

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Новосибирский государственный технический университет»

“УТВЕРЖДАЮ”  
Зав. отделом подготовки кадров  
высшей квалификации  
д.т.н. Драгунов В.П.



“19” *августа* 2017 г.

**ПРОГРАММА**

кандидатского экзамена по специальности

**05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты»**

по техническим наукам

Новосибирск 2017

Программа кандидатского экзамена по специальности 05.09.01 "Электромеханика и электрические аппараты" по техническим наукам разработана на основе компетентностной модели выпускника по направлению (специальности): 13.06.01 Электро- и теплотехника

ФГОС введен в действие приказом №878 от 30.07.2014 г. , дата утверждения: 20.08.2014 г.

Рабочая программа обсуждена на заседании кафедры

ЭМ, протокол заседания кафедры № \_\_\_\_ 8 \_\_\_\_ от 13.12.2016

Утверждена на совете факультета мехатроники и автоматизации, протокол № 1 от 18.01.2017

Программу разработал:

профессор, д.т.н. Шевченко А. Ф.



Заведующий кафедрой:

профессор, д.т.н. Шевченко А. Ф.



Ответственный за образовательную программу:

профессор, д.т.н. Шевченко А. Ф.



Рецензент:

профессор, д.т.н. Темлякова З.А.



# ОСНОВНАЯ ПРОГРАММА

## Введение

Программа составлена на основе дисциплин направления «Электротехника, электромеханика и электротехнология», связанных с особенностями анализа, синтеза и технического использования силовых и информационных устройств для взаимного преобразования электрической и механической энергии, электрических, контактных и бесконтактных аппаратов для коммутации электрических цепей и управления потоками энергии.

Программа разработана экспертным советом Высшей аттестационной комиссии Министерства образования Российской Федерации по энергетике, электрификации и энергетическому машиностроению при участии МЭИ (ТУ) и МАИ (ТУ).

### **1. Роль электромеханики и электрических аппаратов в современной технике**

Развитие энергетики и электроэнергетических систем. Выработка электроэнергии на тепловых, гидравлических и атомных станциях. Возобновляемые источники электроэнергии, автономные электроэнергетические системы, проблема охраны окружающей среды.

Применение электрических машин, трансформаторов и аппаратов в системах генерирования, передачи, распределения и потребления электрической энергии.

Типы электрических машин. Общая классификация электрических и электронных аппаратов.

Оценка эффективности, качества и надежности электрических машин и аппаратов.

Основные элементы конструкции электромеханических преобразователей, трансформаторов, электрических аппаратов и технология их изготовления. Безотходная и малоотходная технология.

Испытания электрических машин и аппаратов. Вибрации, шумы и радиопомехи, допустимые нормы и способы их снижения. Электромагнитная совместимость электрических машин и аппаратов с системой и окружающим оборудованием.

Исторические сведения о развитии электромеханики, электрических и электронных аппаратов.

### **2. Методы исследования электрических машин с позиций теории цепей**

Электромеханическое преобразование энергии и физические законы, на которых оно основано.

Два подхода к описанию электромагнитных процессов в электрических машинах: с позиций теории поля и теории электрических цепей. Сравнительное сопоставление физического моделирования, аналитических и численных методов решения уравнений.

Обобщенная электрическая машина – математическая модель электрических машин всех типов. Допущения при записи уравнений обобщенной машины. Дифференциальные уравнения в различных системах координат. Уравнения Парка–Горева синхронной машины. Физический смысл параметров обобщенной машины – коэффициентов в дифференциальных уравнениях.

Уравнения установившегося режима работы асинхронных и синхронных машин. Векторные диаграммы и эквивалентные схемы замещения. Основные характеристики двигателей и генераторов.

Электромагнитный момент обобщенной электрической машины, уравнение движения ротора. Статические и динамические механические характеристики электродвигателей. Способы измерения момента.

Временные и пространственные гармоники в электрических машинах, параметры высших гармоник. Методы расчета гармоник магнитодвижущей силы (МДС) и магнитной индукции в воздушном зазоре с учетом формы зубцовой зоны сердечников и нелинейных свойств магнитной цепи.

