

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Вишнёвский Дмитрий Александрович
Должность: Руководитель
Дата подписания: 30.04.2025 11:55:50
Уникальный программный ключ:
03474917c4d012283e5ad996a48a5e0f8d4ad7

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
(МИНОБРНАУКИ РОССИИ)

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «ДонГТУ»)

Факультет	информационных технологий и автоматизации производственных процессов
Кафедра	электромеханики им. А. Б. Зеленова



УТВЕРЖДАЮ

И. о. проректора по учебной работе
Д. В. Мулов

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Методы анализа электромагнитных процессов электрических машин
(наименование дисциплины)

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
(код, наименование направления)

Электрические машины и аппараты
(магистерская программа)

Квалификация _____ магистр
(бакалавр/специалист/магистр)

Форма обучения _____ очная, заочная
(очная, очно-заочная, заочная)

Алчевск, 2024

1 Цели и задачи изучения дисциплины

Цель дисциплины. Целью изучения дисциплины «Методы анализа электромагнитных процессов электрических машин» является:

- развитие творческих способностей обучающихся, повышение уровня их профессиональной подготовки;
- подготовка обучающихся к выполнению научной работы, к использованию современных компьютерных средств при решении задач профессиональной деятельности, к преподавательской деятельности.

Задачами освоения дисциплины является систематизация, закрепление и интегрирование ранее полученных знаний по профессиональным дисциплинам магистерской подготовки применительно к практическим задачам исследования электрических машин и аппаратов, а также усвоения знаний при выполнении экспериментальных и теоретических исследований, получения практических навыков научной работы.

Задачами изучения дисциплин: является систематизация, закрепление и интегрирование ранее полученных знаний по профессиональным дисциплинам магистерской подготовки применительно к практическим задачам исследования электрических машин и аппаратов, а также усвоения знаний при выполнении экспериментальных и теоретических исследований, получения практических навыков научной работы.

Дисциплина направлена на формирование компетенции ОПК-1

2 Место дисциплины в структуре ОПОП ВО

Логико-структурный анализ дисциплины: курс входит в часть Блока 1, формируемая участниками образовательных отношений «Элективные курсы»

Дисциплина реализуется кафедрой электрических машин и аппаратов. Основывается на базе дисциплин ОПОП подготовки бакалавра: «Высшая математика», «Специальный курс электрических машин», «Моделирование электромеханических систем», курс для магистров: «Дополнительные главы математики».

Математические и естественнонаучные дисциплина, а также дисциплина гуманитарного, социального и экономического цикла формируют начальные знания и умения необходимые для изучения дисциплины «Методы анализа электромагнитных процессов в электромеханических устройствах».

Знания и навыки, полученные при изучении дисциплины «Методы анализа электромагнитных процессов электрических машин», являются как предшествующие для изучения курсов «Автоматизированные системы научных исследований», «Научно-исследовательская работа» при выполнении выпускной квалификационной работы магистра.

Для изучения дисциплины необходимы компетенции, сформированные у студента для решения профессиональных задач деятельности, связанных с применением аппаратных и программных средств компьютеров для решения задач электромеханики.

Общая трудоемкость освоения дисциплины составляет 7 зачетных единицы, 252 ак.ч. Программой дисциплины предусмотрены лекционные (36 ак.ч. для групп ЭМАм, 6 ак.ч. для группы ЭМАм-з), практические занятия (72 ак.ч. для групп ЭМА и ЭМА-у, 6 ак.ч. для группы ЭМАм-з) и самостоятельная работа студента (144 ак.ч. для групп ЭМАм, 240 ак.ч. для группы ЭМА-м-з).

Дисциплина изучается на 1 курсе магистратуры в 1 семестре. Форма промежуточной аттестации – экзамен.

3 Перечень результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения ОПОП ВО

Процесс изучения дисциплины «Методы анализа электромагнитных процессов электрических машин» направлен на формирование компетенции, представленной в таблице 1

Таблица 1 – Компетенции, обязательные к освоению

Содержание компетенции	Код компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции
Способен формулировать цели и задачи исследования, выявлять приоритеты решения задач, выбирать критерии оценки	ОПК-1	ОПК-1.1. Знать возможности различных методов исследования ПП с учетом целей и задач исследования ОПК-1.2. Уметь разрабатывать математические модели и упрощать их с учетом целей и задач исследований. ОПК-1.3. Владеть методами решения математических моделей: аналитическими и численными методами

4 Объём и виды занятий по дисциплине

Общая трудоёмкость учебной дисциплины составляет 7 зачётных единицы, 252 ак.ч.

