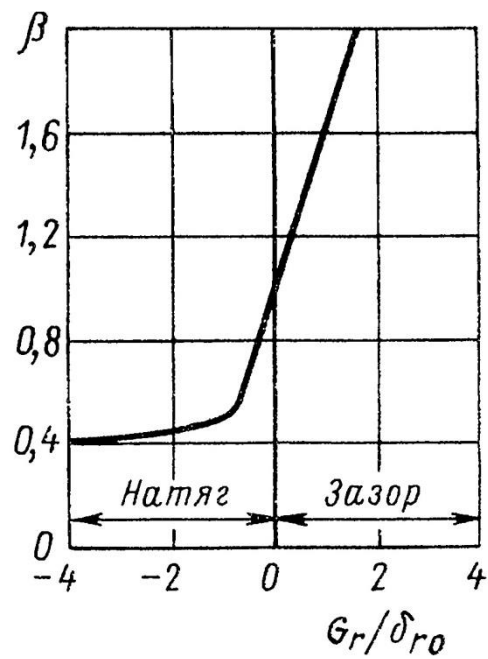


Рисунок 3.13

Радиальная податливость  $\delta_r''$  в контакте колец подшипника с посадочными поверхностями вала и корпуса

$$\delta_r'' = \frac{4F_r k}{\pi d B} \left(1 + \frac{d}{D}\right) \quad (3.18)$$

где  $k = 0,05 \div 0,25$  (меньшие значения следует принимать при повышенной точности изготовления посадочных мест, при больших посадочных натягах, а также при установке подшипников на конусную шейку);  $d$ ,  $D$ , и  $B$  - соответственно внутренний, внешний диаметры и ширина подшипника, мм.

Рассчитанную величину жесткости опор прикладываем в месте установки подшипника к модели с помощью специального конечного элемента типа “пружина”, указывая ее в свойствах этого элемента [9, 48].

### 3.5. Расчет критической частоты вращения ротора.

Расчету критических частот вращения роторов посвящено много работ [18, 25, 28, 47, 49, 82, 98]. При вращении ротора с установившейся угловой скоростью  $\omega$  небалансированный пакет листов веса  $G$  создает упругий выгиб вала в сторону действия центробежной силы [1]. Центробежная сила, вызывающая прогиб вала, определяется выражением

$$F_y = m\omega^2(y + e) \quad (3.19)$$

где  $m$  - масса ротора;  $\omega$  - угловая частота вращения;  $y$  - прогиб вала;  $e$  - эксцентриситет.

Она уравновешивается силой, обусловленной жесткостью вала,

$$F_{жс} = ky \quad (3.20)$$

где  $k$  - жесткость вала

$$k = \frac{48EJ}{l^3} \quad (3.21)$$

Здесь  $E$  - модуль упругости (для стальных валов  $E = 2,06 \cdot 10^{11}$  Па);  $J = \frac{\pi d^4}{64}$  - экваториальный момент инерции вала.

В установившемся режиме равновесия сил

$$F_y = F_{жс} \Rightarrow m\omega^2(y + e) = ky \quad (3.22)$$

прогиб вала составит

$$y = \frac{\omega^2 e}{k/m - \omega^2} \quad (3.23)$$

Угловую скорость  $\omega_k$ , при которой  $(k/m - \omega^2) = 0$ , называют критической скоростью вращения:

$$\omega_k = \sqrt{k/m} \quad (3.24)$$

Выразим  $\omega_k$  через число оборотов в минуту

$$\omega_k = \frac{2\pi n_k}{60} \quad (3.25)$$

Выразим  $k$  через прогиб вала  $y$  и вес  $G$

$$k = \frac{G}{y} \quad (3.26)$$

$$n_k = \frac{60}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{60}{2\pi} \sqrt{\frac{Gg}{yG}} = \frac{60}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{y}} \quad (3.27)$$

Существует несколько способов определения прогиба вала, который в дальнейшем используется при расчете критической частоты вращения ротора.

Рассмотрим расчет прогиба вала согласно [1]. На рисунке 3.14 представлена схема расчета прогиба вала на двух опорах без шкива. Для расчета по данной схеме вся нагрузка на вал заменяется сосредоточенной силой и прикладывается к середине длины пакета железа ротора. Находят прогиб вала под серединой пакета сердечника в сечении Б-Б.

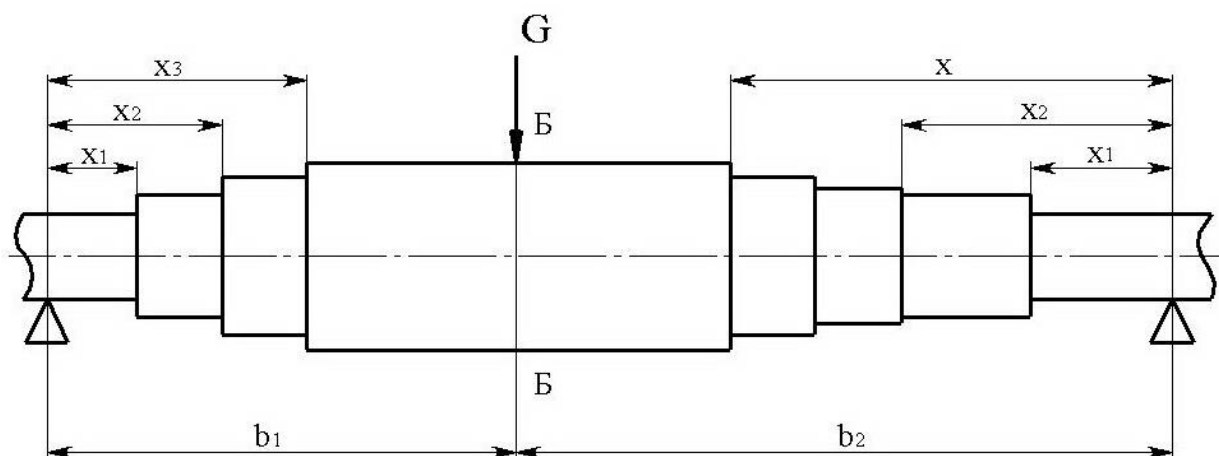


Рисунок 3.14- Схема расчета прогиба вала на двух опорах без шкива.

Прогиб вала в сечении Б-Б равен:

$$y = \frac{G}{3El^2} (S_1 b_2^2 + S_2 b_1^2) \quad (3.28)$$

$$S_1 = \frac{x_1^3}{J_1} + \frac{x_2^3}{J_2} + \dots + \frac{b_1^3 - x_{b-1}^3}{J_b} \quad (3.29)$$

$$S_2 = \frac{x_1^3}{J_1} + \frac{x_2^3}{J_2} + \dots + \frac{b_2^3 - x_{b-1}^3}{J_b} \quad (3.30)$$

где  $G$  - вес ротора с учетом участка вала по длине сердечника,  $E$  - модуль упругости материала вала,  $l$  - расстояние между опорами вала,  $J$  - экваториальный момент инерции сечения вала.

Рассмотрим расчет прогиба вала согласно [85]. Схема расчета представлена рисунке 3.15.

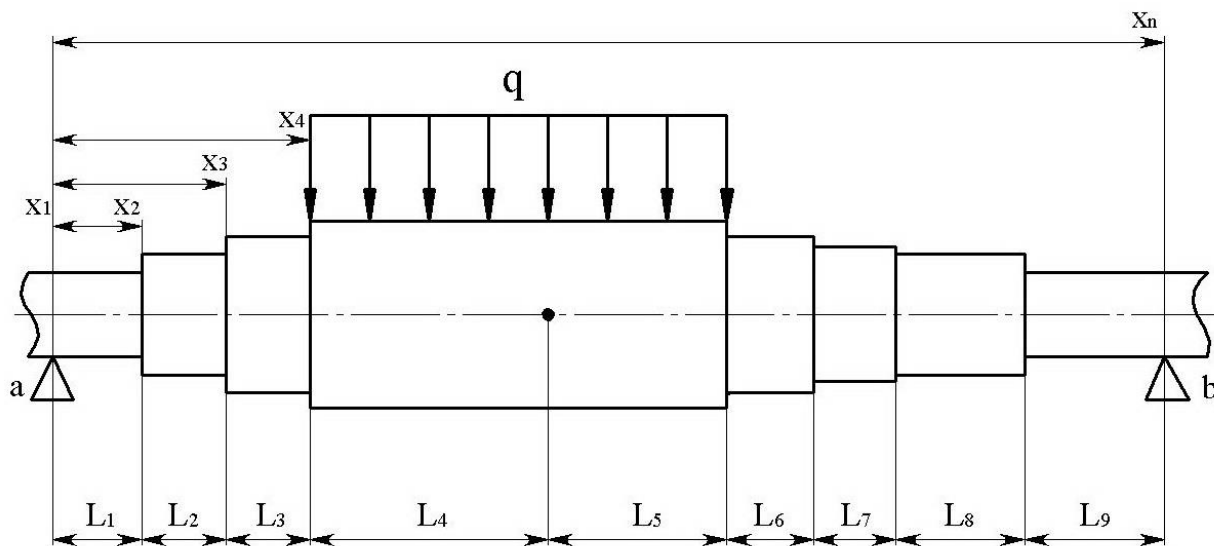


Рисунок 3.15 - Схема расчета прогиба вала на двух опорах.

Согласно рассматриваемой методике вал на двух опорах разбивают на две половины – левую и правую, каждая из этих половин рассматривается как консоль с заделкой в среднем сечении, угол поворота которой равен нулю. Консольный вал ступенчатой формы разбивается на участки таким образом, что внутри каждого участка жесткость вала и приложенная нагрузка остаются постоянными. Общий прогиб и угол поворота конечного сечения находят путем суммирования прогиба и угла поворота всех участков вала. В рассматриваемом методе предлагается вес пакета ротора задавать в виде распределенной нагрузки, действующей на длине пакета железа ротора.

Основное уравнение рассматриваемой методики

$$\Delta_n = \Delta_{n-1} + L_n(\theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_{n-1}) + C_n \quad (3.31)$$

где  $\Delta_n$  - прогибы конца участка вала относительно оси недеформированного вала,  $L_n$  - длина  $n$ -го участка вала,  $\theta_n$  - углы между касательными для предыдущего и рассматриваемого участка,  $C_n$  - прогибы участков вала по отношению к касательным, проведенным к линии изгиба в начале каждого участка.

Действительный прогиб вала можно определить

$$y_i = \Delta_i - z_i \quad (3.32)$$

$$z_i = z_a + (z_b - z_a)x_i/L \quad (3.33)$$

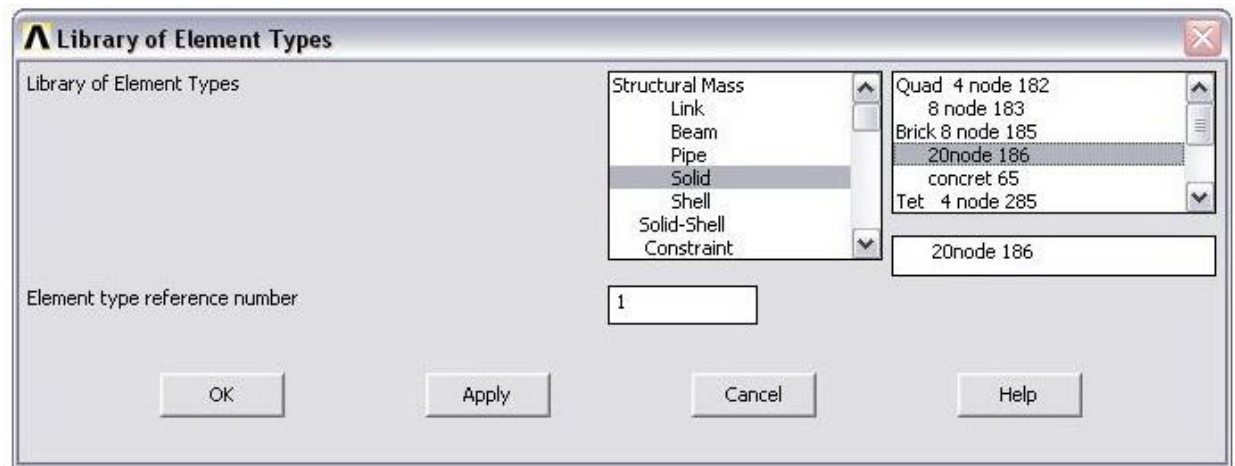
где  $z_a, z_b$  - прогибы вала в точках  $a$  и  $b$  соответственно,  $x_i$  - расстояние от точки  $a$  до  $i$  участка вала.

Критическая частота вращения может быть найдена путем использования метода конечных элементов.

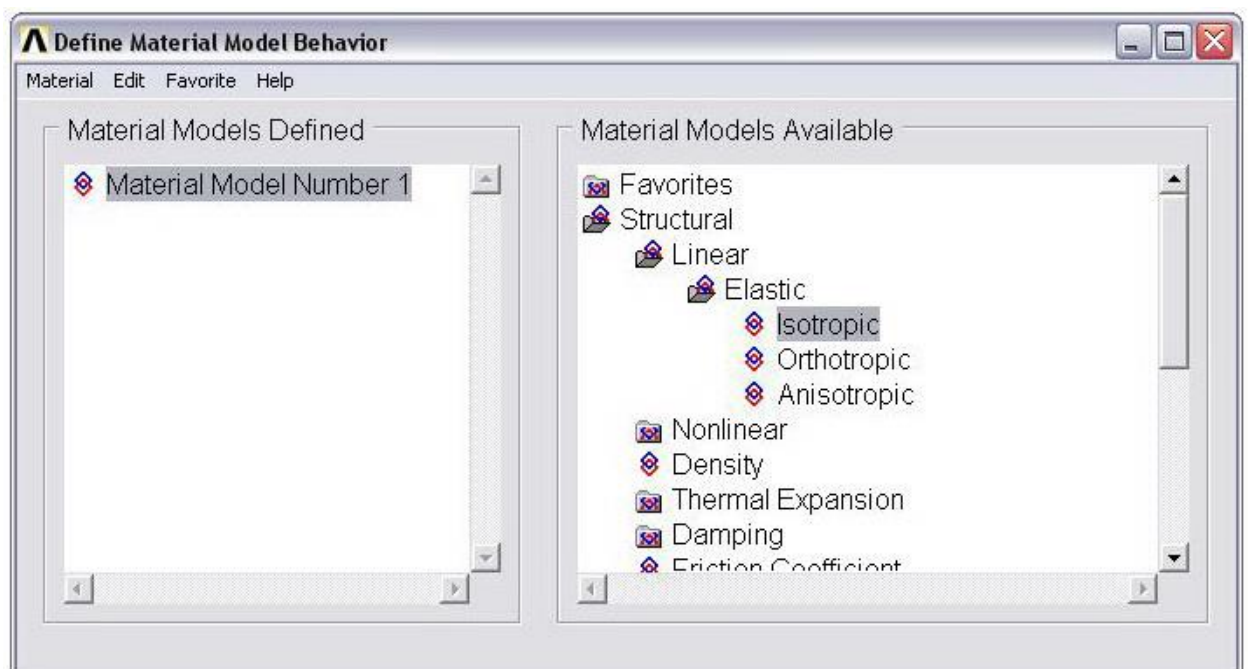
Расчет критических частот вращения роторов электрических машин с использованием конечно-элементного анализа будет выполнен по следующему алгоритму:

- создается геометрия ротора в CAD программе, для сокращения времени расчета строится часть ротора, исходя из условия симметрии;
- геометрия ротора импортируется в CAE программу (ANSYS);
- выбирается модуль для решения задачи Structural;
- выбирается тип конечного элемента Solid и Combin14;





- в свойствах конечного элемента Combin14 устанавливается параметр Longitude UY DOF (пружина растяжения-сжатия, работающая по оси OY);
- в Real constants для конечного элемента Conbin14 устанавливается найденная ранее жесткость подшипника;
- задаются свойства используемых материалов;

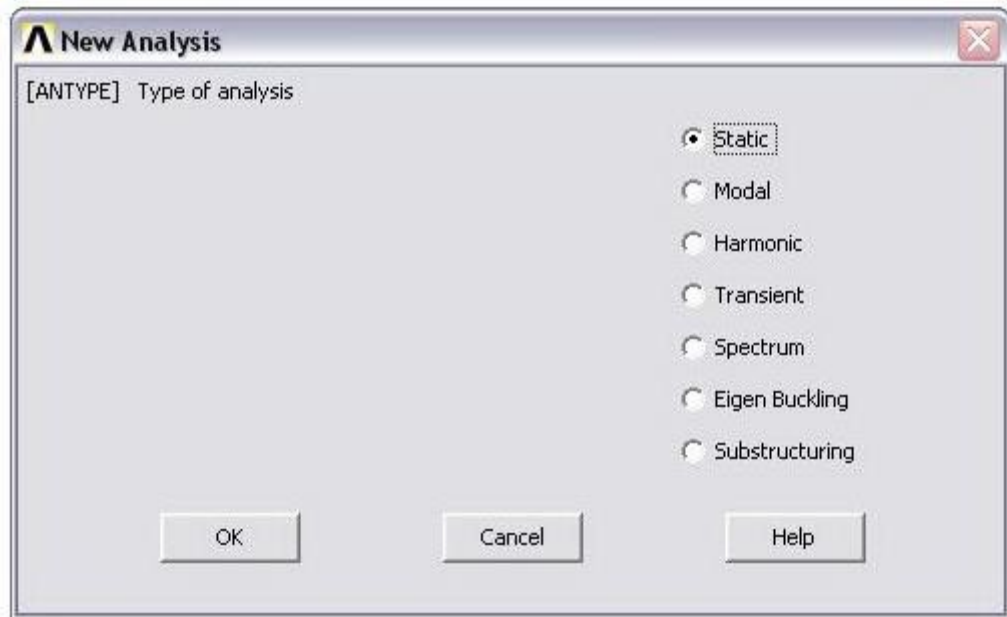


- задаются условия циклической симметрии;
- задаются размеры конечных элементов и наносится сетка;
- вычисляются номера узлов с координатами, которые соответствуют центрам подшипников и лежат на поверхности вала;