Исследование электрических машин при несинусоидальном и несимметричном напряжении. Управление электрическими двигателями от полупроводниковых преобразователей. Работа синхронного генератора на выпрямительную нагрузку. Вентильные двигатели. Особенности работы электрических машин при пульсирующем токе.

Многообмоточные электрические машины. Математические модели асинхронных двигателей с двойной беличьей клеткой и синхронных машин с демпферными обмотками. Учет влияния вихревых токов, гистерезиса и потерь в стали.

Математическое моделирование электрических машин с изменяющимися параметрами. Учет вытеснения тока в проводниках, насыщения и изменения момента инерции.

Несимметричные электрические машины. Способы математического описания и математические модели синхронных и асинхронных машин с магнитной и электрической несимметрией статора и ротора. Однофазные двигатели переменного тока.

Электрическая машина как элемент электромеханической системы. Математические модели электрических машин с учетом внешних элементов, включенных в цепи статора и ротора.

### **3. Электромагнитное поле в электрических машинах**

Область поля электрической машины. Математическое описание электромагнитного поля электрической машины. Разделение области поля на вращающуюся и неподвижную части. Граничные и начальные условия.

Электромагнитная сила, действующая в области паза с током в магнитном поле (распределение силы между проводом и стенками паза). Зависимость силы от величины поля, полученная из энергетических соображений. Аналитические выражения электромагнитных сил и моментов.

Электродвижущая сила (ЭДС), индуцированная в проводнике, расположенном в пазу электрической машины, зависимость ее от индукции в зазоре.

Магнитное поле в гладком зазоре между статором и ротором. Магнитное поле в ярмах статора и ротора (учет кривизны, расчет магнитного напряжения, вытеснение магнитного потока в окружающее пространство).

Методы и результаты исследования магнитного поля в зубчатом воздушном зазоре. Поле в области пазов с током и без тока при односторонней и двусторонней зубчатости. Подход к вычислению удельной проводимости зазора. Коэффициент воздушного зазора.

Гармонический анализ удельной магнитной проводимости воздушного зазора, МДС и магнитной индукции в воздушном зазоре машин переменного тока.

Взаимная индукция однофазных и многофазных обмоток для токов прямой, обратной и нулевой последовательностей в машинах переменного тока.

Поле рассеяния в пазах различной формы. Расчет индуктивностей пазового, лобового и дифференциального рассеяния для однослойных и двухслойных однофазных обмоток.

Магнитное поле в области торцевых частей машины. Расчетная длина машины. Поле лобовых частей. Электромагнитные силы, действующие на лобовые части. Магнитные поля и параметры синхронных машин при симметричной и несимметричной нагрузках, переходные и сверхпереходные параметры.

Методы расчета электромагнитных полей в распределенных вторичных контурах (полый и массивный ротор в асинхронных машинах, массивные полюса и массивный неявнополюсный ротор в синхронных машинах). Эквивалентные параметры роторных контуров в асинхронных и синхронных машинах.

Влияние вихревых токов в проводниках, лежащих в пазу, на их активное и индуктивное сопротивление. Меры по уменьшению добавочных потерь в обмотках (транспозиция проводников, скрутка в лобовых частях).

#### **4. Коммутация коллекторных машин**

Щеточный контакт и его вольт-амперные характеристики. Уравнения классической теории коммутации, виды коммутационных процессов. Анализ факторов, влияющих на коммутацию. Способы улучшения коммутации. Критерии потенциальной устойчивости и меры борьбы с круговым огнем. Настройка коммутации.

#### **5. Потери и тепловые явления в электрических машинах**

Виды потерь и физические причины их возникновения в электрических машинах. Методики расчета основных и добавочных потерь в машинах переменного и постоянного тока. Коэффициент полезного действия электрических машин и трансформаторов, способы его расчетного и экспериментального определения.

Физические процессы нагревания и охлаждения электрических машин и трансформаторов. Уравнения теплообмена и тепловые параметры. Методы расчета переходных и установившихся температур. Эквивалентные тепловые схемы замещения электрических машин.

Электроизоляционные материалы и классы их нагревостойкости. Зависимость срока службы изоляции от температуры и режимов работы электрических машин.

Системы косвенного и непосредственного охлаждения электрических машин и трансформаторов. Расчет системы охлаждения. Способы интенсификации охлаждения. Тепловые испытания электрических машин.

## **6. Применение электронной вычислительной техники. Оптимизация электрических машин и трансформаторов**

Использование ЭВМ для исследования и проектирования электрических машин и трансформаторов. Области применения АВМ и ЦВМ. Математические модели электрических машин и трансформаторов, работающих в статических и динамических режимах.

Постановка задач оптимизации и методы их решения. Критерии оптимальности и лимитеры. Возможности машинного расчета и конструирования электрических машин и трансформаторов. Системы автоматизированного проектирования (САПР).

## **7. Специальные электрические машины**

Электрические машины автоматических устройств: исполнительные двигатели переменного и постоянного тока; синхронные микродвигатели с постоянными магнитами, шаговые, реактивные, гистерезисные, с электромагнитной редуцией частоты вращения; двигатели с катящимся и гибким волновым ротором; универсальные коллекторные двигатели; информационные электрические микромашины.

Многомерные электрические машины, двигатели со сферическим и коническим ротором, торцевые конструкции электрических машин, униполярные машины. Электрические машины колебательного и возвратно-поступательного движения, линейные и дугостаторные двигатели, МГД-генераторы и насосы. Электрические машины со сверхпроводящими обмотками. Емкостные электрические машины.

## **8. Трансформаторы**

Трансформаторы как электромагнитные преобразователи энергии. Физические процессы в трансформаторе. Магнитные системы и обмотки трансформаторов, группы соединения обмоток. Основные уравнения и схема замещения трансформатора. Параметры трансформаторов, методы их определения. Параллельная работа трансформаторов. Несимметричные режимы работы трансформаторов. Переходные процессы в трансформаторах. Классификация трансформаторов, их специальные типы.

## **9. Электрические аппараты**

Принципы построения макроскопических моделей электромеханических систем электрических аппаратов. Элементы, фазовые переменные, компонентные и топологические уравнения электрической, магнитной, механической и тепловой подсистем. Составление эквивалентных схем.

Методы анализа электромагнитных полей. Законы электромагнитного поля. Дифференциальные уравнения для параметров поля. Численные методы (метод конечных разностей, метод конечных элементов, метод интегральных уравнений) и программное

обеспечение для расчетов полей электромагнитных систем. Методы расчетов параметров макромоделей (ЭДС, индуктивностей, силовых характеристик) на основе анализа электромагнитного поля.

Магнитные материалы, применяемые в электрических аппаратах и машинах. Магнитные характеристики материалов. Методы и средства измерений магнитных полей, испытаний магнитных материалов и изделий из них.

Электродинамические силы в электрических аппаратах. Методы их расчета. Использование электродинамических сил. Электродинамическая стойкость электрических аппаратов.

Источники теплоты в электрических аппаратах. Методы анализа. Способы снижения потерь в электрических аппаратах. Теплопередача в окружающее пространство. Критерии подобия. Критериальные уравнения. Расчет коэффициентов теплопередачи. Задачи стационарной и нестационарной теплопроводности в электрических аппаратах. Нестационарный режим нагрева и остывания электрических аппаратов.

Контакты электрических аппаратов. Модели контактирования. Ом-вольтная характеристика контактов и сваривание контактов. Стационарный нагрев контактов в токопроводе. Одномерная модель неоднородного токопровода с контактами и распределение температур в нем.

Электрическая дуга отключения. Вольт-амперные характеристики стационарной и нестационарной дуги. Распределение потенциалов в дуге. Условия гашения электрической дуги в цепи постоянного тока. Шунтирование дуги. Условия гашения дуги переменного тока. Начальная прочность межконтактного промежутка после прохождения тока через нуль. Восстанавливающаяся прочность и восстанавливающееся напряжение. Влияние собственной частоты сети на процессы гашения дуги. Одночастотный и двухчастотный контуры – модели сети.

Электромеханические аппараты автоматики. Основные виды. Характеристики.

Электрические аппараты распределения энергии низкого напряжения. Основные виды. Характеристики. Методы выбора. Методы испытаний. Тенденции развития.

Электрические аппараты управления низкого напряжения. Основные виды. Характеристики. Методы выбора. Методы испытаний. Тенденции развития.