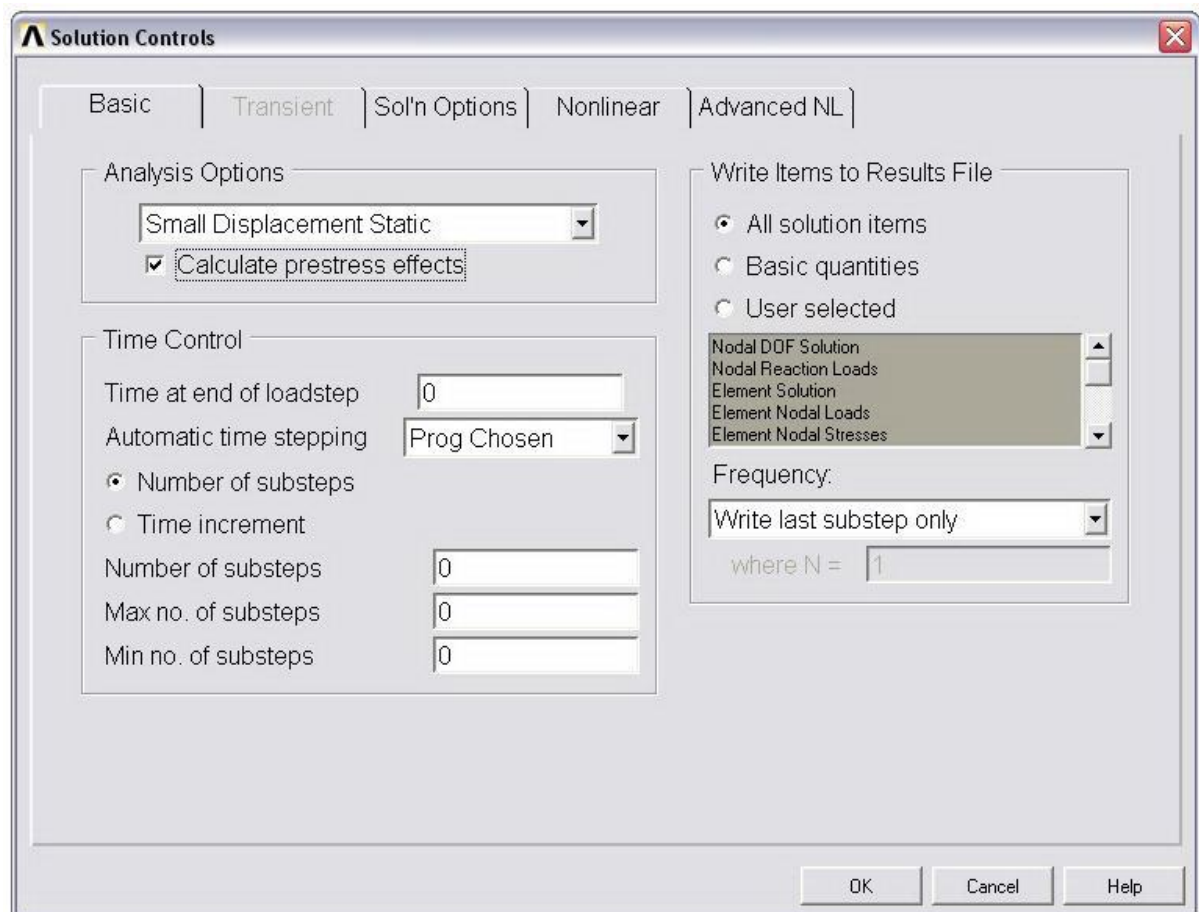
Utility menu: List \ Nodes

- в найденных узлах создаются элементы, которые будут моделировать действие подшипников;

- выбирается тип анализа Static;

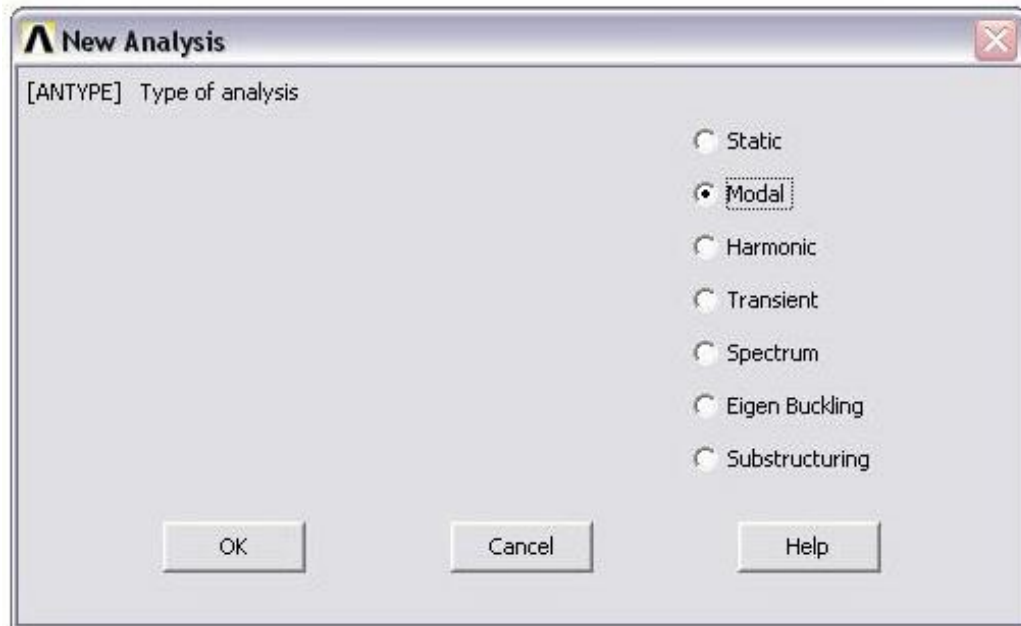


- в свойствах анализа задается сохранение напряженного состояния;



- перемещение ротора ограничивается вдоль оси Z;

- к модели ротора прикладывается сила, которая складывается из силы магнитного притяжения и силы от остаточной неуравновешенности ротора;
- выполняется анализ напряженно-деформированного состояния ротора;
- сохраняются результаты расчета;
- выбирается тип анализа Modal;



- задается необходимое количество критических частот с учетом найденных ранее предварительных механических напряжений;

**Modal Analysis**

[MODEPT] Mode extraction method

Block Lanczos  
 PCG Lanczos  
 Reduced  
 Unsymmetric  
 Damped  
 QR Damped  
 Supernode

No. of modes to extract:

(must be specified for all methods except the Reduced method)

---

[MXPAND]

Expand mode shapes:  Yes

NMODE No. of modes to expand:

Elcalc Calculate elem results?:  No

---

[LUMPM] Use lumped mass approx?:  No

[PSTRES] Incl prestress effects?:  Yes

OK Cancel Help

- указывается диапазон частот, в котором будут вычисляться критические частоты;
- выполняется расчет.

Традиционные методы расчета прогиба вала и критических частот вращения ротора электромеханических генераторов не учитывают множества факторов, оказывающих существенное влияние на результаты расчета. Среди этих факторов можно выделить сложную геометрию вала и конструктивных элементов, расположенных на нем, механические напряжения, определяемые характером сопряжения деталей на валу, податливость опор, несимметрия момента инерции вала, влияние гироскопического момента.

Для сравнения традиционных методов расчета [1, 85] с методом конечных элементов (МКЭ) выполнен расчет критической частоты ротора магнитоэлектрического генератора, рабочая частота вращения которого 8400 об/мин. Результаты расчетов представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3

	Расчет по методике [1], об/мин.	Расчет по методике [85], об/мин.	Расчет МКЭ, об/мин.	Экспериментальное исследование, об/мин.
Критическая частота вращения, об/мин	38510	41840	28000	30240

Из таблицы 3.3 видно, что компьютерные технологии на основе метода конечных элементов (МКЭ) за счет использования более совершенных математических моделей позволяют существенно повысить точность расчетов критических частот.

### **Выводы по главе**

- Разработана технология конечно-элементного анализа притяжения магнитов с учетом размерных цепей и уточнена аналитическая методика расчета сил притяжения многополюсных генераторов.
- 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 критической частоты.
- Представлено сравнение традиционных методов расчета критической частоты валов с методом конечных элементов.

## ГЛАВА 4. ОСОБЕННОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ.

### 4.1. Обзор существующих систем охлаждения.

Как отмечалось в предыдущей главе, при проектировании электрической машины тепловой расчет является функциональным ограничением, который показывает эффективность выбранной системы охлаждения и подтверждает возможность использования выбранных электромагнитных нагрузок. Система охлаждения проектируется как часть конструкции электрической машины, в которой конструктивные детали могут являться и деталями системы охлаждения. Это связано с необходимостью подачи хладагента не просто в машину, а к тепловыделяющим элементам машины.

Существуют следующие системы охлаждения [71, 85]:

- системы воздушного охлаждения, являются наиболее надежными, простыми и удобными. В качестве хладагента используется воздух.
  - естественное охлаждение, широко используется в машинах с кратковременным или повторно-кратковременным режимами работы;
  - самовентиляция, используется в машинах с длительным режимом работы, подача воздуха осуществляется вентилятором;
  - продув, охлаждение обеспечивается возникающим скоростным напором воздуха при полете, данное охлаждение имеет ограничения по высоте и скорости полета, среди систем воздушного охлаждения является самым эффективным;
- системы жидкостного охлаждения, по интенсивности значительно превосходят продув, обеспечивают работоспособность машины в тяжелых условиях и снижают ее массу. В качестве хладагента используется топливо, масло и спирто-водяные смеси.
  - испарительное, является самым эффективным охлаждением, в качестве хладагента широко используется спирто-водяная смесь, недо-

статком данного охлаждения является необходимость запаса большего объема жидкости;

- циркуляционное, в качестве хладагента используется масло;
- распылительное, в качестве хладагента используется масло;
- погружение в жидкость, в качестве хладагента используется топливо, недостатком данного охлаждения является необходимость наличия больших емкостей.



## **4.2. Охлаждение статоров электрических машин с постоянными магнитами.**

В электрических машинах с постоянными магнитами основными источниками тепловых потерь являются рабочая обмотка и сталь пакета якоря. В машинах с электромагнитным возбуждением к этим элементам добавляется еще обмотка возбуждения, располагаемая на роторе. В подобных машинах часто для охлаждения обмоток ротора вал выполняют полым, через который хладагент подается на обмотки ротора, тем самым охлаждая их. Одной из особенностей авиационных электрических машин с постоянными магнитами является отсутствие обмоток на роторе, что упрощает их конструкцию и разработку системы охлаждения.

Как отмечалось выше, статор электрической машины с магнитоэлектрическим возбуждением не отличается от статора электрической машины с электромагнитным возбуждением. Следовательно, существующие системы охлаждения статоров машин с электромагнитным возбуждением можно использовать для охлаждения машин с постоянными магнитами. В работе [1] рассматривается система жидкостного охлаждения, в которой статор выполняется с аксиальными каналами различной формы. При использовании такой системы охлаждения хладагент заполняет всю полость машины, что увеличивает необходимый объем хладагента, создает дополнительные гидравлические сопротивления и требует большого напора хладагента. В работе [71] рассматривается система охлаждения, в которой лобовые части обмотки статора закрыты герметизирующими полостями, а корпус машины имеет аксиальные каналы для прохождения хладагента, данная система представлена на рисунке 4.1.

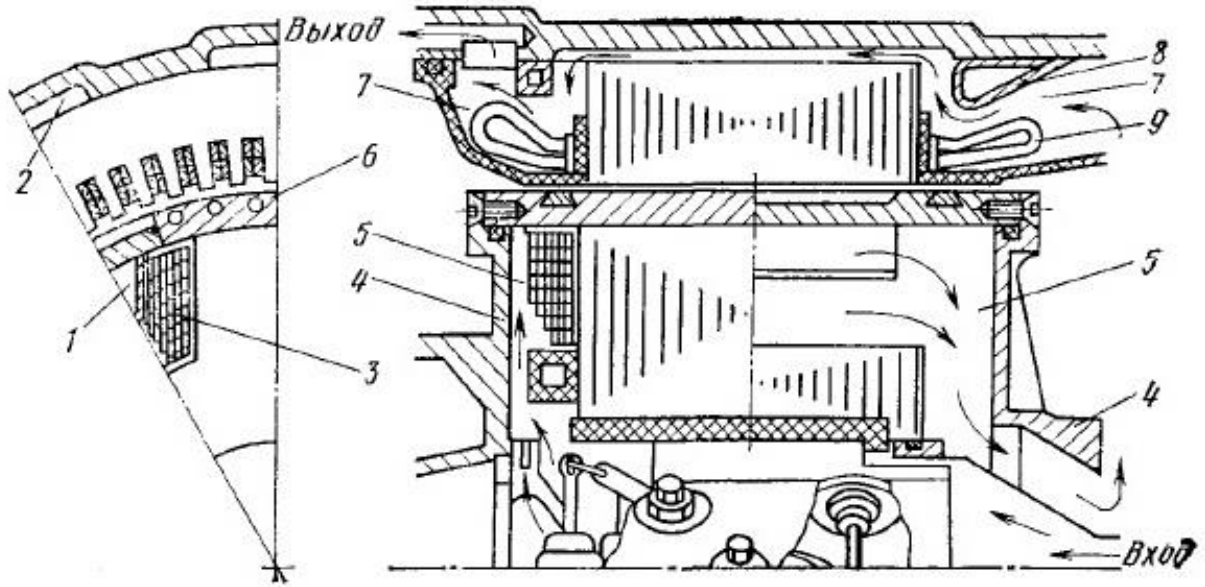


Рисунок 4.1 - Конструктивная схема синхронной машины с жидкостным полостным охлаждением: 1 - междупольный канал, 2 - аксиальный канал, 3 - обмотка возбуждения, 4 - цапфа, 5 - торцевая полость, 6 - бочка ротора, 7 - кольцевая полость, 8 - вытеснитель, 9 - обмотка якоря.

В такой системе хладагент контактирует с лобовыми частями обмотки статора и наружной поверхностью статора. При такой системе охлаждения тепловые потери от рабочей обмотки, которая является одним из основных источников тепловыделения, отводятся через пакет железа статора к его наружной поверхности, совершая длинный путь, что является недостатком данной системы охлаждения.

Указанный недостаток устраняется в предлагаемой системе охлаждения, которая разработана при участии автора [76]. Рассматриваемая система представляет собой статор с аксиальными каналами, формирователь потока хладагента и герметизирующие полости, в которых размещаются лобовые части обмотки статора. Центры аксиальных каналов располагаются на оси зубца у его основания. Размеры и расположение аксиальных каналов выбрано с учетом электромагнитных процессов в электрической машине. Форма и размеры формирователя потока были спроектированы из условия обеспечения равномерной скорости потока хладагента по всей длине гидравлического тракта с использованием конечно-элементного анализа. На рисунке 4.2 представлена конфигурация предлагаемой системы охлаждения.

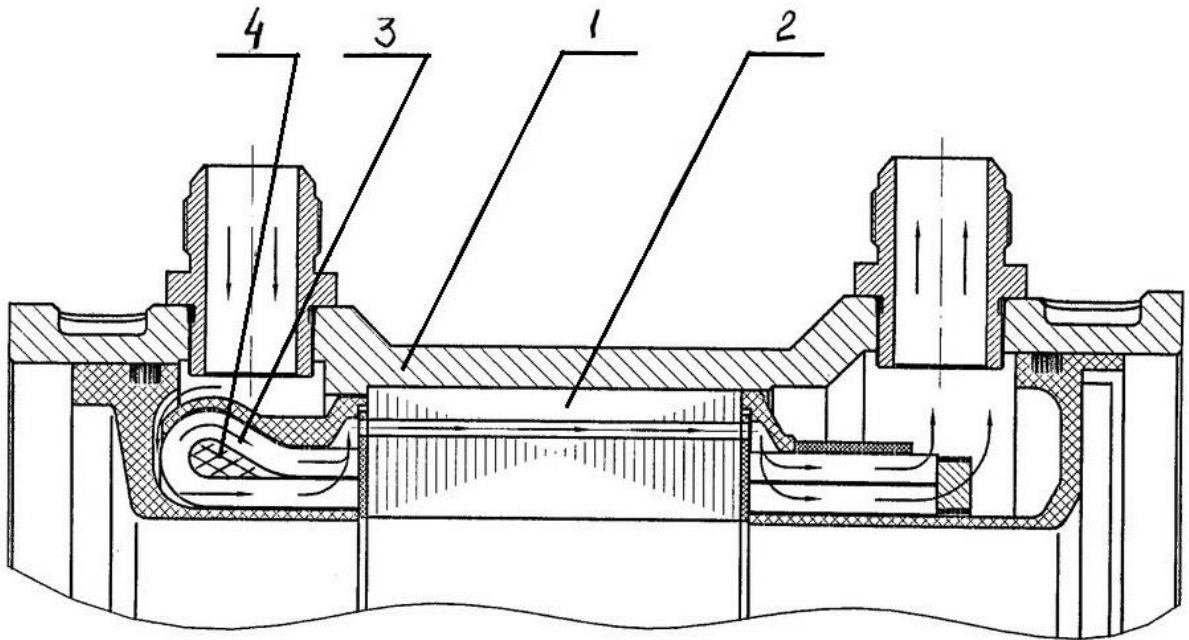


Рисунок 4.2 - Конструктивная схема статора синхронной машины с канальной системой охлаждения: 1 – корпус, 2 – магнитопровод, 3 – обмотка, 4 - формирователь потока.

Формирователь потока изготовлен из токонепроводящего материала. Это связано с тем, что использование магнитных материалов приводит к увеличению коэффициента магнитного рассеяния лобовых частей обмоток, а токопроводящего - к увеличению потерь на вихревые токи в формирователе.

### 4.3. Анализ теплового состояния роторов электрических машин с постоянными магнитами.

В настоящее время в электрических машинах широкое распространение получили постоянные магниты на основе редкоземельных сплавов Sm-Co и Nd-Fe-B, отличающиеся высокой коэрцитивной силой и отсутствием возможности их размагничивания током короткого замыкания электрической машины [88, 94, 95]. Одним из недостатков таких магнитов является их размагничивание при действии тепловых нагрузок, превышающих максимальную рабочую температуру. На рисунках 4.3 – 4.4 представлены изменения характеристик постоянных магнитов в зависимости от их температуры. Поэтому при проектировании машин с постоянными магнитами необходимо выполнять анализ теплового состояния ротора.

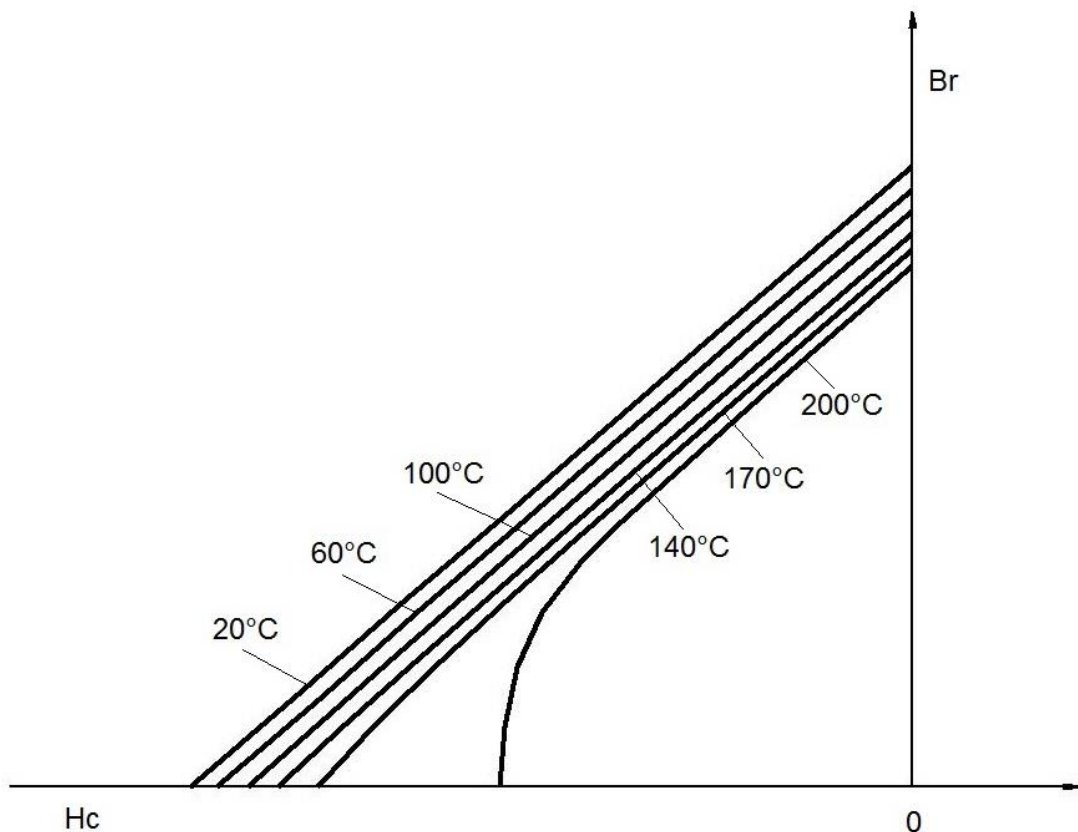


Рисунок 4.3 Изменение характеристик постоянного магнита Nd-Fe-B в зависимости от его температуры.

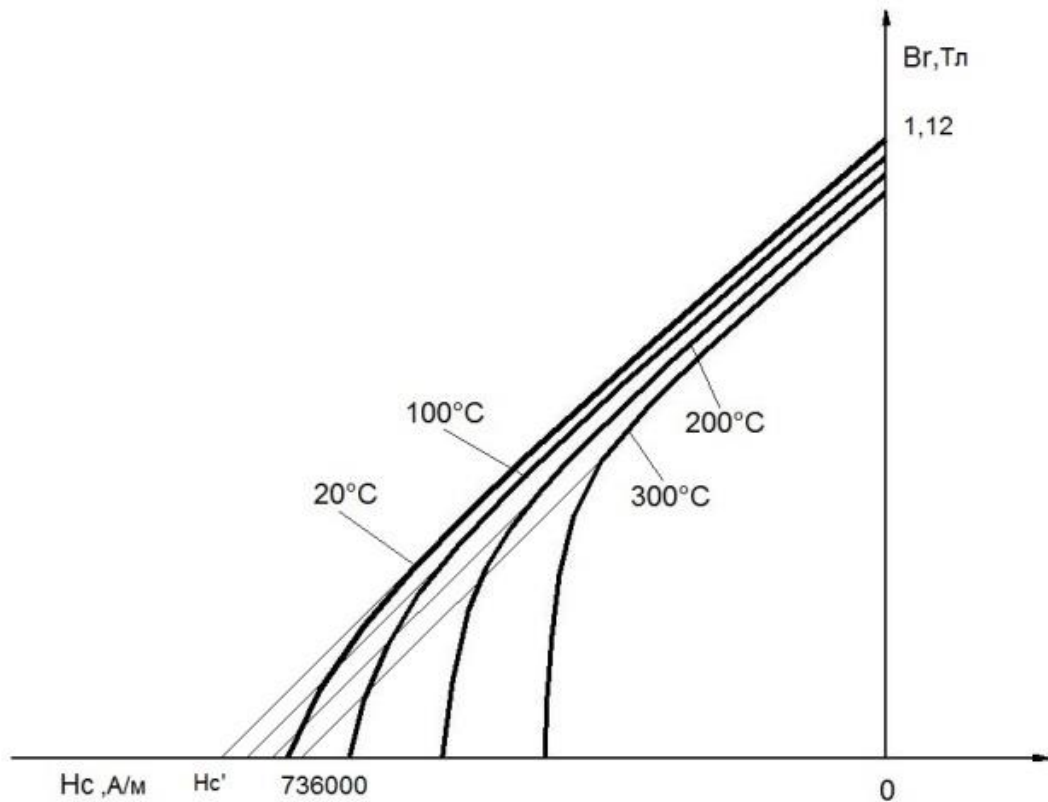


Рисунок 4.4 Изменение характеристик постоянного магнита Sm-Co в зависимости от его температуры.

Разработана методика расчета нагрева ротора с постоянными магнитами (рисунок 4.5).



Рисунок 4.5 – Алгоритм теплового расчета ротора с постоянными магнитами.

Одним из основных источников тепловыделений в роторе с постоянными магнитами являются поверхностные потери в его обойме. Они вызываются колебаниями магнитного поля в поверхностном слое обоймы из-за наличия пазов на статоре. Эти колебания поля происходят с большой частотой

$$f_z = \frac{zn}{60} \quad (4.1)$$

где  $Z$  – число пазов статора,  $n$  – частота вращения машины. Возникающие потери зависят от амплитуды колебаний индукции, которая возрастает с уменьшением зазора и увеличением открытия паза. Кроме того, они зависят от толщины листов, из которых собрана обойма, проницаемости материала обоймы, его удельного сопротивления [89].

Расчет теплового состояния ротора представляет собой связанный электромагнитный и тепловой расчет. В электромагнитном анализе вычисляются потери от вихревых токов в обойме ротора и магнитах. Далее эти потери используются в качестве источников тепловыделений в тепловом расчете, задачей которого является определить температуру нагрева постоянных магнитов. Расчет теплового состояния ротора с использованием конечно-элементного анализа следующий:

- создается электрическая машина в программном модуле RMXprt, который входит в программу Ansoft Maxwell;
- выбирается тип машины;
- задается число полюсов, тип ротора – внешний/внутренний, тип обмотки, генератор/двигатель, частота вращения;
- задаются параметры статора;
- задаются параметры ротора;
- выполняется расчет;
- созданная машина импортируется в Maxwell 3D;
- проверяются свойства материалов;
- будет моделироваться часть машины, задаются граничные условия симметрии;

- задается электрическая проводимость постоянных магнитов;
- задается электрическая проводимость материала обоймы;

**View / Edit Material**

Material Name: titanium

Material Coordinate System Type: Cylindrical

Properties of the Material

Name	Type	Value	Units
Relative Permeability	Simple	1.00018	
Bulk Conductivity	Simple	1820000	siemens/m
Magnetic Coercivity	Vector		
- Magnitude	Vector Mag	0	A_per_meter
Core Loss Type		None	w/m^3
Mass Density	Simple	4500	kg/m^3
Composition		Solid	

View/Edit Material for:

- Active Design
- This Product
- All Products

View/Edit Modifier for:

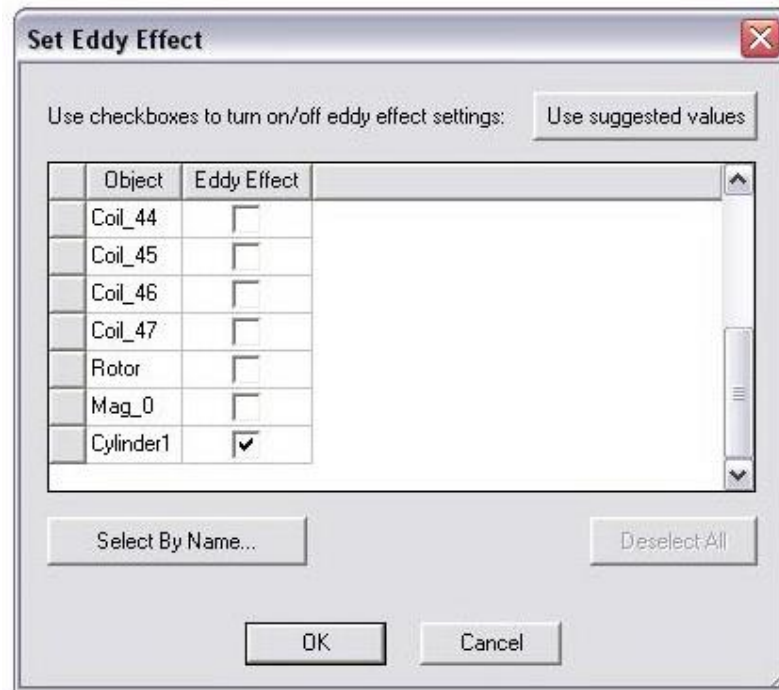
- Thermal Modifier

Validate Material

Calculate Properties for:

Reset OK Cancel

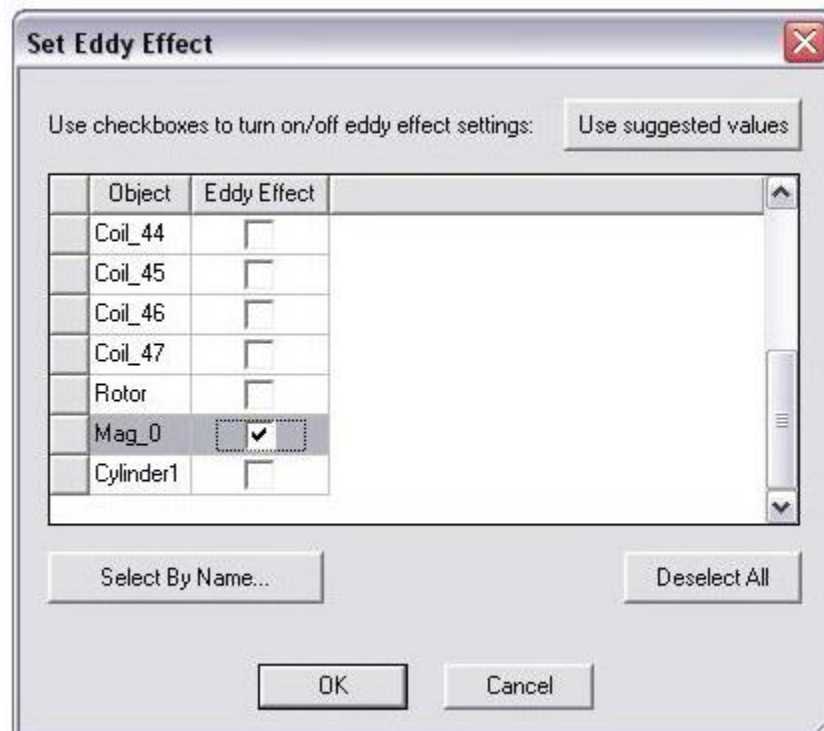
- задается учет вихревых токов в обойме;



- в свойствах материала статора указывается ось, по направлению которой выполнена шихтовка;

- выполняется расчет потерь в обойме;

- задается учет вихревых токов в магнитах;



- выполняется расчет потерь в магнитах;

- сохраняются результаты расчета;



- создается 3D модель ротора в CAD программе: создается часть ротора исходя из условия тепловой симметрии;

- для моделирования используется приложение Thermal Analysis программы COSMOSWorks;

- задаются граничные условия;

- задаются источники тепла;

- строится сетка конечных элементов;

- выполняется расчет.

Для анализа теплового состояния ротора объектом исследования был выбран синхронный генератор мощность 3 кВА.

Номинальные данные синхронного генератора мощность 3 кВА:

- число фаз  $m=3$ ,

- частота вращения  $n=32500$  об/мин.,

- число полюсов  $2p=8$ ,

- постоянные магниты КС25ДЦ.

На рисунке 4.6 представлен график зависимости потерь в обойме ротора от величины открытия паза статора, построенный для синхронной машины мощность 3 кВА с немагнитной (массивной) обоймой ротора.



Рисунок 4.6 - График зависимости потерь в обойме от ширины пазовой щели.

Проведем анализ влияния типа обоймы на величину возникающих в ней потерь. При проведении исследования меняется тип обоймы ротора и как следствие - материал обоймы, остальные параметры машины остаются неизменными. При проведении анализа используются стандартные программы конечно-элементного исследования. Для сокращения времени расчета будет моделироваться часть машины, используя периодические граничные условия. Задача будет решаться в 3d постановке для замыкания вихревых токов. Для анализа будет использована немагнитная шихтованная обойма, немагнитная массивная обойма, биметаллическая обойма и обойма со слоистой магнитно-немагнитной структурой. При расчете потерь в шихтованной обойме, будет принято, что изоляция между листами идеальная, поэтому поверхностные потери будут вычисляться в одном листе, а затем они будут умножены на длину пакета ротора. На рисунках 4.7-4.10 представлены результаты теплового расчета ротора с указанными типами обойм.

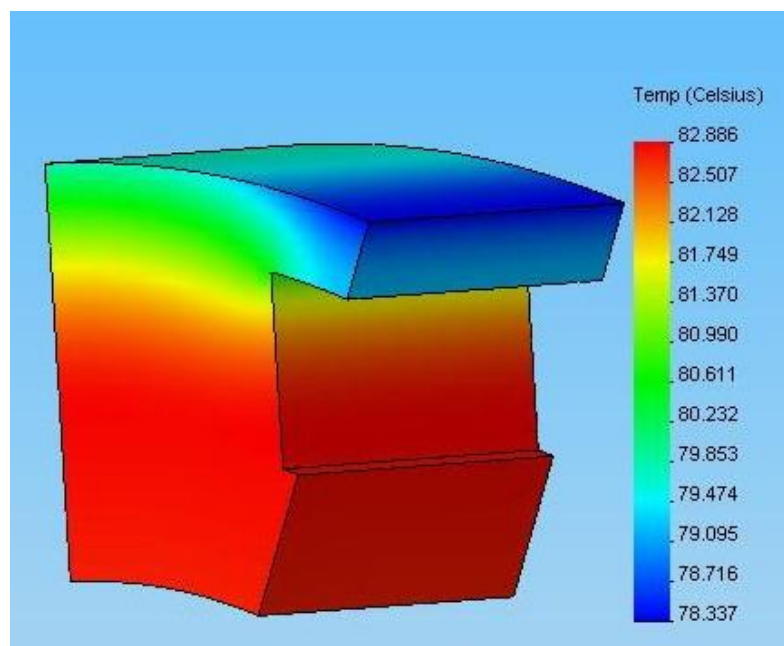


Рисунок 4.7 - Результаты теплового расчета ротора с немагнитной шихтованной обоймой.

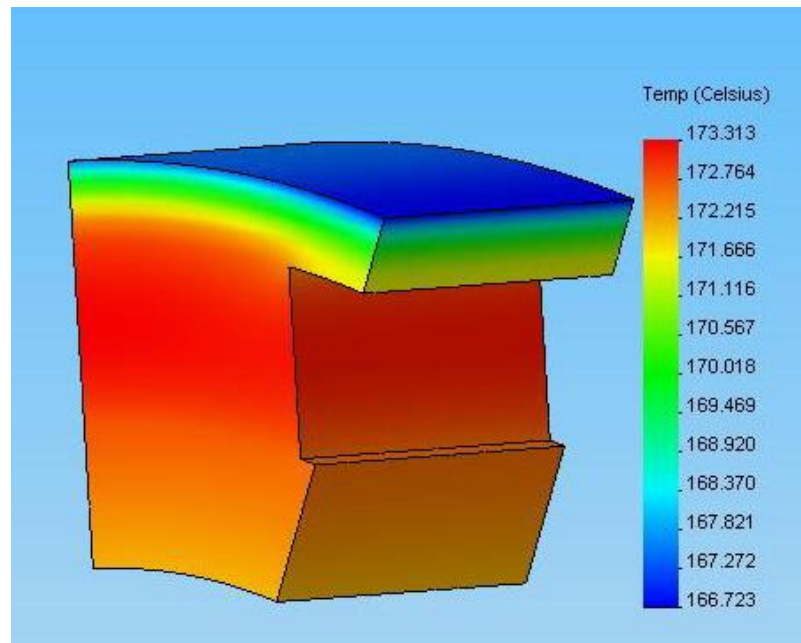


Рисунок 4.8 - Результаты теплового расчета ротора с немагнитной массивной обоймой.

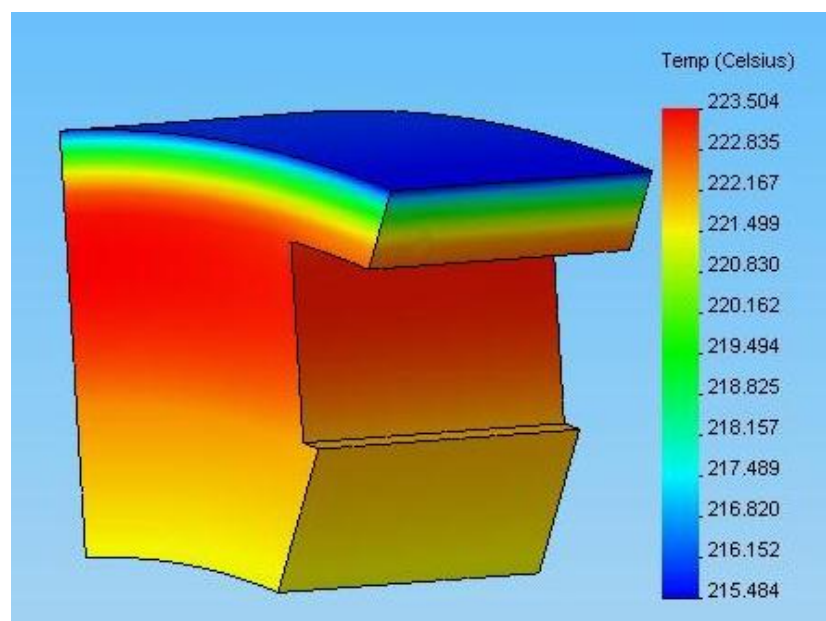


Рисунок 4.9 - Результаты теплового расчета ротора с биметаллической обоймой.

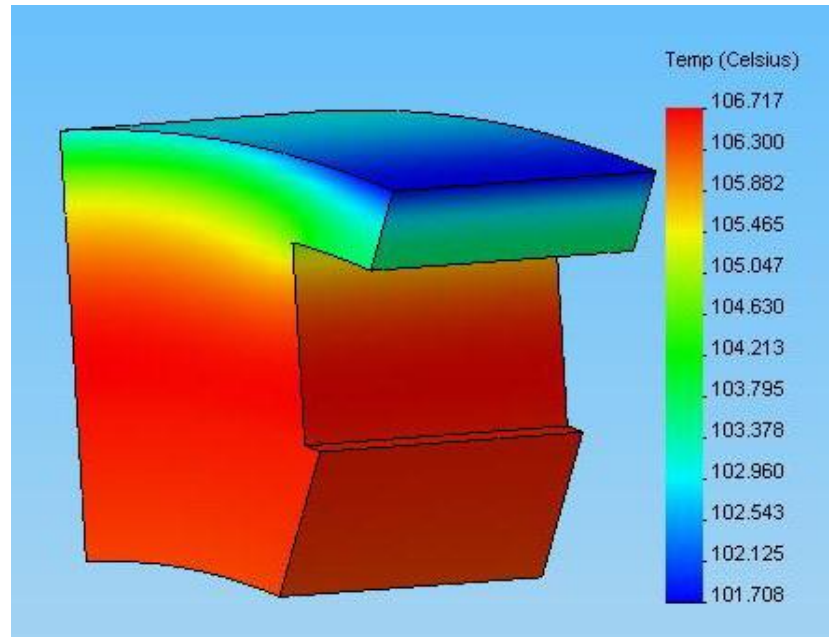


Рисунок 4.10 - Результаты теплового расчета ротора со слоистой магнитно-немагнитной структурой обоймы.

В таблице 4.1 представлены усредненные объемные потери, возникающие в рассматриваемых типах обойм и температуры нагрева постоянных магнитов при использовании рассматриваемых обойм.

Таблица 4.1

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 4.1 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.