Электрические аппараты высокого напряжения. Основные виды. Виды выключателей высокого напряжения. Особенности конструкций, методов гашения дуги и эксплуатации.

Реакторы. Конструкции. Использование. Работа реакторов в комплекте с силовыми электронными коммутаторами.

Ограничители перенапряжений и разрядники. Устройство, характеристики. Особенности эксплуатации.

Испытания электрических аппаратов высокого напряжения. Статические (силовые электронные и магнитно-полупроводниковые) аппараты. Основные виды аппаратов, их функции и классификация. Сравнительный анализ статических и электромеханических аппаратов и области их рационального применения.

Силовые электронные ключи. Особенности коммутации электронных ключей. Статические и динамические режимы работы ключей. Области безопасной работы и защита электронных ключей.

Пассивные компоненты и охладители силовых электронных приборов. Влияние повышенной частоты и несинусоидальности напряжения на работу конденсаторов и реакторно–трансформаторного оборудования.

Системы управления силовыми электронными аппаратами. Обобщенные структурные схемы. Основные функциональные узлы и элементная база.

Микропроцессоры в управлении электрическими и электронными аппаратами. Структура и функции микропроцессора, микроконтроллера и примеры их применения в различных аппаратах.

Статические коммутационные аппараты постоянного и переменного токов. Функциональные возможности и области рационального применения. Гибридные коммутационные аппараты.

Статические регуляторы постоянного тока. Примеры импульсного регулирования параметров электрической энергии. Основные схемы импульсных регуляторов постоянного тока. Тиристорные регуляторы постоянного тока.

Статические регуляторы переменного тока. Тиристорные регуляторы переменного тока с естественной и искусственной коммутацией. Применение силовых транзисторов в регуляторах переменного тока. Регуляторы реактивной мощности.

Магнитно–полупроводниковые аппараты. Дроссели насыщения и основные способы подмагничивания. Магнитно-полупроводниковые ключи.

Феррорезонансный стабилизатор напряжения и тока. Принцип действия, характеристики и области применения.

### **Основная литература**

1. Беспалов В. Я. Электрические машины : [учебное пособие по направлению подготовки "Электротехника, электромеханика и электротехнологии"] / В. Я. Беспалов, Н. Ф. Котеленец. - Москва, 2010. - 312, [1] с. : ил., табл.
2. Вольдек А. И. Электрические машины. Машины переменного тока : учебник для вузов по направлению подготовки "Электротехника, электромеханика и электротехнологии" и "Электроэнергетика" / А. И. Вольдек, В. В. Попов. - СПб., 2007. - 349 с. : ил.. - Издательская программа 300 лучших учебников для высшей школы.
3. Вольдек А. И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы : учебник для вузов по направлению подготовки "Электротехника, электромеханика и электротехнологии" и "Энергетика" / А. И. Вольдек, В. В. Попов. - СПб. [и др.], 2007. - 319 с. : ил.. - Издательская программа 300 лучших учебников для высшей школы.
4. Юферов Ф. М. Электрические машины автоматических устройств : Учебник для вузов. - М., 1988. - 457,[4] с. : ил.
5. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины. В 2 т.. Т. 2 : учебник для вузов / А. В. Иванов-Смоленский. - Москва, 2006. - 531, [1] с. : ил.



6. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины. В 2 т.. Т. 1 : учебник для вузов / А. В. Иванов-Смоленский. - Москва, 2006. - 651, [1] с. : ил.
7. Копылов И. П. Электрические машины : учебник для электромех. и электроэнерг. специальностей вузов / И. П. Копылов. - М., 2004. - 607 с. : ил.
8. Жуловян В. В. Основы электромеханического преобразования энергии : [учебник] / В. В. Жуловян. - Новосибирск, 2014. - 425, [1] с. : ил.. - Режим доступа: [http://elibrary.nstu.ru/source?bib\\_id=vtls000214038](http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000214038)

### Дополнительная литература

1. Проектирование электрических машин /Под ред. И.П. Копылова. М.: Высш. шк., 2002.
2. Универсальный метод расчета электромагнитных процессов в электрических машинах /Под ред. А.В. Иванова–Смоленского. М.: Энергоатомиздат, 1986.
3. Розанов Ю.К. Основы силовой электроники. М.: Энергоатомиздат, 1992.
4. Жуловян В. В. Основы электромеханического преобразования энергии : учебное пособие / В. В. Жуловян ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2008. - 278, [2] с.. - Режим доступа: <http://www.ciu.nstu.ru/fulltext/textbooks/2008/zhulovyan.pdf>. - Инновационная образовательная программа НГТУ «Высокие технологии».
5. Евдокимов С. А. Структурный синтез многофазных вентильных преобразователей : [монография] / С. А. Евдокимов, Н. И. Щуров. - Новосибирск, 2010. - 422 с. : ил.. - Режим доступа: [http://elibrary.nstu.ru/source?bib\\_id=vtls000139272](http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000139272). - Парал. тит. л. англ..
6. Тюков В. А. Электромеханические системы : учебное пособие / В. А. Тюков ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2006. - 179, [1] с. : ил.. - Режим доступа: <http://www.library.nstu.ru/fulltext/metodics/2006/tyuk.rar>
7. Сили С. Электромеханическое преобразование энергии / С. Сили ; пер. с англ. Н. Ф. Ильинского. - М, 1968. - 375, [1] с. : ил., табл., схемы
8. Уайт Д. С. Электромеханическое преобразование энергии / Д. Уайт и Г. Вудсон ; пер. с англ. Н. Ф. Ильинского [ и др.]; под ред. С. В. Страхова. - М. ;, 1964. - 526, [2] с. : ил., табл.
9. Леви Э. Электромеханическое преобразование энергии / Э. Леви, М. Панцер ; пер. с англ. Ю. И. Чалисова, В. Ф. Мещерякова ; под ред. Э. А. Маеровича. - М., 1969. - 556 с. : ил.

### Дополнительная программа кандидатского экзамена по специальности

#### 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты»

1. Двигатели с амплитудной модуляцией магнитного потока
  - 1.1. Индукторные машины. Основные конструктивные схемы. Одноименно-полюсные и разноименно-полюсные машины. Геометрия и виды зубцовых зон. Способы выполнения многофазных индукторных машин.
  - 1.2. Электромагнитное поле в воздушном зазоре индукторных машин. Методы расчета. Представление энергопреобразования в индукторных машинах.
  - 1.3. Индукторная машина двойного питания. Синхронные и асинхронные машины. Математические модели машин. Схемы замещения для анализа установившегося и переходного режимов.