### **Выводы по главе**

- Разработана система жидкостного канального охлаждения статора синхронной электрической машины, позволяющая повысить плотность тока в обмотке статора.
- Разработан алгоритм теплового расчета ротора с постоянными магнитами на базе универсальных программ конечно-элементного анализа.
- Представлены значения поверхностных потерь в обоямах роторов, обусловленных зубчатостью статора и температуры нагрева постоянных магнитов. По результатам теплового расчета ротора необходим пересчет электромагнитных параметров машины с учетом характеристики магнита, которую он имеет при данной температуре.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты и выводы могут быть сведены к следующему:

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 критической 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.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

- $S_n$  - полная мощность генератора;
- $n_p$  - расчетная частота вращения;
- $n_{\max}$  - максимальная частота вращения;
- $m$  - число фаз обмотки якоря;
- $p$  - число пар полюсов;
- $U_\phi$  - фазное напряжение генератора;
- $\cos\varphi$  - коэффициент мощности;
- $E_{отн}$  - относительное значение ЭДС;
- $A$  - линейная нагрузка якоря;
- $B_\delta$  - индукция в рабочем зазоре;
- $\alpha_i$  - расчетный коэффициент полюсного перекрытия;
- $k_B$  - коэффициент формы ЭДС;
- $k_o$  - обмоточный коэффициент якоря;
- $V_{\max}$  - максимальная окружная скорость ротора;
- $\delta$  - величина рабочего зазора;
- $f_p$  - расчетная частота напряжения;
- $f_{\max}$  - максимальная частота напряжения;
- $S_p$  - расчетная электромагнитная мощность;
- $\sigma_u$  - коэффициент использования генератора;
- $D$  - диаметр расточки якоря;
- $\lambda$  - конструктивный коэффициент генератора;
- $l_\delta$  - активная осевая длина;
- $\tau$  - полюсное деление;
- $D_p$  - наружный диаметр ротора;

$q$  - число пазов на полюс и фазу;

$У_{отн}$  - относительный шаг обмотки якоря;

$a_1$  - число параллельных ветвей обмотки якоря;

$j$  - плотность тока в обмотке якоря;

$z$  - число зубцов (пазов) якоря;

$t_z$  - зубцовое деление якоря;

$\tau_z$  - число пазов якоря на полюсном делении;

$У_z$  - шаг обмотки якоря по пазам;

$У_{отн.ум}$  - уточненный относительный шаг обмотки якоря;

$k_p$  - коэффициент распределения обмотки якоря;

$k_y$  - коэффициент укорочения обмотки якоря;

$k_{о.ум}$  - уточненный обмоточный коэффициент якоря;

$\varepsilon_{k_o}$  - рассогласование по обмоточному коэффициенту;

$I_\phi$  - ток фазы якоря;

$w_{\phi.пр}$  - предварительное число витков фазы якоря;

$N_{эф}$  - эффективное число проводников в пазу якоря;

$w_\phi$  - уточненное число витков фазы якоря;

$A_{ум}$  - уточненная линейная нагрузка якоря;

$\varepsilon_A$  - рассогласование по линейной нагрузке якоря;

$q_{эф}$  - сечение эффективного проводника обмотки якоря;

$B_{z.max}$  - максимальная индукция в зубце якоря;

$B_{я.max}$  - максимальная индукция в ярме якоря;

$k_{зс}$  - коэффициент заполнения пакета якоря сталью;

$\gamma_\Phi$  - коэффициент вытеснения магнитного потока;



$h_{yc}$  - высота усика зубца якоря;

$h_{кл}$  - высота клиновой части паза якоря;

$\delta_{ин}$  - толщина пазовой изоляции якоря на сторону;

$\delta_{ик}$  - толщина катушечной изоляции якоря на сторону;

$\delta_{нр}$  - толщина изоляции провода обмотки якоря;

$\delta_{мп}$  - толщина междуслойной прокладки якоря;

$\delta_{дп}$  - толщина прокладки на дно паза;

$n_b$  - число проводников в пазу по ширине паза якоря;

$a_2$  - число параллельных проводников обмотки якоря;

$\Phi_\delta$  - магнитный поток через рабочий зазор;

$b_{z.min.нр}$  - предварительная минимальная ширина зубца якоря;

$b_{п.нр}$  - предварительная ширина паза якоря;

$N_{эл}$  - число элементарных проводников в пазу якоря;

$n_h$  - число проводников в пазу по высоте паза;

$b_{нр}$  - предварительная ширина неизолированного проводника обмотки якоря;

$q_{м.нр}$  - предварительное сечение неизолированного проводника обмотки якоря;

$a \times b$  - размеры неизолированного проводника обмотки якоря (ГОСТ);

$q_m$  - уточненное сечение неизолированного проводника обмотки якоря;

$b_n$  - уточненная ширина паза якоря;

$b_{z.min}$  - уточненная минимальная ширина зубца якоря;

$B_{z.max.ум}$  - уточненная максимальная индукция в зубце якоря;

$j_{ум}$  - уточненная плотность тока в обмотке якоря;

$h_n$  - высота паза якоря;

$h_{н.отн}$  - относительная высота паза якоря;

$h_z$  - высота зубца якоря;

$h_я$  - высота ярма якоря;

$D_n$  - наружный диаметр якоря;

$T_p$  - рабочая температура обмотки якоря;

$b_{ш}$  - ширина шлица паза якоря;

$\tau_y$  - ширина секции обмотки якоря;

$t_c$  - расстояние между осями соседних секционных сторон при выходе их из паза;

$b_k$  - ширина катушки обмотки якоря;

$t_l$  - расстояние между осями соседних секционных сторон в лобовой части;

$\alpha_c$  - угол поворота секции;

$h_k$  - высота катушки обмотки якоря;

$l_l$  - средняя длина лобовой части обмотки якоря;

$l_v$  - вылет лобовой части обмотки якоря;

$l_w$  - средняя длина витка обмотки якоря;

$R_{ят}$  - активное сопротивление фазы обмотки якоря при рабочей температуре;

$\lambda_n$  - удельная проводимость рассеяния паза якоря;

$\lambda_l$  - удельная проводимость рассеяния лобовых частей обмотки якоря;

$\lambda_d$  - удельная проводимость дифференциального рассеяния якоря;

$\Sigma\lambda$  - суммарная удельная проводимость рассеяния якоря;

$X_s$  - индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки якоря;

$E_{отн.ут}$  - уточненное относительное значение ЭДС

$\varepsilon_{E_{отн}}$  - рассогласование по относительному значению ЭДС;

$H_z = f(B_z)$  - основная кривая намагничивания стали якоря;

$H_{я} = f(B_{я})$  - кривая намагничивания стали для ярма якоря;

$k_{\delta}$  - коэффициент рабочего зазора;

$\delta'$  - приведенный рабочий зазор;

$b_{z.p}$  - расчетная ширина зубца якоря;

$L_{я}$  - средняя длина силовой линии в ярме якоря;

$U_{\delta}$  - падение магнитного потенциала в рабочем зазоре;

$B_{z.p}$  - индукция в расчетном сечении зубца якоря;

$H_{z.p}$  - напряженность магнитного поля в расчетном сечении зубца якоря;

$U_z$  - падение магнитного потенциала в зубце якоря;

$H_{я}$  - расчетная напряженность магнитного поля в ярме якоря;

$U_{я}$  - падение магнитного потенциала в ярме якоря;

$U_a$  - падение магнитного потенциала в якоре;

$k_s$  - коэффициент магнитной цепи якоря;

$B_r$  - остаточная индукция магнита;

$h_m$  - высота магнита индуктора;

$b_m$  - ширина магнита индуктора;

$\delta_{об}$  - толщина обоймы;

$M_m$  - масса магнитов индуктора;

$M_{об}$  - масса обоймы;

$R_m$  - радиус центра тяжести магнитов индуктора;

$R_{об}$  - радиус центра тяжести обоймы;

$F_m$  - центробежная сила, действующая на магниты индуктора;

$F_{об}$  - центробежная сила, действующая на обойму;

- $\sigma_{об}$  - механическое напряжение в обойме;
- $\alpha_{i.ym}$  - уточненный расчетный коэффициент полюсного перекрытия;
- $k_{B.ym}$  - уточненный коэффициент формы ЭДС;
- $k_{ad}$  - коэффициент продольной реакции якоря;
- $k_{aq}$  - коэффициент поперечной реакции якоря;
- $B_{\delta.xx}$  - индукция в рабочем зазоре в режиме холостого хода;
- $k_{\sigma}$  - коэффициент рассеяния индуктора;
- $\varepsilon_{\alpha_i}$  - рассогласование по расчетному коэффициенту полюсного перекрытия;
- $\varepsilon_{k_B}$  - рассогласование по коэффициенту формы ЭДС;
- $X_{ad}$  - главное индуктивное сопротивление якоря по продольной оси;
- $X_{aq}$  - главное индуктивное сопротивление якоря по поперечной оси;
- $X_d$  - полное индуктивное сопротивление якоря по продольной оси;
- $X_q$  - полное индуктивное сопротивление якоря по поперечной оси;
- $\Psi$  - угол размагничивания;
- $E_{\delta}$  - расчетная ЭДС генератора;
- $E_q$  - поперечная составляющая расчетной ЭДС;
- $E_d$  - продольная составляющая расчетной ЭДС;
- $E_{ad}$  - ЭДС продольной реакции якоря;
- $E_{0.вд}$  - ЭДС холостого хода по векторной диаграмме;
- $E_{0.м}$  - ЭДС холостого хода по диаграмме состояния магнита;
- $\varepsilon_{E_0}$  - рассогласование по ЭДС холостого хода;
- $B_{яи.max}$  - максимальная индукция в ярме индуктора;
- $\Phi_{\sigma}$  - магнитный поток рассеяния индуктора;
- $\Phi_m$  - полный магнитный поток индуктора;

$h_{яи}$  - высота ярма индуктора;

$M_{яи}$  - масса ярма индуктора;

$M_z$  - масса зубцов якоря;

$M_я$  - масса ярма якоря;

$M_n$  - масса пакета якоря;

$M_{оя}$  - масса обмотки якоря;

$M_{ая}$  - масса активных материалов якоря;

$M_{аи}$  - масса активных материалов индуктора;

$M_a$  - масса активных материалов генератора;

$M_k$  - масса конструктивных материалов генератора;

$M_g$  - масса генератора;

$m_{уд}$  - удельная масса генератора;

$P_{оя}$  - потери в обмотке якоря;

$P_{ст}$  - потери в стали якоря;

$P_{тр}$  - потери на трение ротора о воздух;

$P_{об}$  - потери в обойме индуктора;

$\Delta P$  - сумма потерь в генераторе;

$\eta$  - КПД генератора.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Алексеев А.Е. Конструкция электрических машин. – М.: Госэнергоиздат, 1958.
2. Алямовский А. А. и др. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005.
3. Аветисян Д.А. Основы автоматизированного проектирования электромеханических преобразователей. – М.: Высшая школа, 1998.
4. Автоматизированное проектирование электрических машин: Учеб. пособие. / Ю.Б. Бородулин, В.С. Мостейкис, Г.В. Попов, В.П. Шишкин: Под ред. Ю.Б. Бородулина. – М.: Высш. шк., 1989.
5. Алексеев И. И., Зечихин Б. С., Клейман М. Г., Старовойтова Н. П. Особенности электромагнитного расчета генераторов с редкоземельными постоянными магнитами. – Электричество, 1985, № 11.
6. Андреев В. Г., Зечихин Б. С., Радько М. С. Бесконтактные синхронные генераторы с внутризамкнутым магнитопроводом. – М.: МАИ, 1970.
7. Базаров В. Н. Тепловые процессы в электромеханических преобразователях энергии ЛА – М.: Издательство МАИ, 1991.
8. Балагуров В. А., Галтеев Ф. Ф., Ларионов А. Н. Электрические машины с постоянными магнитами. – М.: Энергия, 1964.
9. Басов К.А. ANSYS: справочник пользователя. – М.: ДМК Пресс, 2005.
10. Бертинов А. И. Авиационные электрические генераторы. – М.-Л.: Оборонгиз, 1959.
11. Беспалов В. Я., Котеленец Н. Ф. Электрические машины: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. Изд. 2-е, испр. – М.: «Академия», 2006.
12. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: Учебник. – 9-е изд. – М.: Гардарики, 2001.
13. Бинс К., Лоуренсон П. Анализ и расчет электрических и магнитных полей. – М.: Энергия, 1970.

14. Брускин Д.Э., Зубакин С.И. Самолеты с полностью электрифицированным оборудованием // Итоги науки и техники. Сер. Электрооборудование транспорта. М.: ВИНТИ. – 1986. – Т.6 – 108 с.
15. Брускин Д.Э., Синдеев И.М. Электроснабжение ЛА. – М.: Высшая школа, 1988. – 262с: ил.
16. Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Программа ANSYS: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. - М.: Издательский центр "Академия", 2006.
17. Бут Д. А. Бесконтактные электрические машины: Учеб. пособие для электромех. и электроэнерг. спец. вузов. – М.: Высшая школа, 1990.
18. Вибрация энергетических машин. Справочное пособие. Под ред. д-ра техн. наук проф. Н.В. Григорьева. Л.: «Машиностроение», (Ленингр. отделение), 1974, 464с.
19. Видеман Е., Келленбергер В. Конструкции электрических машин. Сокр. пер. с нем. Под ред. Б. Н. Красовского. – Л.: Энергия, 1972.
20. Волокитина Е.В., Головизнин С.Б. Полностью электрифицированный самолет – от концепции до реализации // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2007. – №1. – с. 2-5.
21. Вольдек А. И. Электрические машины. Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. Изд. 2-е, перераб. и доп. – Л.: Изд-во «Энергия», 1974.
22. Воронович С., Каргопольцев В., Кутахов В. Полностью электрический самолет. Современное состояние и перспективы развития // «Авиапанорама». – март-апрель 2009. – с. 14-17.
23. Геминтерн В.И., Нахимкин А.М., Радина Е.В. Системы автоматизированного проектирования электрических машин. – М: Энергоатомиздат, 1991.
24. Гольдберг О. Д., Свириденко И. С. Инженерное проектирование и САПР электрических машин: учебник для студ. высш. учеб. заведений. Под ред. О.Д. Гольдберга. – М.: Академия, 2008.

25. Гольдин А.С. Вибрация роторных машин. М.: Машиностроение, 1999, 344 с.
26. Готтер Г. Нагревание и охлаждение электрических машин. (Пер. с нем.) Под ред. В.В. Мальцева // М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961.
27. Демирчян К. С., Чечурин В. Л. Машинные расчеты электромагнитных полей: Учеб. пособие для электротехн. и энерг. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1986.
28. Детинко Ф.М., Загородная Г.А., Фастовский В.М. Прочность и колебания электрических машин. Л.: «Энергия», 1969
29. Домбровский В. В. Справочное пособие по расчету электромагнитного поля в электрических машинах. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1983.
30. Журавлев С. В., Зечихин Б. С., Куприянов А. Д. Компьютерные технологии проектирования ЭМП с РЗМ. – 3-я международная конференция «Авиация и космонавтика – 2004». 1-4 ноября 2004 года. Москва. Тезисы докладов. – М.: Изд-во МАИ, 2004.
31. Журавлев С. В., Зечихин Б. С., Ситин Д. А. Магнитные системы электрических машин с повышенной частотой вращения. Современные технологии в задачах автоматизации, управления и обработки информации. Труды XVI международного научно-технического семинара в г. Алушта. СПб.: ГУАП, 2008.
32. Зечихин Б. С., Чварков Э.А. Автоматизированный расчет синхронного генератора с постоянными магнитами: Учебное пособие. – М.: Изд-во МАИ, 1991.
33. Зечихин Б.С. Автоматизированный расчет авиационного синхронного генератора. – М.: Изд-во МАИ, 1989. – 64 с.: ил.
34. Зечихин Б.С. Электрические машины летательных аппаратов. Гармонический анализ активных зон. – М.: Машиностроение, 1983. – 149с: ил.
35. Зечихин Б. С., Куприянов А. Д. Автоматизированное проектиро-



вание магнитоэлектрических генераторов с приводом от газовой турбины. - Перспективы развития электроэнергетических комплексов летательных аппаратов. Научно-методические материалы под редакцией С.П. Халютина. – М.: Изд-во ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 2003.

36. Зечихин Б. С., Куприянов А. Д., Сыроежкин Е. В. Автоматизированное проектирование бесконтактных синхронных машин. – Электричество, 2002, № 5.

37. Зечихин Б. С., Куприянов А. Д. Исследование магнитного поля активной зоны синхронных двигателей с редкоземельными постоянными магнитами. – Радиоэлектроника и электротехника в народном хозяйстве. Ежегодная научно-техническая конференция студентов и аспирантов вузов России. Тезисы докладов. В 2-х томах. Том 2. – М: Изд-во МЭИ, 1998.

38. Зечихин Б. С., Ситин Д. А. Автоматизированное проектирование электродвигателей для компрессорных установок. – Современные технологии в задачах автоматизации, управления и обработки информации. Труды XVI международного научно-технического семинара в г. Алушта. Тула, изд. ТулГУ, 2007.

39. Зечихин Б. С., Старовойтова Н. П. Автоматизированное проектирование синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением. Учебное пособие. – М.: Изд-во МАИ, 1989.

40. Зечихин Б.С., Старовойтова Н.П. Исследование магнитного поля возбуждения в активной зоне генератора с тангенциальными постоянными магнитами. – Труды МАИ – Исследование магистральных и автономных преобразователей бортовых энергетических систем. – М.: МАИ, 1979, вып.475, с.33-37.

41. Зечихин Б.С., Старовойтова Н.П., Цыбакова О.Ю. Электромагнитные поля и параметры синхронных машин с редкоземельными постоянными магнитами без полюсных наконечников. Электромеханика, 1988, №5, с.35-42.

42. Зечихин Б.С., Тимершин Ф.Г. Исследование магнитного поля в активном зазоре синхронной машины с постоянными магнитами. – Электромеханика, 1988, №5, с.43-47.

ханика, Изв. ВУЗов, 1977, №1, с.30-39.

43. Зонтов В. М., Куприн Б. В. Системы электроснабжения летательных аппаратов. ВВИА Н. Е. Жуковского, 1988.

44. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины: Учеб. для вузов в 2-х томах. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006.

45. Иванов-Смоленский А. В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах: Учеб. пособие для вузов по спец. «Электромеханика». – М.: Высш. шк., 1989.

46. Иванов-Смоленский А. В., Абрамкин Ю. В., Власов А. И., Кузнецов В. А. Универсальный метод расчета электромагнитных процессов в электрических машинах. / Под ред. А. В. Иванова-Смоленского. – М.: Энергоатомиздат, 1986.

47. Исакович М. М. и др. Устранение вибраций электрических машин. «Энергия», Л., 1969.

48. Каплун А. Б., Морозов Е. М., Олферьева М. А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. – М.: Едиториал УРСС, 2003.

49. Кельзон А.С., Журавлев Ю.Н., Январев Н.В. Расчет и конструирование роторных машин. Л., «Машиностроение» (Ленинград. отд-ние), 1977. – 288 с.

50. Копылов И. П. Электрические машины: Учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. – М.: Высшая школа; Логос; 2000.

51. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин: Учеб. для вузов. – М.: Высшая школа, 1994.

52. Копылов И. П., Клоков Б. К., Морозкин В. П., Токарев Б. Ф. Проектирование электрических машин: Учеб. пособие для вузов / Под ред. И.П. Копылова. – М.: Высшая школа, 2005.

53. 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.