- 1.4. Двигатели с электромагнитной редукцией частот вращения (скорости) (ДЭР). Создание рабочих гармоник поля за счет зубчатости только на роторе, зубчатости на статоре и роторе. Взаимосвязь полнотности обмоток с числом зубцов ротора и статора.
  - 1.5. Двигатели с катящимся ротором. Сущность электромеханической редукции скорости (частоты вращения). Единство механического преобразования ДКР и ДЭР.
  - 1.6. Сравнительная оценка различных типов ДЭР синхронных и асинхронных по технико-экономическим показателям. Влияние размещения обмоток, геометрии зубцовой зоны и магнитной системы в целом на выходные характеристики машины.
  - 1.7. Способы пуска синхронных ДЭР, их оценка по способу реализации, по пусковым показателям.
2. Электрические машины с постоянными магнитами
    - 2.1. Магнитные параметры и свойства основных материалов для постоянных магнитов. Аппроксимация кривой размагничивания и линий магнитного возврата. Рабочая диаграмма магнита. Особенности расчёта магнитных цепей с постоянными магнитами
    - 2.2. Магнитные системы с цилиндрическим магнитом, со звездообразным ротором, с когтеобразным ротором, с ротором коллекторного типа, с кольцевыми и вставными магнитами. Магнитные системы и конструкции генераторов переменного тока комбинированного возбуждения. Конструкции авиационных и автотракторных генераторов с ПМ. Конструкция ЭМ с ПМ с дробными зубцовыми обмотками. Вентильные двигатели с ПМ.
    - 2.3. Система дифференциальных уравнений синхронных двигателей с ПМ. Параметры синхронных машин с радиальным расположением магнитов и короткозамкнутой обмоткой ротора. Параметры синхронных машин с аксиальным расположением магнитов и короткозамкнутой обмоткой ротора. Параметры СМ с ротором коллекторного типа. Переходные параметры насыщенных и ненасыщенных синхронных машин с ПМ с учётом демпфирования потока в магнитных частях магнитопровода и демпфирующих контурах в алюминиевых заливках
    - 2.4. Синхронный режим работы двигателя с ПМ. Токи и мощности в синхронном режиме. Электромагнитный момент. Электрическая схема замещения и диаграмма токов. Особенности рабочего процесса синхронных генераторов с ПМ. Режим холостого хода и рабочая диаграмма магнита. Рабочий режим синхронных генераторов с ПМ. Графический метод построения рабочей диаграммы магнита. Электромагнитные и рабочие характеристики синхронных генераторов с постоянными магнитами. Моделирование переходных процессов синхронных машин с ПМ. Режим внезапного КЗ синхронного генератора с ПМ и размагничивающее действие поля реакции якоря. Пусковой режим синхронных двигателей с ПМ. Токи пускового режима. Электромагнитные моменты в асинхронном режиме. Вхождение в синхронизм. Влияние параметров на синхронизацию.
  3. Малоинерционные электродвигатели постоянного и переменного тока
    - 3.1. Динамические и регулировочные свойства исполнительных электродвигателей постоянного тока, постоянные времени якоря, диапазон регулирования, точность реализуемых движений, собственное быстроедействие, приемистость, тепловая постоянная якоря.
    - 3.2. Ограничения динамических, массогабаритных и энергетических показателей электродвигателей постоянного и переменного тока классической конструкции с электромагнитным возбуждением и зубцово-пазовой структурой якоря.
    - 3.3. Особенности электродвигателей с возбуждением от постоянных магнитов. Высокомоментные электродвигатели и их приоритетные параметры.
    - 3.4. Конструкции малоинерционных электродвигателей – с гладким якорем, с полым и дисковым печатным якорем, с полым и дисковым немагнитным проволочным якорем. Их динамические свойства и конструктивно-технологические ограничения этих свойств.
    - 3.5. Особенности электромагнитного расчета магнитоэлектрических и индукционных малоинерционных электродвигателей различных типов.
    - 3.6. Особенности режимов работы малоинерционных электродвигателей с немагнитным якорем при импульсном питании в системах ИМ-Д.
    - 3.7. Малоинерционные электродвигатели с комбинированным возбуждением, особенности конструкции, режимов работы, способов управления и т.д.
  4. Линейные электродвигатели
    - 4.1. Линейные электродвигатели переменного тока
      - 4.1.1. Разработка линейных электродвигателей как проявление социального заказа. Исторический обзор основных работ по линейным электродвигателям.
      - 4.1.2. Линейные асинхронные электродвигатели (ЛАД). Их особенности, основные конструктивные схемы, классификация. Сравнение ЛАД с асинхронными двигателями нормального исполнения (механические и энергетические характеристики).