54. Кузьмичев Р.В., Зечихин Б.С. Генератор системы электроснабжения полностью электрифицированного самолета. XVI Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». Тезисы докладов. т.2. – М.: МЭИ. 2010 г.
55. Кулебакин В. С., Морозовский В. Т., Синдеев И. М. Электроснабжение самолетов. М.: Оборонгиз, 1956.
56. Куликов Н. И., Суханов А. Б. Компонировочные работы при конструировании электромеханических преобразователей энергии летательных аппаратов. Учебное пособие. – М.: МАИ, 2004.
57. Куликов Н. И., Суханов А. Б. Конструирование электромеханических преобразователей энергии летательных аппаратов. Учебное пособие. – М.: МАИ, 2004.
58. Куприянов А.Д. Автоматизированное проектирование электромеханических преобразователей с возбуждением от редкоземельных постоянных магнитов. - Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Москва, 2004.
59. Ледовский А.Н. Электрические машины с высококоэффициентными постоянными магнитами. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
60. Лёвин А.В. Электрический самолет: от идеи до реализации / А.В. Лёвин, И.И. Алексеев, С.А. Харитонов, Л.К. Ковалёв // М.: Машиностроение, 2010. -288 с.
61. Лёвин А.В., Алексеев И.И., Лившиц Э.Я. Стартер-генераторная система со встроенным в авиадвигатель электромашинным агрегатом для полностью электрифицированного самолета // Авиационная промышленность. – 2007. – №1.
62. Лёвин А.В., Алексеев И.И. Полностью электрифицированный самолет – от концепции к реализации // Авиационная промышленность. – 2006. – №2.
63. Машины и технологическое оборудование. Система классов точности балансировки. ГОСТ 22061-76.

64. 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.

65. 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.

66. 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.

67. 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.

68. 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.

69. 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.

70. Мухачев Г.А., Щукин В.К. Термодинамика и теплопередача:

Учеб. для авиац. вузов. – 3-е изд., перераб. – М.: Высш. шк., 1991.

71. Науменко В. И., Ключков О. Г. Авиационные электрические машины с интенсивным охлаждением. М: Машиностроение, 1977.

72. Орлов И.Н. Электромеханические системы с постоянными магнитами. – Тр./ Моск. энерг. ин-т., 1986, вып.112, с.3-6.

73. Орлов Е. С., Ситин Д. А., Зечихин Б. С. Сравнительный анализ генераторов с радиальными и тангенциальными магнитами. Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Одиннадцатая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов. Тезисы докладов, том 2. М.: МЭИ, 2005.

74. Осин И.Л., Шакарян Ю.Г. Электрические машины: Синхронные машины: Учеб. пособие для вузов по спец. «Электромеханика» /Под ред. И.П. Копылова. – М.: Высш. шк., 1990.

75. Патент № 2516440. Российская Федерация, МПК H02K 1/27, 1/28, 21/14. Ротор электрической машины / Журавлев С. В., Левин А. В., Мисютин Р. Ю., Ситин Д. А., Фокин Ф. А., Хабаров В. А. Патентообладатели 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.

76. Патент № 2523018. Российская Федерация, МПК H02K 1/20, 3/24, 9/22. Статор электрической машины / Левин А. В., Довгалёнок В. М., Журавлев С. В., Мисютин Р. Ю., Хабаров В. А. Патентообладатели ОАО «Авиационное оборудование», Левин А. В., Довгалёнок В. М., Журавлев С. В., Мисютин Р. Ю., Хабаров В. А. – опубл. 20.07.2014, Бюл. №20.

77. Патент № 2382472. Российская Федерация, МПК H02K 1/27, 21/14, 1/28. Ротор высокооборотной электрической машины / Левин А.В., Лившиц Э.Я., Хабаров В.А., Юхнин М.М. Патентообладатели Левин А.В., Лившиц Э.Я., Хабаров В.А., Юхнин М.М. – опубл. 20.02.2010, Бюл. № 5.

78. Патент № 2211517. Российская Федерация, 7 H02K 1/27, 1/28, 21/14. Ротор электрической машины / Левин А.В., Лившиц Э.Я., Хабаров

В.А. Патентообладатели ФГУП «Агрегатное конструкторское бюро «Якорь» - опубл. 27.08.2003, Бюл. № 24.

79. Патент № 66603. Российская Федерация, МПК H01K 1/28. Ротор высокооборотной электрической машины / Левин А.В., Лившиц Э.Я., Хабаров В.А., Юхнин М.М. Патентообладатели Левин А.В., Лившиц Э.Я., Хабаров В.А., Юхнин М.М. – опубл. 10.09.2007, Бюл. № 25.

80. Пашков П.П., Покровский Д.В. Диаграмма состояния системы Fe-Nd-B и особенности структуры ее сплавов. – В кн.: Высокоэнергетические постоянные магниты и их применение в электротехнике // Тр. ВНИИЭМ, 1988, Т.85, с.93-120.

81. Перель Л.Я., Филатов А.А. Подшипники качения: Расчет, проектирование и обслуживание опор: Справочник. – 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Машиностроение, 1992. -608 с.: ил.

82. Пешти Ю.В. Расчет критических частот вращения вала: Методические указания / Под ред. И.Г. Суровцева. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.

83. Под. ред. Грузкова С.А. Электрооборудование летательных аппаратов. Том 1. Системы электроснабжения летательных аппаратов. – М.: Изд-во МЭИ. – 2005. – 568 с.: ил.

84. Под ред. Ю.М. Пятина. Постоянные магниты: Справочник. – М.: Энергия, 1980.

85. Поспелов Л.И. Конструкции авиационных электрических машин. – М.: Энергоиздат, 1982.

86. Постников И.М. Проектирование электрических машин. – Киев: Государственное издательство технической литературы УССР, 1952.

87. Постоянные магниты: Справочник / Под ред. Ю.М. Пятина. – М.: Энергия, 1980.

88. Рабинович Ю.М., Сергеев В.В., Потапова Л.В., Кононенко А.С., Афанасьева Т.Е. Эксплуатационные характеристики постоянных магнитов из сплавов типа R3M-Fe-B. Электротехника, 1989, №11.

89. Сергеев П.С., Виноградов Н.В., Горяинов Ф.А. Проектирование электрических машин. Изд. 3-е. – М.: Энергия, 1969.
90. Ситин Д.А. Магнитные системы синхронных электрических машин с редкоземельными постоянными магнитами и повышенной частотой вращения. - Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Москва, 2009.
91. Стрэнг Г., Фикс Дж. Теория метода конечных элементов. – М.: Мир, 1977.
92. Счастливым Г. Г., Бандурин В. В., Остапенко В. Н., Остапенко С. Н.. Математические модели теплопередачи в электрических машинах. – Киев, Наукова Думка, 1986.
93. Теоретические основы электротехники. В 3-х ч. Ч.І. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи: Учебник для вузов. – 5-е изд. – М.: Энергия, 1978.
94. Технические условия ТУ 1984-001-18785310-2003. Материалы магнитотвердые спеченные на основе сплавов неодима с железом и бором.
95. Технические условия ТУ 3498-002-18785310-2003. Магниты постоянные спеченные на основе сплавов неодима с железом и бором.
96. Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. Тепломассообмен: Учебное пособие для вузов. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – 550 с.: ил.
97. Чигарев А. В., Кравчук А. С., Смалюк А. Ф. ANSYS для инженеров. Справочное пособие. - М.: Машиностроение, 2004.
98. Шубов И.Г. Шум и вибрация электрических машин. – 2-е изд., перераб. И доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986.
99. Шуйский В. П. Расчет электрических машин (перевод с нем.) – Л.: Энергия, 1968.
100. Электрический самолет: концепция и технологии / А.В. Лёвин, С.М. Мусин, С.А. Харитонов, К.Л. Ковалев, А.А. Герасин, С.П. Халютин; под ред. С.М. Мусина; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: УГАТУ, 2014. - 388 с.

101. Dexter Nd-Fe-B Curves Properties Table. -  
<http://www.dextermag.com/material-grades/neodymium-iron-boron-magnets>. Дата обращения 25.10.2014.

102. Dexter Sm-Co Curves Properties Table. -  
<http://www.dextermag.com/material-grades/samarium-cobalt-magnets>. Дата обращения 25.10.2014

103. Лабораторные работы по курсу «Проектирование источников и преобразователей электроэнергии летательных аппаратов и основы САПР» / под ред. Б.С. Зечихина. – М.: МАИ, 1987.

104. Журавлев С. В. Линейные синхронные двигатели с редкоземельными постоянными магнитами. – Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Москва, 2005.



## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Приложение 1. Программа расчета авиационного генератора с постоянными магнитами

#### 1. Исходные данные для расчета электрогенератора:

1.1. Полная мощность [ВА]	$S_{\Pi} := 500 \cdot 10^3$
1.2. Расчетная частота вращения [об/мин]	$n := 8000$
1.3. Максимальная частота вращения [об/мин]	$n_{\max} := 16000$
1.4. Число фаз [-]	$m := 3$
1.5. Число пар полюсов [-]	$p := 8$
1.6. Фазное напряжение [В]	$U_{\phi} := 120$
1.7. Коэффициент мощности (индуктивный) [-]	$\cos\varphi := 0.95$

#### 2. Расчет главных размеров электрогенератора

Относительное значение ЭДС [-]	$E_{\text{отн}} := 1.112$
Линейная нагрузка якоря [А/м]	$A := 624.137 \cdot 10^2$
Индукция в рабочем зазоре [Тл]	$B_{\delta} := 0.7$
Расчетный коэффициент полюсного перекрытия [-]	$\alpha_i := 0.707$
Коэффициент формы ЭДС [-]	$k_B := 1.094$
Обмоточный коэффициент по основной гармонической [-]	$k_o := 1$
Конструктивный коэффициент [-]	$\lambda := 2.545$
Величина рабочего зазора [м]	$\delta := 1.5 \cdot 10^{-3}$
Магнитная постоянная [Гн/м]	$\mu_0 := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$
2.1. Расчетная частота напряжения [Гц]:	
$f := \frac{p \cdot n}{60}$	$f = 1066.667$
2.2. Максимальная частота напряжения [Гц]:	
$f_{\max} := \frac{p \cdot n_{\max}}{60}$	$f_{\max} = 2133.333$
2.3. Расчетная электромагнитная мощность [ВА]:	
$S_p := S_{\Pi} \cdot E_{\text{отн}}$	$S_p \cdot 10^{-3} = 556$

2.4. Коэффициент использования генератора [Дж/м<sup>3</sup>]:  $\sigma_{\text{и}} := \frac{\pi^2}{60} \cdot \alpha_1 \cdot k_B \cdot k_o \cdot A \cdot B \delta$

$$\sigma_{\text{и}} \cdot 10^{-3} = 5.559$$

2.5. Диаметр расточки якоря [м]:  $D := \sqrt[3]{\frac{S_p}{\sigma_{\text{и}} \cdot n \cdot \lambda}}$   $D \cdot 10^3 = 169.998$   $D := 170 \cdot 10^{-3}$

2.6. Осевая длина якоря [м]:  $l_{\delta} := \lambda \cdot D$   $l_{\delta} \cdot 10^3 = 432.637$   $\lambda := \frac{S_p}{\sigma_{\text{и}} \cdot n \cdot D^3}$

2.7. Полусное деление [м]:  $\tau := \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p}$   $\tau \cdot 10^3 = 33.379$   $\lambda = 2.545$

2.8. Наружный диаметр ротора [м]:  $D_p := D - 2 \cdot \delta$   $D_p \cdot 10^3 = 167$

2.9. Расчетная окружная скорость ротора [м/с]:  $V := \frac{\pi \cdot D_p \cdot n}{60}$   $V = 69.953$

2.10. Максимальная окружная скорость ротора [м/с]:  $V_{\text{max}} := \frac{\pi \cdot D_p \cdot n_{\text{max}}}{60}$

$$V_{\text{max}} = 139.906$$

### 3. Расчет обмотки якоря

Число пазов на полюс и фазу [-]

$$q := 1$$

Относительный шаг обмотки [-]

$$y_{\text{отн}} := 1$$

Эквивалентное число пазов на полюс и фазу [-]

$$q_{\text{э}} := 1$$

Число параллельных ветвей [-]

$$a_1 := 4$$

Плотность тока в обмотке [А/м<sup>2</sup>]

$$j_{\text{я}} := 20 \cdot 10^6$$

3.1. Число зубцов (пазов) якоря [-]:  $z := 2 \cdot p \cdot m \cdot q$   $z = 48$

3.2. Зубцовое деление якоря [м]:  $t_z := \frac{\pi \cdot D}{z}$   $t_z \cdot 10^3 = 11.126$

3.3. Число пазов на полюсном делении [-]:  $\tau_z := \frac{z}{2 \cdot p}$   $\tau_z = 3$

3.4. Шаг обмотки по пазам [-]:  $y_z := y_{отн} \cdot \tau_z$   $y_z = 3$   $y_z := 3$

3.5. Уточненный относительный шаг обмотки [-]:  $y_{отн} := \frac{y_z}{\tau_z}$   $y_{отн} = 1$

3.6. Коэффициент распределения обмотки [-]:  $k_p := \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m}\right)}{q_\partial \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m \cdot q_\partial}\right)}$   $k_p = 1$

3.7. Коэффициент укорочения обмотки [-]:  $k_y := \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot y_{отн}\right)$   $k_y = 1$

3.8. Уточненный обмоточный коэффициент якоря [-]:

$$k_{о.ут} := k_p \cdot k_y \quad k_{о.ут} = 1$$

$$\left| \frac{k_o - k_{о.ут}}{k_{о.ут}} \right| \cdot 100 = 0 \quad k_o = 1 \quad k_o := k_{о.ут}$$

3.9. Ток фазы [А]:  $I_\phi := \frac{S_\Pi}{m \cdot U_\phi}$   $I_\phi = 1.389 \times 10^3$

3.10. Число витков фазы (предварительно) [-]:  $w_{\phi} := \frac{A \cdot \pi \cdot D}{2 \cdot m \cdot I_{\phi}}$   $w_{\phi} = 4$

3.11. Число эффективных проводников в пазу [-]:  $N_{\text{эф}} := \frac{w_{\phi} \cdot a_1}{p \cdot q}$   $N_{\text{эф}} = 2$

$N_{\text{эф}} := 2$

3.12. Уточненное число витков фазы [-]:  $w_{\phi} := \frac{N_{\text{эф}} \cdot p \cdot q}{a_1}$   $w_{\phi} = 4$

3.13. Уточненное значение линейной нагрузки якоря [А/м]:  $A_{\text{ут}} := \frac{2 \cdot m \cdot w_{\phi} \cdot I_{\phi}}{\pi \cdot D}$

$$\left| \frac{A - A_{\text{ут}}}{A_{\text{ут}}} \right| \cdot 100 = 5.084 \times 10^{-6} \quad A \cdot 10^{-2} = 624.137 \quad A_{\text{ут}} \cdot 10^{-2} = 624.137$$

3.14. Сечение эффективного проводника обмотки якоря [м<sup>2</sup>]:  $q_{\text{эф}} := \frac{I_{\phi}}{a_1 \cdot j_{\text{я}}}$

$q_{\text{эф}} \cdot 10^6 = 17.361$

#### 4. Расчет геометрии якоря

Максимальная индукция в зубце [Тл]	$B_{z.max} := 1.8$
Коэффициент заполнения пакета якоря сталью [-]	$k_{зс} := 0.92$
Коэффициент вытеснения магнитного потока [-]	$\gamma_{\Phi} := 0.95$
Высота ушка зубца статора [м]	$h_{yc} := 0.7 \cdot 10^{-3}$
Высота клиновой (трапецидальной) части паза [м]	$h_{кл} := 0.5 \cdot 10^{-3}$
Толщина изоляции паза [м]	$\delta_{ип} := 0.4 \cdot 10^{-3}$
Толщина изоляции катушки [м]	$\delta_{ик} := 0.2 \cdot 10^{-3}$
Толщина изоляции провода [м]	$\delta_{пр} := 0.08 \cdot 10^{-3}$
Число проводников в пазу по ширине паза [-]	$n_b := 1$
Число параллельных проводников [-]	$a_2 := 3$
Толщина межслойной прокладки [м]	$\delta_{мп} := 0.35 \cdot 10^{-3}$
Толщина прокладки на дно паза [м]	$\delta_{дп} := 0.35 \cdot 10^{-3}$
Максимальная индукция в ярме [Тл]	$B_{я.max} := 1.8$

4.1. Магнитный поток через рабочий зазор [Вб]:  $\Phi_{\delta} := \frac{E_{отн} \cdot U_{\Phi}}{4 \cdot k_B \cdot k_o \cdot f \cdot w_{\Phi}} \quad \Phi_{\delta} \cdot 10^3 = 7.147$

4.2. Индукция в рабочем зазоре [Тл]:  $B_{\delta.ут} := \frac{\Phi_{\delta}}{l_{\delta} \cdot \alpha_1 \cdot \tau} \quad B_{\delta.ут} = 0.7$

$B_{\delta} = 0.7$

- 4.3. Ширина зубца в минимальном сечении [м]: 
$$b_{z.min} := \frac{B_{\delta} \cdot t_z}{B_{z.max} k_{зс} \cdot \gamma_{\Phi}}$$
  

$$b_{z.min} \cdot 10^3 = 4.951$$
- 4.4. Ширина паза (предварительно) [м]: 
$$b_{п} := \frac{\pi \cdot [D + 2 \cdot (h_{yc} + h_{кл})]}{z} - b_{z.min}$$
  

$$b_{п} \cdot 10^3 = 6.333$$
- 4.5. Ширина паза под обмотку [м]: 
$$b_{п.шт} := b_{п} - 2 \cdot (\delta_{ип} + \delta_{ик} + n_b \cdot \delta_{пр})$$
  

$$b_{п.шт} \cdot 10^3 = 4.973$$
- 4.6. Число элементарных проводников в пазу [-]: 
$$N_{эл} := N_{эф} \cdot a_2 \quad N_{эл} = 6$$
- 4.7. Число проводников в пазу по высоте паза [-]: 
$$n_h := \frac{N_{эл}}{n_b} \quad n_h = 6$$
- 4.8. Размер элементарного проводника по ширине (предварительно) [-]: 
$$b := \frac{b_{п.шт}}{n_b}$$
  

$$b \cdot 10^3 = 4.973$$
- 4.9. Сечение элементарного проводника (предварительно) [-]: 
$$q_M := \frac{Q_{эф}}{a_2} \quad q_M \cdot 10^6 = 5.787$$
- 4.10. Выбор провода обмотки якоря по нормативным документам:
- размеры неизолированного провода [м \* м] 
$$a := 1.25 \cdot 10^{-3} \quad b := 5.00 \cdot 10^{-3}$$
  - сечение неизолированного провода [м<sup>2</sup>] 
$$q_{ММ} := 6.035 \cdot 10^{-6}$$
  - размеры изолированного провода [м \* м] 
$$a_{из} := a + 2 \cdot \delta_{пр} \quad b_{из} := b + 2 \cdot \delta_{пр}$$
  

$$a_{из} \cdot 10^3 = 1.41 \quad b_{из} \cdot 10^3 = 5.16$$
  - сечение изолированного провода [м<sup>2</sup>] 
$$q_{из} := a_{из} \cdot b_{из} \quad q_{из} \cdot 10^6 = 7.276$$

4.11. Уточненная ширина паза [м]:  $\underline{b_{\Pi}} := n_b \cdot b_{из} + 2 \cdot (\delta_{ик} + \delta_{ип})$   $b_{\Pi} \cdot 10^3 = 6.36$   
 $\underline{b_{\Pi}} := 6.4 \cdot 10^{-3}$

4.12. Уточненная ширина зубца в минимальном сечении [м]:

$$\underline{b_{z.min}} := \frac{\pi \cdot [D + 2 \cdot (h_{yc} + h_{кл})]}{z} - b_{\Pi} \quad b_{z.min} 10^3 = 4.884$$