- 4.1.3. Продольный и поперечный краевые эффекты в ЛАД, их природа и характер проявления. Способы компенсации краевых эффектов.
- 4.1.4. Одномерная модель ЛАД, ее достоинства и недостатки. Анализ распределения электромагнитного поля в зазоре ЛАД в двумерной модели. Квази-трехмерные модели ЛАД.
- 4.1.5. Схемы замещения ЛАД и определение их параметров. Расчет характеристик ЛАД при их работе с постоянным значением тока или постоянным значением напряжения.
- 4.1.6. Аналоговые модели ЛАД и их применение к расчету характеристик машин. Применение ЭВМ для расчета характеристик.
- 4.1.7. Линейные синхронные электродвигатели (ЛСД), их классификация и возможные области применения. Особенности электромагнитных процессов в ЛСД.
- 4.1.8. Двухкоординатные линейные электродвигатели. Особенности конструкции и режимов работы.
- 4.2. Линейные электродвигатели постоянного тока.
  - 4.2.1. Линейные двигатели постоянного тока (ЛДПТ), их классификация и области применения. Преимущества и недостатки ЛДПТ по сравнению с ЛАД.
  - 4.2.2. Особенности электромагнитных процессов в ЛДПТ. Краевые эффекты и пульсация электромагнитной силы. Способы компенсации краевых эффектов и подавления пульсаций силы в ЛДПТ.
  - 4.2.3. Коммутация в ЛДПТ. Механические коллекторы линейных двигателей. Бесконтактные ЛДПТ, конструкции силовой части электронных коммутаторов и датчиков положения секций якоря относительно индуктора.
  - 4.2.4. Использование постоянных магнитов в ЛДПТ. Способы расчета магнитных систем ЛДПТ с постоянными магнитами. Намагничивание индукторов магнитоэлектрических ЛДПТ. Материалы для индукторов ЛДПТ.
  - 4.2.5. Методы исследования электромагнитных процессов в ЛДПТ. Теоретическое и экспериментальное определение основных характеристик (краткое описание или классификация известных методов).
5. Тенденции развития конструкций и теории электрических машин с составными активными объемами
  - 5.1. Конструктивно-технологические ограничения дальнейшего повышения технического уровня современных электрических машин общепромышленного применения (в частности, асинхронных электродвигателей с шихтованным магнитопроводом и зубцово-пазовыми обмоточными структурами).
  - 5.2. Патентная конъюнктура конструктивно-технологических решений, обеспечивающих снижение технологических отходов и повышение уровня использования активных объемов электрических машин.
    - 5.2.1. Электрические машины с витым магнитопроводом.
    - 5.2.2. Электрические машины с активным распределенным обмоточным слоем.
    - 5.2.3. Электрические машины с гофрированными обмоточными зонами.
    - 5.2.4. Торцевые электрические машины.
  - 5.3. Принципы ортотропного моделирования электрических машин.
    - 5.3.1. Математическое описание электромагнитных полей в активных конструктивных зонах с измельченной структурой.
    - 5.3.2. Общие решения уравнений электродинамики в конструктивных зонах электрических машин с плоской, торцевой и цилиндрической формой воздушного зазора.
    - 5.3.3. Применение теоремы Умова-Пойнтинга для определения интегральных характеристик электрических машин нетрадиционной конструкции.
  - 5.4. Каскадные схемы замещения неявнополюсных электрических машин с составными активными объемами.
    - 5.4.1. Следствие теоремы Умова-Пойнтинга о схемной аппроксимации линейных сред, находящихся под воздействием электромагнитного поля.
    - 5.4.2. Синтез типовых Е-Н четырехполюсников для плоских активных ортотропных зон электрических машин.
    - 5.4.3. Типовые Е-Н четырехполюсники для активных зон цилиндрических и торцевых электрических машин.
    - 5.4.4. Линейные каскадные схемы замещения неявнополюсных электрических машин.
    - 5.4.5. Особенности синтеза нелинейных каскадных схем электрических машин с составными активными объемами.

## Литература

## Основная литература

1. Юферов Ф.М., Осин И.Л. Электрические машины автоматических устройств. М.: Изд-во МЭИ, 2003
2. Жуловян В.В. Основы электромеханического преобразования энергии. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – 352 с
3. Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: Магнитные цепи, поля и программа FEMM. «Академия», 2005. – 336 с.
4. Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: Программа ANSYS. «Академия», 2006. – 288 с.
5. Инкин А.И. - Электромагнитные поля и параметры электрических машин: Учебное пособие для вузов. ЮКЕА, 2002. – 464 с.
6. Иванов\_Смоленский А.В. Электрические Машины В 2<sup>-X</sup> Т. Том 1.: Учебник Для Вузов. – 2е Изд. Перераб./ А.В. Иванов\_Смоленский. – М.: Изд-Во МЭИ, 2004. – 656 С.
7. Иванов\_Смоленский А.В. Электрические Машины В 2<sup>-X</sup> Т. Том 2.: Учебник Для Вузов. – 2е Изд. Перераб./А.В. Иванов\_Смоленский. – М.: Изд-Во МЭИ, 2004. – 532 С
8. Проектирование электрических машин : учебник для электромеханических и электроэнергетических специальностей вузов / [И. П. Копылов и др.] ; под ред. И. П. Копылова. - М., 2005. - 766, [1] с. : ил., табл.
9. Специальные электрические машины. Источники и преобразователи энергии. В 2 кн.. Кн. 1 : учебное пособие для электромеханических, электротехнических и электроэнергетических специальностей вузов / [ А. И. Бертинов, и др.] ; под ред. Б. Л. Алиевского. - М., 1993. - 319, [1] с. : ил., схемы
10. . Специальные электрические машины. Источники и преобразователи энергии. В 2 кн.. Кн. 2 : учебное пособие для электромеханических, электротехнических и электроэнергетических специальностей вузов / А. И. Бертинов [и др.] ; под ред. Б. Л. Алиевского. - М., 1993. - 367 с. : ил.
11. Гольдберг О. Д. Инженерное проектирование и САПР электрических машин : учебник / О. Д. Гольдберг, И. С. Свириденко. - М., 2008. - 558, [1] с. : ил., табл.