4.13. Уточненное значение максимальной индукции в зубце [Тл]:  $\underline{B_{z.max}} := \frac{B_{\delta} \cdot t_z}{b_{z.min} k_{зс} \cdot \gamma_{\phi}}$   
 $B_{z.max} = 1.825$

4.14. Уточненное значение плотности тока в обмотке якоря [А/м<sup>2</sup>]:  $\underline{j_{я.ут}} := \frac{I_{\phi}}{a_1 \cdot a_2 \cdot q_M}$

$$\left| \frac{j_{я} - j_{я.ут}}{j_{я.ут}} \right| \cdot 100 = 4.285 \quad j_{я} \cdot 10^{-6} = 20 \quad j_{я.ут} \cdot 10^{-6} = 19.178 \quad \underline{j_{я}} := j_{я.ут}$$

4.15. Высота паза под обмотку [м]:  $h_{\Pi} := n_{\Pi} \cdot a_{из} + 4 \cdot \delta_{ик} + 3 \cdot \delta_{ип} + \delta_{мп} + \delta_{дп}$   
 $h_{\Pi} \cdot 10^3 = 11.16 \quad \underline{h_{\Pi}} := 11.2 \cdot 10^{-3}$

4.16. Высота зубца [м]:  $h_z := h_{yc} + h_{кл} + h_{\Pi} \quad h_z \cdot 10^3 = 12.4$

4.17. Относительная высота паза [-]:  $h_{\Pi.отн} := \frac{h_{\Pi}}{b_{\Pi}} \quad h_{\Pi.отн} = 1.75$

4.18. Коэффициент заполнения паза медью [-]:  $k_{зп} := \frac{N_{эл} \cdot q_M}{h_{\Pi} \cdot b_{\Pi}} \quad k_{зп} = 0.505$

4.19. Высота ярма [м]:  $h_{я} := \frac{\Phi_{\delta}}{2 \cdot B_{я.max} l_{\delta} \cdot k_{зс} \cdot \gamma_{\phi}} \quad h_{я} \cdot 10^3 = 5.25 \quad \underline{h_{я}} := 5.6 \cdot 10^{-3}$

4.20. Наружный диаметр якоря [м]:  $D_H := D + 2 \cdot (h_Z + h_{я})$   $D_H \cdot 10^3 = 206$

4.21. Отношение наружного диаметра к диаметру расточки якоря [-]:  $k_D := \frac{D_H}{D}$

$$k_D = 1.212$$

### **5. Расчет параметров обмотки якоря**

Рабочая температура обмотки якоря [С]  $T_p := 180$

Ширина шлица паза статора [м]  $b_{ш} := 2 \cdot 10^{-3}$

5.1. Средняя ширина секции [м]:  $\tau_y := \frac{\pi \cdot [D + 2 \cdot (h_{yc} + h_{кл}) + h_{п}]}{z} \cdot y_z$   $\tau_y \cdot 10^3 = 36.05$

5.2. Расстояние между осями соседних секционных сторон при выходе их из паза [м]:

$$t_c := \frac{\pi \cdot [D + 2 \cdot (h_{yc} + h_{кл} + \delta_{ип})]}{z}$$

$$t_c \cdot 10^3 = 11.336$$

5.3. Ширина катушки [м]:  $b_k := n_b \cdot b_{из} + 3 \cdot \delta_{ик}$   $b_k \cdot 10^3 = 5.76$

5.4. Расстояние между осями соседних секционных сторон в отогнутых участках [м]:

$$t_{л} := b_k + 2 \cdot 10^{-3}$$

$$t_{л} \cdot 10^3 = 7.76$$

5.5. Угол поворота секции [-]:  $\alpha_c := \arcsin\left(\frac{t_{л}}{t_c}\right)$   $\alpha_c = 43.2 \text{ deg}$

5.6. Высота катушки [м]:  $h_k := 0.5 \cdot n_h \cdot a_{из} + 2 \cdot \delta_{ик}$   $h_k \cdot 10^3 = 4.63$

5.7. Средняя длина лобовой части [м]:  $l_{л} := \frac{\tau_y}{\cos(\alpha_c)} + \pi \cdot h_k + 16 \cdot 10^{-3}$

$$l_{л} \cdot 10^3 = 79.999$$



5.8. Вылет лобовой части [м]:  $l_b := 0.5 \cdot (\tau_y \cdot \tan(\alpha_c) + h_{\Pi}) + 8 \cdot 10^{-3}$   $l_b \cdot 10^3 = 30.527$

5.9. Средняя длина витка [м]:  $l_w := 2 \cdot (l_{\delta} + l_{\Pi})$   $l_w \cdot 10^3 = 1.025 \times 10^3$

5.10. Активное сопротивление фазы при температуре 20С [Ом]:  $\rho_{20} := 0.0175 \cdot 10^{-6}$

$$R_{я} := \rho_{20} \cdot \frac{w_{\phi} \cdot l_w}{q_M \cdot a_1 \cdot a_2} \quad R_{я} \cdot 10^3 = 0.991$$

5.11. Активное сопротивление фазы при рабочей температуре [Ом]:  $\alpha_R := 0.004$

$$R_{ят} := R_{я} \cdot [1 + \alpha_R \cdot (T_p - 20)] \quad R_{ят} \cdot 10^3 = 1.625$$

5.12. Удельная проводимость рассеяния паза [-]:  $k_{y1} := \frac{7 + 9 \cdot y_{отн}}{16}$   $k_{y2} := \frac{1 + 3 \cdot y_{отн}}{4}$

$$\lambda_{\Pi} := \frac{h_{\Pi}}{3 \cdot b_{\Pi}} \cdot k_{y1} + \left( \frac{h_{кл}}{b_{\Pi}} + \frac{h_{yc}}{b_{ш}} \right) \cdot k_{y2} \quad \lambda_{\Pi} = 1.011$$

5.13. Удельная проводимость рассеяния лобовых частей [-]:  $\lambda_{л} := 0.334 \cdot (l_{л} - 0.64 \cdot y_{отн} \cdot \tau) \cdot \frac{q}{l_{\delta}}$

$$\lambda_{л} = 0.045$$

5.14. Удельная проводимость рассеяния по коронкам зубцов [-]:  $\lambda_{к} := \frac{\alpha_i}{\frac{b_{ш}}{\delta} + 0.8}$

$$\lambda_{к} = 0.331$$

5.15. Суммарная удельная проводимость рассеяния обмотки якоря [-]:  $\Sigma\lambda := \lambda_{\Pi} + \lambda_{л} + \lambda_{к}$

$$\Sigma\lambda = 1.388$$

5.16. Индуктивное сопротивление рассеяния фазы [Ом]:  $X_s := 4 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot w_{\phi}^2 \cdot f \cdot \frac{l_{\delta}}{p \cdot q} \cdot \Sigma\lambda$

$$X_s \cdot 10^3 = 20.232$$

5.17. Уточненное относительное значение ЭДС [-]:  $\sin\varphi := \sqrt{1 - \cos\varphi^2}$   $\sin\varphi = 0.312$

$$E_{\text{отн.уг}} := \frac{\sqrt{(U_{\phi} \cdot \cos\varphi + R_{\text{ят}} \cdot I_{\phi})^2 + (U_{\phi} \cdot \sin\varphi + X_s \cdot I_{\phi})^2}}{U_{\phi}} \quad E_{\text{отн.уг}} = 1.112$$

$$\left| \frac{E_{\text{отн}} - E_{\text{отн.уг}}}{E_{\text{отн.уг}}} \right| \cdot 100 = 0.025 \quad E_{\text{отн}} = 1.112 \quad E_{\text{отн}} := E_{\text{отн.уг}}$$

5.18. Расчетная ЭДС генератора [В]:  $E_{\delta} := U_{\phi} \cdot E_{\text{отн}}$   $E_{\delta} = 133.473$

## 6. Расчет магнитной цепи якоря

Кривая намагничивания стали 2421 для зубцов и ярма:

$$S := \text{READPRN}(\text{"Steel 2421.txt"}) \quad S := \text{csort}(S, 1) \quad B := S^{(0)} \quad H := 100 \cdot S^{(1)}$$

$$S := \text{csp lin}(H, B) \quad B_{z.2421}(HH) := \text{interp}(S, H, B, HH)$$

$$S := \text{csp lin}(B, H) \quad H_{z.2421}(BB) := \text{interp}(S, B, H, BB)$$

$$S := \text{READPRN}(\text{"Steel 2421 (ярмо).txt"}) \quad S := \text{csort}(S, 1) \quad B := S^{(0)} \quad H := 100 \cdot S^{(1)}$$

$$S := \text{csp lin}(H, B) \quad B_{\text{я.2421}}(HH) := \text{interp}(S, H, B, HH)$$

$$S := \text{csp lin}(B, H) \quad H_{\text{я.2421}}(HH) := \text{interp}(S, B, H, HH)$$

6.1. Коэффициент рабочего зазора [-]:  $k_{\delta} := \frac{t_z}{t_z - \frac{\left(\frac{b_{\text{ш}}}{\delta}\right)^2 \cdot \delta}{5 + \frac{b_{\text{ш}}}{\delta}}}$   $k_{\delta} = 1.039$

6.2. Расчетная величина рабочего зазора [м]:  $\delta_{\text{шт}} := \delta \cdot k_{\delta}$   $\delta_{\text{шт}} \cdot 10^3 = 1.559$

6.3. Ширина зубца якоря [м]:

- минимальная  $b_{z.min} := \frac{\pi \cdot [D + 2 \cdot (h_{yc} + h_{кл})]}{z} - b_{п}$   $b_{z.min} \cdot 10^3 = 4.884$

- максимальная  $b_{z.max} := \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_z)}{z} - b_{п}$   $b_{z.max} \cdot 10^3 = 6.35$

- средняя  $b_{z.cp} := \frac{\pi \cdot [D + 2 \cdot (h_{yc} + h_{кл}) + h_{п}]}{z} - b_{п}$   $b_{z.cp} \cdot 10^3 = 5.617$

6.4. Длина магнитной силовой линии в ярме якоря [м]:  $L_{я} := \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_z + h_{я})}{4 \cdot p}$

$$L_{я} \cdot 10^3 = 19.674$$

6.5. Магнитный поток через рабочий зазор [Вб]:  $\Phi_{\delta} := \frac{E_{отп} \cdot U_{\phi}}{4 \cdot k_B \cdot w_{\phi} \cdot k_o \cdot f}$

$$\Phi_{\delta} = 7.149 \times 10^{-3}$$

6.6. Индукция в рабочем зазоре [Тл]:  $fB_{\delta}(a\Phi_{\delta}) := \frac{a\Phi_{\delta}}{\alpha_1 \cdot \tau \cdot l_{\delta}}$   $fB_{\delta}(\Phi_{\delta}) = 0.7$

6.7. Падение магнитного потенциала в рабочем зазоре [А]:  $fU_{\delta}(a\Phi_{\delta}) := \frac{fB_{\delta}(a\Phi_{\delta}) \cdot \delta_{шт}}{\mu_0}$

$$fU_{\delta}(\Phi_{\delta}) = 868.644$$

6.8. Индукция в зубце якоря [Тл]:

- минимальная  $fB_{z.min}(a\Phi_{\delta}) := \frac{fB_{\delta}(a\Phi_{\delta}) \cdot t_z}{b_{z.max} \cdot k_{зс} \cdot \gamma_{\phi}}$   $fB_{z.min}(\Phi_{\delta}) = 1.404$

- максимальная  $fB_{z.max}(a\Phi_{\delta}) := \frac{fB_{\delta}(a\Phi_{\delta}) \cdot t_z}{b_{z.min} \cdot k_{зс} \cdot \gamma_{\phi}}$   $fB_{z.max}(\Phi_{\delta}) = 1.825$

- средняя 
$$f_{B_{z.cp}}(a\Phi_{\delta}) := \frac{f_{B_{\delta}}(a\Phi_{\delta}) \cdot t_z}{b_{z.cp} \cdot k_{3c} \cdot \gamma_{\Phi}} \quad f_{B_{z.cp}}(\Phi_{\delta}) = 1.587$$

6.9. Индукция в зубце якоря с учетом магнитного потока через паз [Тл]:

- минимальная

$$f_{B_{z.min.шт}}(a\Phi_{\delta}) := \begin{cases} vp \leftarrow f_{B_{z.min}}(a\Phi_{\delta}) \\ res \leftarrow \text{root} \left( f_{B_{z.min}}(a\Phi_{\delta}) - \mu_0 \cdot H_{z.2421}(vp) \cdot \frac{b_{\Pi}}{k_{3c} \cdot \gamma_{\Phi} \cdot b_{z.max}} - vp, vp \right) \\ \text{return } res \end{cases}$$

$$f_{B_{z.min.шт}}(\Phi_{\delta}) = 1.402$$

- максимальная

$$f_{B_{z.max.шт}}(a\Phi_{\delta}) := \begin{cases} vp \leftarrow f_{B_{z.max}}(a\Phi_{\delta}) \\ res \leftarrow \text{root} \left( f_{B_{z.max}}(a\Phi_{\delta}) - \mu_0 \cdot H_{z.2421}(vp) \cdot \frac{b_{\Pi}}{k_{3c} \cdot \gamma_{\Phi} \cdot b_{z.min}} - vp, vp \right) \\ \text{return } res \end{cases}$$

$$f_{B_{z.max.шт}}(\Phi_{\delta}) = 1.793$$

- средняя

$$f_{B_{z.cp.шт}}(a\Phi_{\delta}) := \begin{cases} vp \leftarrow f_{B_{z.cp}}(a\Phi_{\delta}) \\ res \leftarrow \text{root} \left( f_{B_{z.cp}}(a\Phi_{\delta}) - \mu_0 \cdot H_{z.2421}(vp) \cdot \frac{b_{\Pi}}{k_{3c} \cdot \gamma_{\Phi} \cdot b_{z.cp}} - vp, vp \right) \\ \text{return } res \end{cases}$$

$$f_{B_{z.cp.шт}}(\Phi_{\delta}) = 1.578$$

6.10. Напряженность магнитного поля в зубце якоря [А/м]:

- минимальная 
$$f_{H_{z.min}}(a\Phi_{\delta}) := H_{z.2421}(f_{B_{z.min.шт}}(a\Phi_{\delta}))$$

$$f_{H_{z.min}}(\Phi_{\delta}) = 1430.054$$

- максимальная  $fH_{z.max}(a\Phi_\delta) := H_{z.2421}(fB_{z.max.шт}(a\Phi_\delta))$

$$fH_{z.max}(\Phi_\delta) = 17346.656$$

- средняя  $fH_{z.cp}(a\Phi_\delta) := H_{z.2421}(fB_{z.cp.шт}(a\Phi_\delta))$

$$fH_{z.cp}(\Phi_\delta) = 5269.2$$

- расчетная  $fH_z(a\Phi_\delta) := \frac{fH_{z.min}(a\Phi_\delta) + 4 \cdot fH_{z.cp}(a\Phi_\delta) + fH_{z.max}(a\Phi_\delta)}{6}$

$$fH_z(\Phi_\delta) = 6642.251$$

6.11. Падение магнитного потенциала в зубце якоря [A]:  $fU_z(a\Phi_\delta) := fH_z(a\Phi_\delta) \cdot h_z$

$$fU_z(\Phi_\delta) = 82.364$$

6.12. Индукция в ярме якоря [Тл]:  $fB_y(a\Phi_\delta) := \frac{a\Phi_\delta}{2 \cdot h_y \cdot l_\delta \cdot k_{3c} \cdot \gamma_\Phi}$   $fB_y(\Phi_\delta) = 1.688$

6.13. Индукция в ярме якоря с учетом магнитного потока через паз [Тл]:

$$fB_{y.шт}(a\Phi_\delta) := \begin{cases} vp \leftarrow fB_y(a\Phi_\delta) \\ res \leftarrow \text{root} \left( fB_y(a\Phi_\delta) - \mu_0 \cdot H_{z.2421}(vp) \cdot \frac{h_\pi}{k_{3c} \cdot \gamma_\Phi \cdot h_y} - vp, vp \right) \\ \text{return res} \end{cases}$$

$$fB_{y.шт}(\Phi_\delta) = 1.663$$

6.14. Напряженность магн. поля в ярме якоря [A/м]:  $fH_y(a\Phi_\delta) := H_{y.2421}(fB_{y.шт}(a\Phi_\delta))$

$$fH_y(\Phi_\delta) = 2149.071$$

6.15. Падение магнитного потенциала в ярме якоря [A]:  $fU_y(a\Phi_\delta) := fH_y(a\Phi_\delta) \cdot L_y$

$$fU_y(\Phi_\delta) = 42.281$$

6.16. Падение магнитного потенциала в якоре [A]:

$$fU_a(a\Phi_\delta) := fU_\delta(a\Phi_\delta) + fU_z(a\Phi_\delta) + fU_\gamma(a\Phi_\delta) \quad fU_a(\Phi_\delta) = 993.289$$

6.17. Коэффициент магнитной цепи якоря [-]:

$$fk_s(a\Phi_\delta) := \frac{fU_a(a\Phi_\delta)}{fU_\delta(a\Phi_\delta)}$$

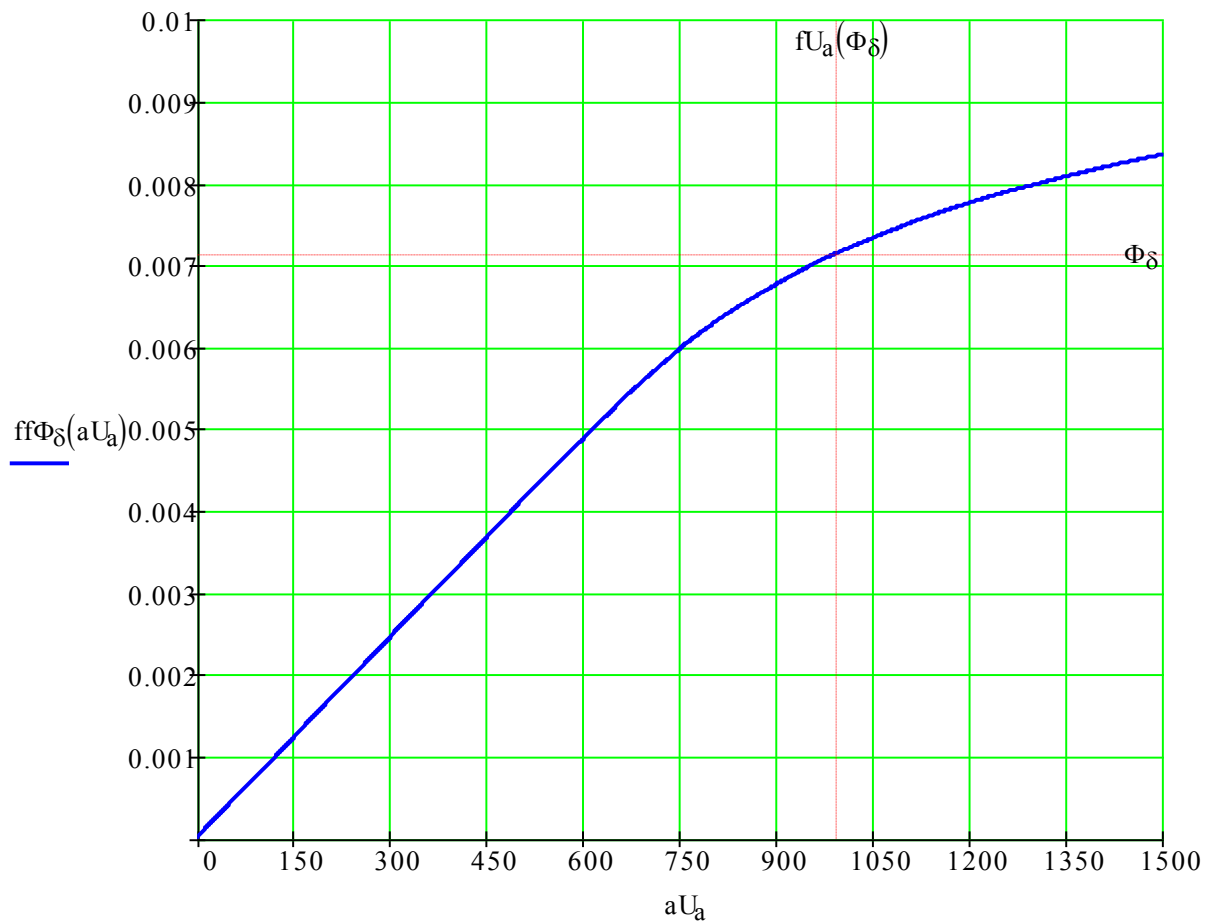
$$fk_s(\Phi_\delta) = 1.143$$

6.18. Характеристика намагничивания цепи якоря:

$$I := 1000 \quad i := 0..I \quad \Phi_{\delta.H} := 0 \quad \Phi_{\delta.K} := 20 \cdot 10^{-3} \quad \Delta\Phi_\delta := \frac{\Phi_{\delta.K} - \Phi_{\delta.H}}{I}$$

$$p\Phi_{\delta_i} := \Phi_{\delta.H} + i \cdot \Delta\Phi_\delta \quad pU_{a_i} := fU_a(p\Phi_{\delta_i})$$

$$S_{\text{ww}} := \text{csplin}(pU_a, p\Phi_\delta) \quad ff\Phi_\delta(aU_a) := \text{interp}(S, pU_a, p\Phi_\delta, aU_a)$$