## Дополнительная литература

1. Шевченко А. Ф. Сравнение возможностей аналитического и численного методов моделирования электрической машины / А. Ф. Шевченко, Г. Б. Вяльцев // Электротехника. - 2011. - № 6. - С. 20-24.
2. . Моделирование тягового вентильно-индукторного привода для автономных транспортных средств / М. А. Слепцов [и др.] // Электричество. - 2011. - № 10. - С. 31-35
3. Приступ А. Г. Исследование пульсаций момента синхронных магнитоэлектрических машин с дробными зубцовыми обмотками / А. Г. Приступ, Д. М. Топорков, А. Ф. Шевченко // Электротехника. - 2014. - № 12. - С. 36-40.
4. Особенности конструкции и проектирования энергоэффективных магнитоэлектрических электродвигателей общепромышленного назначения / А. Ф. Шевченко [и др.] // Электротехника. - 2014. - № 12. - С. 41-44.

5. Шевченко А. Ф. Магнитодвижущая сила однозубцовых дробных обмоток с  $q < 1$  / А. Ф. Шевченко // Научный вестник НГТУ. - Новосибирск : Изд-во НГТУ, 1996.. - № 2. – С. 99-110.
6. Шевченко А. Ф. Математическая модель синхронного реактивного двигателя с дробными зубцовыми обмотками / А. Ф. Шевченко // Автоматизированные электромеханические системы : сб. науч. тр.. - Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2001. - С. 134-140.
7. Шевченко А. Ф. Синхронные двигатели с переменным магнитным сопротивлением с дробными ( $q < 1$ ) однозубцовыми обмотками / А. Ф. Шевченко // Научный вестник НГТУ. - Новосибирск : Изд-во НГТУ, 1997.. - № 3. – С. 177-188.
8. Шевченко А. Ф. Оптимизация геометрических соотношений зубцово-пазовой зоны синхронного двигателя с модулированным магнитным потоком и гладким гармоническим ротором / А. Ф. Шевченко, Л. Г. Шевченко // Автоматизированные электромеханические системы : сб. науч. тр.. - Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2008.. - С. 154–160.
9. Жуловян В. В. Схема замещения синхронных машин с модулированным магнитным потоком с постоянными магнитами с учетом потерь в стали / В. В. Жуловян, А. Ф. Шевченко // Науч. вестн. НГТУ. - Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2000. - № 1 (8). - С. 127-136.
10. Бухгольц Ю. Г. Определение оптимального значения индукции в воздушном зазоре синхронных машин с постоянными магнитными / Ю. Г. Бухгольц, Л. Г. Шевченко // Автоматизированные электромеханические системы : [сб. науч. тр.]. - Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. - С. 142-150.. - RU-NoGTU 681.5 A224 ru
11. Дискретный шаговый электропривод/ Под ред. Чиликина М.Г. М.: Энергия, 1971.
12. Бертинов А.И., Варлей В.В. Двигатели с катящимся ротором. М.: Энергия, 1969.
13. Борзяк Ю.Г., Зайков М.А., Панин В.Н. Электродвигатели с катящимся ротором. Киев: «Техника», 1982.
14. Каасик Т.Ю. Тихоходные безредукторные электродвигатели. Л., 1974
15. Жуловян В.В., Шевченко А.Ф. Исследование пуска синхронных двигателей с электромагнитной редукцией скорости вращения // Электромеханика, 1977, №1.
16. Каган В.Т. Электроприводы с предельным быстродействием для систем воспроизведения движений. М.: Энергия, 1975.
17. Электрические машины с малоотходным магнитопроводом и нетрадиционными обмоточными структурами. Новосибирск: изд-во НЭТИ, 1985.