## 7. Расчет обоймы ротора

Толщина обоймы [м]	$\delta_{\delta} := 4 \cdot 10^{-3}$
Плотность материала обоймы (градиентная обойма) [кг/м <sup>3</sup> ]	$\gamma_{\delta} := 4500$
Высота магнита [м]	$h_M := 15 \cdot 10^{-3}$
Конструктивный коэффициент магнита [-]	$\alpha := 0.8$
Плотность материала магнита (КС25ДЦ-240) [кг/м <sup>3</sup> ]	$\gamma_M := 7600$

7.1. Масса обоймы [кг]:  $M_{\delta} := \frac{\pi}{4} \cdot [D_p^2 - (D_p - 2 \cdot \delta_{\delta})^2] \cdot l_{\delta} \cdot \gamma_{\delta}$   $M_{\delta} = 3.988$

7.2. Масса магнитов [кг]:  $M_M := \frac{\pi}{4} \cdot [(D_p - 2 \cdot \delta_{\delta})^2 - [D_p - 2 \cdot (\delta_{\delta} + h_M)]^2] \cdot \alpha \cdot l_{\delta} \cdot \gamma_M$

$$M_M = 17.85$$

7.3. Радиус центра тяжести обоймы [м]:  $R_{\delta} := \frac{D_p - \delta_{\delta}}{2}$   $R_{\delta} \cdot 10^3 = 81.5$

7.4. Радиус центра тяжести магнитов [м]:  $R_M := \frac{D_p - 2 \cdot \delta_{\delta} - h_M}{2}$   $R_M \cdot 10^3 = 72$

7.5. Центробежная сила от обоймы [Н]:  $F_{\delta} := \left(\frac{\pi}{30}\right)^2 \cdot M_{\delta} \cdot R_{\delta} \cdot n_{\max}^2$   $F_{\delta} \cdot 10^{-6} = 0.912$

7.6. Центробежная сила от магнитов [Н]:  $F_M := \left(\frac{\pi}{30}\right)^2 \cdot M_M \cdot R_M \cdot n_{\max}^2$   $F_M \cdot 10^{-6} = 3.608$

7.7. Суммарная центробежная сила [Н]:  $F_{\Sigma} := F_{\delta} + F_M$   $F_{\Sigma} \cdot 10^{-6} = 4.52$

7.8. Перерезывающая сила [Н]:  $N := \frac{F_{\Sigma}}{2 \cdot \pi}$   $N \cdot 10^{-6} = 0.719$

7.9. Площадь сечения обоймы [м<sup>2</sup>]:  $S := \delta_{\delta} \cdot l_{\delta}$   $S \cdot 10^6 = 1.731 \times 10^3$

7.10. Напряжение в обойме [Па]:  $\sigma := 1.35 \cdot \frac{N}{S}$   $\sigma \cdot 10^{-6} = 561.233$

## 8. Определение расчетных коэффициентов

По результатам работы программы определения расчетных коэффициентов:

Расчетный коэффициент полюсного перекрытия [-]	$\alpha_i := 0.707$
Коэффициент формы ЭДС [-]	$k_B := 1.094$
Коэффициент формы поля продольной реакции якоря [-]	$k_{ad} := 0.087$
Коэффициент формы поля поперечной реакции якоря [-]	$k_{aq} := 0.087$
Индукция в рабочем зазоре в режиме холостого хода [Тл]	$B_{\delta,xx} := 0.757$

## 9. Расчет главных индуктивных сопротивлений реакции якоря и ЭДС холостого хода электрогенератора

9.1. Главное индуктивное сопротивление реакции якоря [Ом]:  $k_{\mu d} := 1$        $k_{\mu q} := 1$

- по продольной оси  $X_{ad} := \frac{4 \cdot m \cdot f}{\pi \cdot p} \cdot \frac{\mu_0 \cdot \tau \cdot l_{\delta}}{\delta \cdot k_{\delta} \cdot k_{\mu d}} \cdot (w_{\phi} \cdot k_o)^2 \cdot k_{ad}$        $X_{ad} = 8.252 \times 10^{-3}$

- по поперечной оси  $X_{aq} := \frac{4 \cdot m \cdot f}{\pi \cdot p} \cdot \frac{\mu_0 \cdot \tau \cdot l_{\delta}}{\delta \cdot k_{\delta} \cdot k_{\mu q}} \cdot (w_{\phi} \cdot k_o)^2 \cdot k_{aq}$        $X_{aq} = 8.252 \times 10^{-3}$

9.2. Угол размагничивания [рад]:  $\psi := \operatorname{atan} \left[ \frac{U_{\phi} \cdot \sin \varphi + (X_s + X_{aq}) \cdot I_{\phi}}{U_{\phi} \cdot \cos \varphi + R_{яг} \cdot I_{\phi}} \right]$

$$\psi = 33.5281459 \text{ deg}$$

9.3. Составляющие расчетной ЭДС [В]:

- поперечная  $E_q := X_{aq} \cdot I_{\phi} \cdot \cos(\psi)$        $E_q = 9.555$

- продольная  $E_d := \sqrt{E_{\delta}^2 - E_q^2}$        $E_d = 133.131$

9.4. ЭДС продольной реакции якоря [В]:  $E_{ad} := X_{ad} \cdot I_{\phi} \cdot \sin(\psi)$        $E_{ad} = 6.331$



9.5. ЭДС холостого хода по векторной диаграмме [В]:  $E_{0.вд} := E_d + E_{ад}$

$$E_{0.вд} = 139.462$$

9.6. ЭДС холостого хода, создаваемая постоянными магнитами [В]:

$$E_{0.м} := 4 \cdot k_B \cdot w_{\phi} \cdot k_o \cdot f \cdot \alpha_i \cdot \tau \cdot l_{\delta} \cdot B_{\delta.хх} \quad E_{0.м} = 144.306$$

9.7. Рассогласование по ЭДС холостого хода [%]:  $\Delta E_0 := \frac{E_{0.м} - E_{0.вд}}{E_{0.вд}} \cdot 100$

$$\Delta E_0 = 3.473$$

## **10. Расчет массы, потерь и КПД электрогенератора**

Плотность стали 2421 [кг/м<sup>3</sup>]  $\rho_{2421} := 7650$

Плотность меди [кг/м<sup>3</sup>]  $\rho_m := 8900$

Коэффициент перегрузки генератора [-]  $k_T := 1$

10.1. Масса зубцов якоря [кг]:

$$M_z := \left[ \frac{\pi}{4} \cdot \left[ (D + 2 \cdot h_z)^2 - D^2 \right] - z \cdot (h_{п} \cdot b_{п} + h_{yc} \cdot b_{ш}) \right] \cdot l_{\delta} \cdot k_{зс} \cdot \rho_{2421} \quad M_z = 10.955$$

10.2. Масса ярма якоря [кг]:  $M_y := \frac{\pi}{4} \cdot \left[ D_H^2 - (D + 2 \cdot h_z)^2 \right] \cdot l_{\delta} \cdot k_{зс} \cdot \rho_{2421} \quad M_y = 10.735$

10.3. Масса пакета якоря [кг]:  $M_{п} := M_z + M_y \quad M_{п} = 21.69$

10.4. Масса обмотки якоря [кг]:  $M_{оя} := m \cdot w_{\phi} \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot l_w \cdot q_m \cdot \rho_m \quad M_{оя} = 7.93$

10.5. Масса активных материалов якоря [кг]:  $M_{ая} := M_{п} + M_{оя} \quad M_{ая} = 29.62$

10.6. Масса активных материалов индуктора [кг]:  $M_{аи} := M_m + M_b$

$$M_{аи} = 21.838$$

10.7. Масса активных материалов электрогенератора [кг]:  $M_a := M_{ая} + M_{ан}$

$$M_a = 51.457$$

10.8. Масса конструктивных материалов электрогенератора [кг]:  $M_k := 0.75 \cdot M_a$

$$M_k = 38.593$$

10.9. Масса электрогенератора [кг]:  $M_r := M_a + M_k$   $M_r = 90.05$

10.10. Удельная масса электрогенератора [кг/кВА]:  $m_{уд} := \frac{k_r \cdot M_r}{S_{п}} \cdot 10^3$   $m_{уд} = 0.18$

10.11. Потери в обмотке якоря [Вт]:  $P_{оя} := m \cdot \left( \frac{I_{\phi}}{k_T} \right)^2 \cdot R_{ят}$   $P_{оя} = 9.405 \times 10^3$

10.12. Потери в стали якоря [Вт]:  $p_0 := 12.5$   $k_{TZ} := 2.2$   $k_{ТЯ} := 1.6$

$$P_{ст} := p_0 \cdot \left( \frac{f}{400} \right)^{1.5} \cdot \left[ \left( \frac{f B_{z,сп}(\Phi_{\delta})}{1.0} \right)^2 \cdot M_z \cdot k_{TZ} + \left( \frac{f B_{я}(\Phi_{\delta})}{1.0} \right)^2 \cdot M_{я} \cdot k_{ТЯ} \right] \quad P_{ст} = 5.968 \times 10^3$$

10.13. Суммарные потери в номинальном режиме [Вт]:  $\Delta P := P_{оя} + P_{ст}$

$$\Delta P = 1.537 \times 10^4$$

10.14. Коэффициент полезного действия электрогенератора [-]:  $\eta := \frac{S_{п} \cdot \cos \varphi}{S_{п} \cdot \cos \varphi + k_T \cdot \Delta P}$

$$\eta = 0.969$$

## **11. Построение векторной диаграммы**

Фазное напряжение [В]  $U_{вд} := U_{\phi}$

Ток фазы [А]  $I_{вд} := I_{\phi}$

$${}^vI := \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0.25 \cdot I_{BД} & 0 \end{pmatrix} \quad {}^vU := \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ U_{BД} \cdot \cos\varphi & U_{BД} \cdot \sin\varphi \end{pmatrix} \quad {}^vR := \begin{pmatrix} U_{BД} \cdot \cos\varphi & U_{BД} \cdot \sin\varphi \\ U_{BД} \cdot \cos\varphi + I_{BД} \cdot R_{Ят} & U_{BД} \cdot \sin\varphi \end{pmatrix}$$

$${}^vX := \begin{pmatrix} U_{BД} \cdot \cos\varphi + I_{BД} \cdot R_{Ят} & U_{BД} \cdot \sin\varphi \\ U_{BД} \cdot \cos\varphi + I_{BД} \cdot R_{Ят} & U_{BД} \cdot \sin\varphi + I_{BД} \cdot X_S \end{pmatrix} \quad \begin{aligned} \psi_{BД} &:= \psi \\ \psi_{BД} &= 33.528 \text{ deg} \end{aligned}$$

$${}^vE := \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ U_{BД} \cdot \cos\varphi + I_{BД} \cdot R_{Ят} & U_{BД} \cdot \sin\varphi + I_{BД} \cdot X_S \end{pmatrix} \quad \begin{aligned} E_{0BД} &:= E_{0.BД} \\ E_{0BД} &= 139.462 \end{aligned}$$

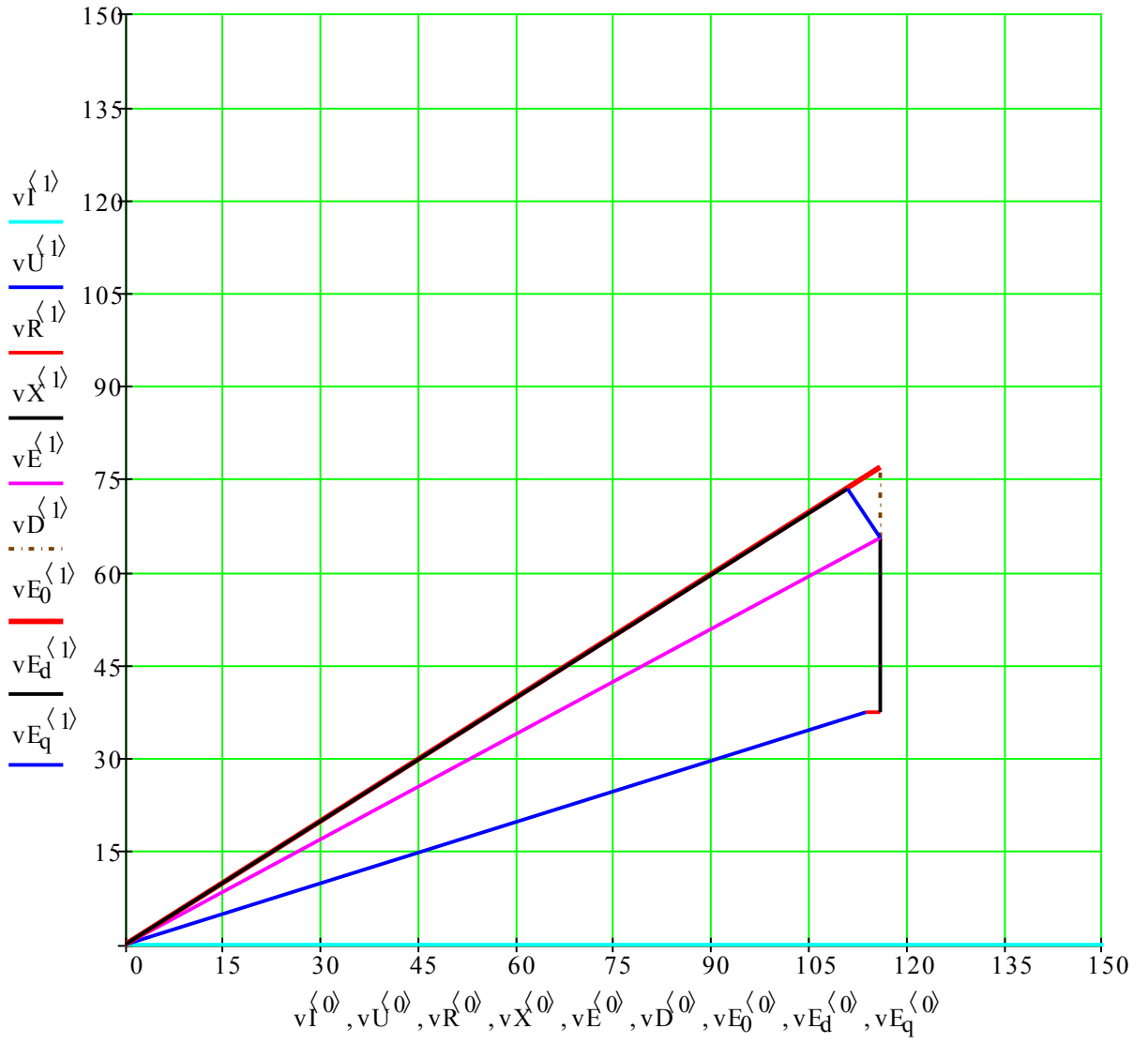
$$\sqrt{({}^vE_{1,0} - {}^vE_{0,0})^2 + ({}^vE_{1,1} - {}^vE_{0,1})^2} = 133.473 \quad E_{\delta} = 133.473$$

$${}^vD := \begin{pmatrix} U_{BД} \cdot \cos\varphi + I_{BД} \cdot R_{Ят} & U_{BД} \cdot \sin\varphi + I_{BД} \cdot X_S \\ U_{BД} \cdot \cos\varphi + I_{BД} \cdot R_{Ят} & U_{BД} \cdot \sin\varphi + I_{BД} \cdot X_S + I_{BД} \cdot X_{aq} \end{pmatrix}$$

$${}^vE_0 := \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ E_{0BД} \cdot \cos(\psi_{BД}) & E_{0BД} \cdot \sin(\psi_{BД}) \end{pmatrix} \quad \begin{aligned} E_{d.BД} &:= E_d \\ E_{d.BД} &= 133.131 \end{aligned}$$

$${}^vE_d := \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ E_{d.BД} \cdot \cos(\psi_{BД}) & E_{d.BД} \cdot \sin(\psi_{BД}) \end{pmatrix} \quad {}^vE_q := \begin{pmatrix} U_{BД} \cdot \cos\varphi + I_{BД} \cdot R_{Ят} & U_{BД} \cdot \sin\varphi + I_{BД} \cdot X_S \\ E_{d.BД} \cdot \cos(\psi_{BД}) & E_{d.BД} \cdot \sin(\psi_{BД}) \end{pmatrix}$$

$$\sqrt{({}^vE_{q1,0} - {}^vE_{q0,0})^2 + ({}^vE_{q1,1} - {}^vE_{q0,1})^2} = 9.555 \quad \begin{aligned} E_{q.BД} &:= E_q \\ E_{q.BД} &= 9.555 \end{aligned}$$



## 12. Расчет внешней характеристики

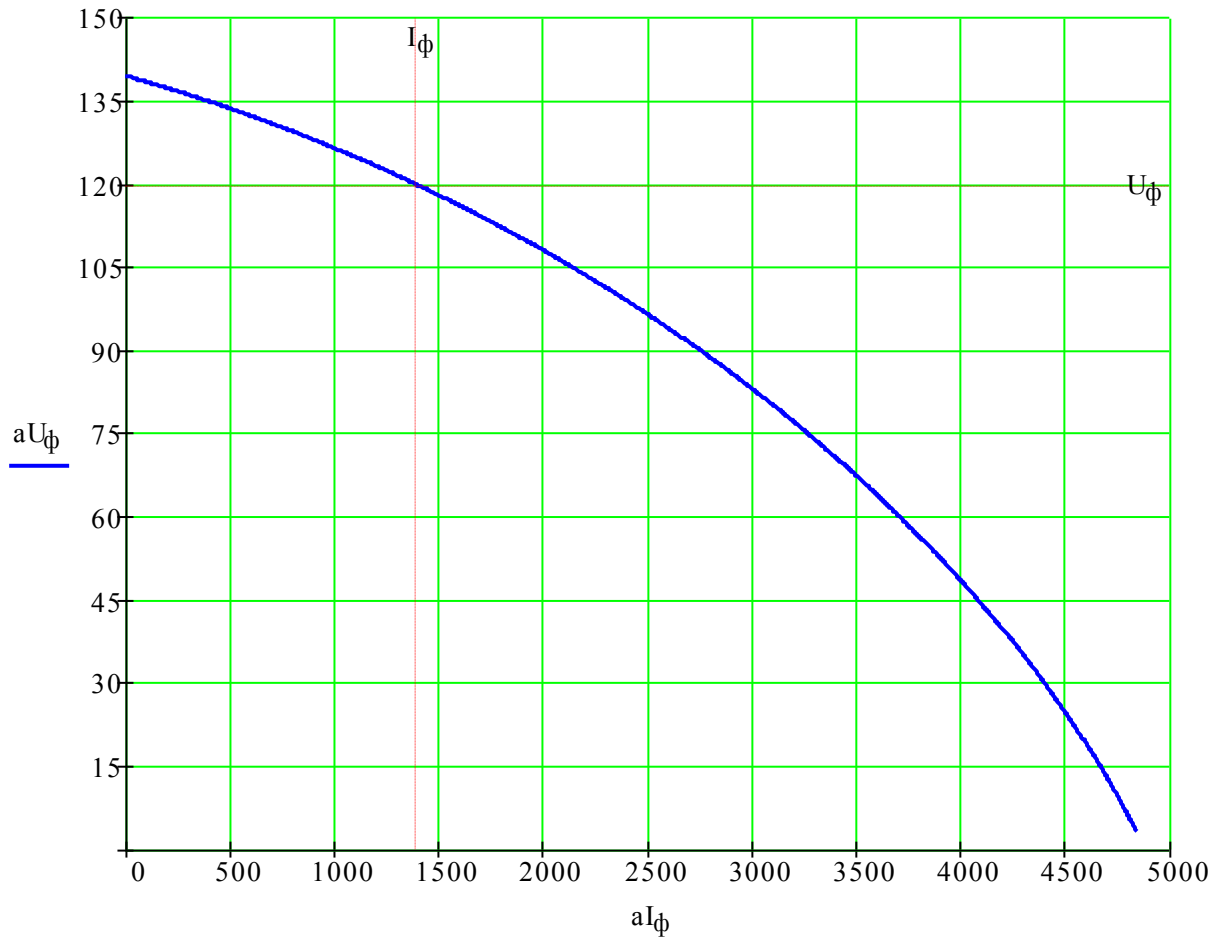
```

VH(aIφ) :=
| aUφ ← 0.1
| aEδ ← √((aUφ·cosφ + Rят·aIφ)2 + (aUφ·sinφ + Xs·aIφ)2)
| aψ ← atan[ (aUφ·sinφ + (Xs + Xaq)·aIφ) / (aUφ·cosφ + Rят·aIφ) ]
| aEq ← Xaq·aIφ·cos(aψ)
| aEd ← √(aEδ2 - aEq2)
| aEad ← Xad·aIφ·sin(aψ)
| aE0 ← aEd + aEad
| while aE0 ≤ E0.вд
|   | aUφ ← aUφ + 0.1
|   | aEδ ← √((aUφ·cosφ + Rят·aIφ)2 + (aUφ·sinφ + Xs·aIφ)2)
|   | aψ ← atan[ (aUφ·sinφ + (Xs + Xaq)·aIφ) / (aUφ·cosφ + Rят·aIφ) ]
|   | aEq ← Xaq·aIφ·cos(aψ)
|   | aEd ← √(aEδ2 - aEq2)
|   | aEad ← Xad·aIφ·sin(aψ)
|   | aE0 ← aEd + aEad
| return aUφ

```

$N := 1000$      $aI_{\phi.H} := 0$      $aI_{\phi.K} := 4850$      $\Delta aI_{\phi} := \frac{aI_{\phi.K} - aI_{\phi.H}}{N}$      $i := 0..N$

$aI_{\phi_i} := aI_{\phi.H} + i \cdot \Delta aI_{\phi}$      $aU_{\phi_i} := VH(aI_{\phi_i})$



## Приложение 2. Программа расчета силы одностороннего магнитного притяжения шести полюсного синхронного генератора с постоянными магнитами.

Исходные данные для расчета:

Диаметр расточки якоря	$D := 60 \cdot 10^{-3}$	м
Величина рабочего зазора	$\delta := 2.5 \cdot 10^{-3}$	м
Высота полюса индуктора (магнита)	$h_{\Pi} := 8 \cdot 10^{-3}$	м
Остаточная индукция магнита	$B_r := 1.1$	Тл
Магнитная постоянная	$\mu_0 := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$	Гн/м
Число пар полюсов	$p := 3$	
Коэффициент полюсного перекрытия	$\alpha := 0.85$	
	$\alpha_{\tau} := \frac{\pi}{p}$	$\delta_{HM} := \delta$
		$h_M := h_{\Pi}$

$$R_H := \frac{D}{2} \quad R_B := R_H - \delta_{HM}$$

$$R_H = 0.03 \quad R_B = 0.028 \quad \varepsilon := 0.4 \cdot 10^{-3} \quad \delta_c := R_H - R_B \quad \delta_c = 2.5 \times 10^{-3}$$

$$\alpha(\varphi) := \operatorname{asin}\left(\frac{\varepsilon}{R_B} \cdot \sin(\varphi)\right) \quad \beta(\varphi) := \varphi - \alpha(\varphi) \quad \delta(\varphi) := R_H - \varepsilon \cdot \frac{\sin(\beta(\varphi))}{\sin(\alpha(\varphi))}$$

$$\delta(10^{-6}) = 2.9 \times 10^{-3} \delta(\pi - 10^{-6}) = 2.1 \times 10^{-3}$$

$$\delta\delta(\varphi) := \begin{cases} \text{return } \delta(10^{-6}) & \text{if } -10^{-6} < \varphi < 10^{-6} \\ \text{return } \delta(\pi - 10^{-6}) & \text{if } (\pi - 10^{-6}) < \varphi < (\pi + 10^{-6}) \\ \text{return } \delta(10^{-6}) & \text{if } (2 \cdot \pi - 10^{-6}) < \varphi < (2 \cdot \pi + 10^{-6}) \\ \text{return } \delta(\varphi) & \end{cases}$$

$$p = 3$$

$$\tau := \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p}$$

$$\alpha_{исх} := 0.85$$

$$b_{M.min} := \frac{\pi \cdot (D - 2 \cdot \delta_{HM} - 2 \cdot h_M)}{2 \cdot p} \cdot \alpha_{исх}$$

$$b_{M.min} \cdot 10^3 = 17.357$$

$$b_{M.max} := \frac{\pi \cdot (D - 2 \cdot \delta_{HM})}{2 \cdot p} \cdot \alpha_{исх}$$

$$b_{M.max} \cdot 10^3 = 24.478$$

$$b_{M.cp} := \frac{b_{M.max} + b_{M.min}}{2} \quad \alpha_{new} := \frac{b_{M.max}}{\tau}$$

$$\alpha_{new} = 0.779$$

$$\alpha := 0.779 \quad \alpha_\tau = 1.047 \quad n := 1, 3..100$$

Первый магнит: 
$$\delta_{cp1} := \frac{1}{\alpha_\tau} \cdot \int_{-\frac{\alpha_\tau}{2}}^{\frac{\alpha_\tau}{2}} \delta \delta(\varphi) d\varphi \quad \delta_{cp1} \cdot 10^3 = 2.882$$

$$fB_{\delta 1}(x) := \frac{4 \cdot B_r}{\pi} \cdot \sum_n \left[ \frac{1}{n} \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi}{2} \cdot \alpha\right) \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi}{2}\right) \cdot \frac{\sinh\left(\frac{n \cdot \pi}{\tau} \cdot h_M\right)}{\sinh\left[\frac{n \cdot \pi}{\tau} \cdot (h_M + \delta_{cp1})\right]} \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi}{\tau} \cdot x\right) \right]$$

$$ffB_{\delta 1}(\varphi) := fB_{\delta 1}\left[\left(\varphi + \frac{\alpha_\tau}{2}\right) \cdot \frac{\tau}{\alpha_\tau}\right]$$

Второй магнит: 
$$\delta_{cp2} := \frac{1}{\alpha_\tau} \cdot \int_{\frac{\alpha_\tau}{2}}^{\frac{3 \cdot \alpha_\tau}{2}} \delta \delta(\varphi) d\varphi \quad \delta_{cp2} \cdot 10^3 = 2.693$$



$$fB_{\delta 2}(x) := \frac{4 \cdot B_r}{\pi} \cdot \sum_n \left[ \frac{1}{n} \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi}{2} \cdot \alpha\right) \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi}{2}\right) \cdot \frac{\sinh\left(\frac{n \cdot \pi}{\tau} \cdot h_M\right)}{\sinh\left[\frac{n \cdot \pi}{\tau} \cdot (h_M + \delta_{cp2})\right]} \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi}{\tau} \cdot x\right) \right]$$

$$ffB_{\delta 2}(\varphi) := (-1) \cdot fB_{\delta 2} \left[ \left( \varphi + \frac{\alpha_\tau}{2} - \alpha_\tau \right) \cdot \frac{\tau}{\alpha_\tau} \right]$$

Третий магнит:  $\delta_{cp3} := \frac{1}{\alpha_\tau} \cdot \int_{\frac{3 \cdot \alpha_\tau}{2}}^{\frac{5 \cdot \alpha_\tau}{2}} \delta\delta(\varphi) d\varphi \quad \delta_{cp3} \cdot 10^3 = 2.311$

$$fB_{\delta 3}(x) := \frac{4 \cdot B_r}{\pi} \cdot \sum_n \left[ \frac{1}{n} \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi}{2} \cdot \alpha\right) \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi}{2}\right) \cdot \frac{\sinh\left(\frac{n \cdot \pi}{\tau} \cdot h_M\right)}{\sinh\left[\frac{n \cdot \pi}{\tau} \cdot (h_M + \delta_{cp3})\right]} \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi}{\tau} \cdot x\right) \right]$$

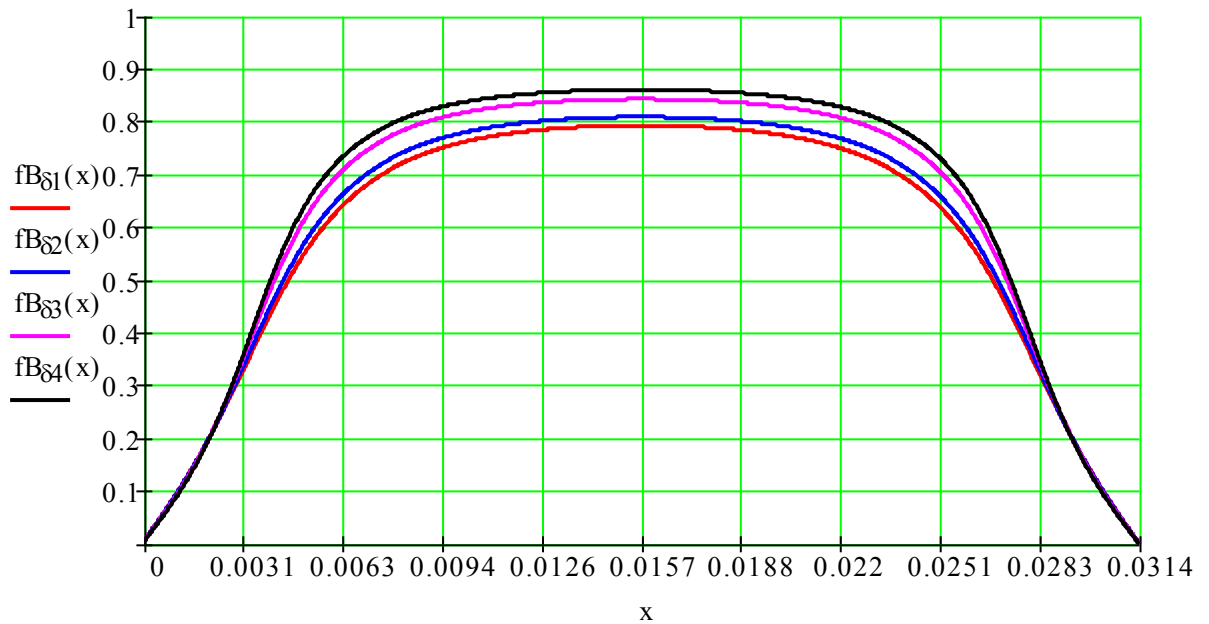
$$ffB_{\delta 3}(\varphi) := fB_{\delta 3} \left[ \left( \varphi + \frac{\alpha_\tau}{2} - 2 \cdot \alpha_\tau \right) \cdot \frac{\tau}{\alpha_\tau} \right]$$

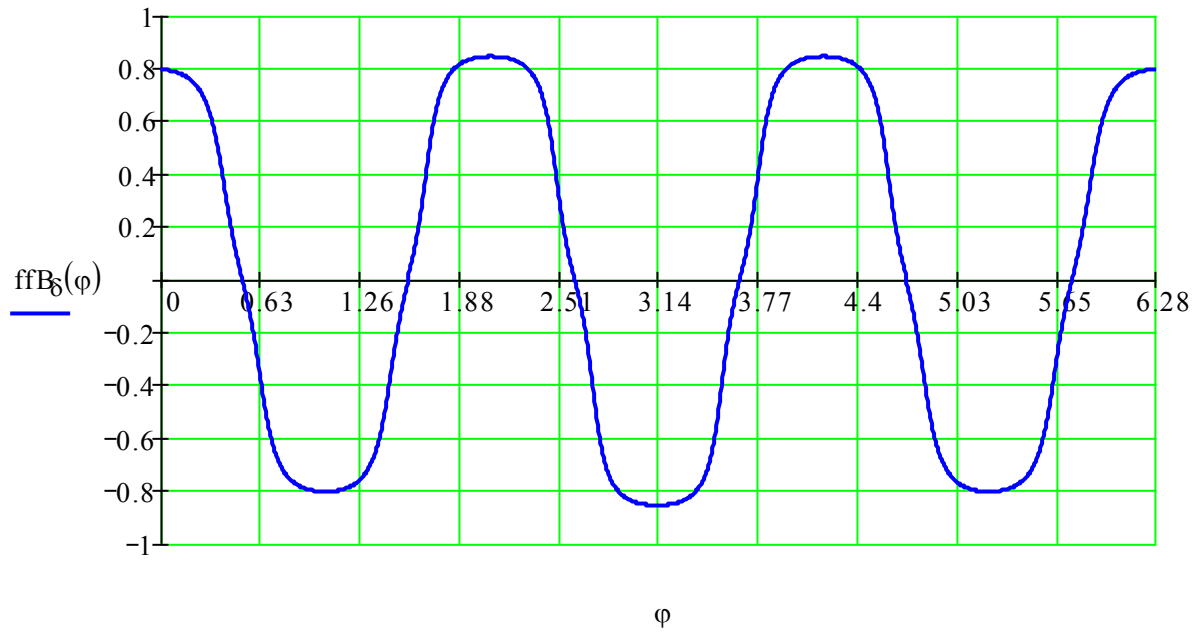
Четвертый магнит:  $\delta_{cp4} := \frac{1}{\alpha_\tau} \cdot \int_{\frac{5 \cdot \alpha_\tau}{2}}^{\frac{7 \cdot \alpha_\tau}{2}} \delta\delta(\varphi) d\varphi \quad \delta_{cp4} \cdot 10^3 = 2.118$

$$fB_{\delta 4}(x) := \frac{4 \cdot B_r}{\pi} \cdot \sum_n \left[ \frac{1}{n} \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi}{2} \cdot \alpha\right) \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi}{2}\right) \cdot \frac{\sinh\left(\frac{n \cdot \pi}{\tau} \cdot h_M\right)}{\sinh\left[\frac{n \cdot \pi}{\tau} \cdot (h_M + \delta_{cp4})\right]} \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi}{\tau} \cdot x\right) \right]$$

$$ffB_{\delta 4}(\varphi) := (-1) \cdot fB_{\delta 4} \left[ \left( \varphi + \frac{\alpha_\tau}{2} - 3 \cdot \alpha_\tau \right) \cdot \frac{\tau}{\alpha_\tau} \right] \quad ffB_{\delta 5}(\varphi) := fB_{\delta 3} \left[ \left( \varphi + \frac{\alpha_\tau}{2} - 4 \cdot \alpha_\tau \right) \cdot \frac{\tau}{\alpha_\tau} \right]$$

$$ffB_{\delta 6}(\varphi) := (-1) \cdot fB_{\delta 2} \left[ \left( \varphi + \frac{\alpha_\tau}{2} - 5 \cdot \alpha_\tau \right) \cdot \frac{\tau}{\alpha_\tau} \right]$$

$$\text{ffB}_\delta(\varphi) := \begin{cases} \text{return } 0 & \text{if } \varphi < 0 \\ \text{return } \text{ffB}_{\delta_1}(\varphi) & \text{if } 0 \leq \varphi \leq \frac{\alpha_\tau}{2} \\ \text{return } \text{ffB}_{\delta_2}(\varphi) & \text{if } \frac{\alpha_\tau}{2} \leq \varphi \leq \frac{3 \cdot \alpha_\tau}{2} \\ \text{return } \text{ffB}_{\delta_3}(\varphi) & \text{if } \frac{3 \cdot \alpha_\tau}{2} \leq \varphi \leq \frac{5 \cdot \alpha_\tau}{2} \\ \text{return } \text{ffB}_{\delta_4}(\varphi) & \text{if } \frac{5 \cdot \alpha_\tau}{2} \leq \varphi \leq \frac{7 \cdot \alpha_\tau}{2} \\ \text{return } \text{ffB}_{\delta_5}(\varphi) & \text{if } \frac{7 \cdot \alpha_\tau}{2} \leq \varphi \leq \frac{9 \cdot \alpha_\tau}{2} \\ \text{return } \text{ffB}_{\delta_6}(\varphi) & \text{if } \frac{9 \cdot \alpha_\tau}{2} \leq \varphi \leq \frac{11 \cdot \alpha_\tau}{2} \\ \text{return } \text{ffB}_{\delta_1}(\varphi) & \text{if } \frac{11 \cdot \alpha_\tau}{2} \leq \varphi \leq 2 \cdot \pi \\ \text{return } 0 & \text{if } \varphi > 2 \cdot \pi \end{cases}$$




удельная сила:

$$f_{p1}(\varphi) := \frac{ffB_8(\varphi)^2}{2 \cdot \mu_0} \quad f_{x1}(\varphi) := f_{p1}(\varphi) \cdot \cos(\varphi)$$

$$f_{y1}(\varphi) := f_{p1}(\varphi) \cdot \sin(\varphi)$$

активная длина:

$$l_8 := 50 \cdot 10^{-3}$$

сила магнитного притяжения по направлению эксцентриситета, кг:

$$F_{x1} := \frac{-l_8 \cdot R_H \cdot \int_0^{2 \cdot \pi} f_{x1}(\varphi) \, d\varphi}{10} \quad F_{x1} = 8.101$$