Самостоятельная работа студента (СРС) включает проработку материалов лекций, подготовку к лабораторным работам, текущему контролю, самостоятельное изучение материала и подготовку к экзамену.

При организации внеаудиторной самостоятельной работы по данной дисциплине используются формы и распределение бюджета времени на СРС для очной формы обучения в соответствии с таблицей 2.

Таблица 2 – Распределение бюджета времени на СРС

Вид учебной работы	Всего ак.ч.	Ак.ч. по семестрам
		1 семестр
Аудиторная работа, в том числе:	108	108
Лекции (Л)	36	36
Практические занятия (ПЗ)	72	72
Лабораторные работы (ЛР)	-	-
Курсовая работа/курсовой проект	-	-
Самостоятельная работа студентов (СРС), в том числе:	144	144
Проработка лекционного материала	9	9
Подготовка к лабораторным работам	-	-
Подготовка к практическим занятиям / семинарам	36	36
Выполнение курсовой работы / проекта	-	-
Расчетно-графическая работа (РГР)	-	-
Домашнее задание	30	30
Подготовка к контрольной работе	-	-
Подготовка к коллоквиуму	12	12
Аналитический информационный поиск	21	21
Работа в библиотеке	18	18
Подготовка к экзамену	18	18
Промежуточная аттестация – экзамен (Э)	Э	Э
Общая трудоемкость дисциплины		
ак.ч.	252	252
з.е.	7	7

5 Содержание дисциплины

С целью освоения компетенций, приведенных в п. 3 дисциплина разбита на 4 темы.

Тема 1. Основы математической теории электрических машин.

Тема 2 Аналитические методы исследования переходных процессов и их практическое применение.

Тема 3. Теория и методы исследования динамической устойчивости электрических машин.

Тема 4. Методы решения уравнений нелинейной математической модели электрических машин .

Виды занятий по дисциплине и распределение аудиторных часов для очной и заочной формы приведены в таблице 3 и таблице 4, соответственно.

Таблица 3 – Виды занятий по дисциплине и распределение аудиторных часов (очная форма обучения)

№ п/п	Наименование темы (раздела) дисциплины	Содержание лекционных занятий	Трудо-емкость в ак.ч.	Темы практических занятий	Трудо-емкость в ак.ч.	Тема лабораторных занятий	Трудо-емкость в ак.ч.
1	Основы математической теории электрических машин	Вводная лекция. Типы переходных процессов и методов их исследования. Аналитические методы решения дифференциальных уравнений. Основы численных методов решения нелинейных уравнений. метод	4	Вводное занятие. ТБ при работе на ПЭВМ Операторный метод решения дифференциальных уравнений	4	—	—
		Уравнение напряжений явнополусной синхронной машины в фазный системе координат. Потокосцепления и индуктивности реальных обмоток синхронной явнополусной машины и их зависимость от положения ротора. Замена короткозамкнутых многофазных обмоток ротора машин переменного тока эквивалентными двухфазными обмотками. Параметры эквивалентных роторных обмоток.	6	Решение задач методами Эйлера Обработка полученных результатов	4	—	—
		Преобразование переменных. Преобразование уравнений равновесия напряжения к осям d, q. Уравнение равновесия напряжения синхронной машины в относительных единицах. Уравнения Парка-Горева. Электромагнитный момент вращения синхронной машины в осях d, q.	6	Решение задач методами Рунге-Кутты Решение задач методами Адамса	6	—	—
		Преобразование уравнений равновесия напряжения к осям α , β . Параметры синхронной машины в установившемся режиме. Уравнения дви-	4	Внезапное к.з. двух обмоточного трансформатора	8	—	—

№ п/п	Наименование темы (раздела) дисципли- ны	Содержание лекционных занятий	Трудо- емкость в ак.ч.	Темы практических занятий	Трудо- емкость в ак.ч.	Тема лабора- торных занятий	Трудо- емкость в ак.ч.
		жения ротора обобщенной машины. Общая математическая модель синхронной машины в виде преобразованном для исследований в среде MathCAD			—	—	—
2	Аналитические методы исследования переходных процессов процессов и их практическое применение	Операторный метод решения дифференциальных уравнений. Потокосцепления обобщенной машины в операторной форме $\Psi_d(p)$ $\Psi_q(p)$ в функции токов $i_d(p)$ и $i_q(p)$. Главные индуктивные сопротивления машин в операторной форме. Сверхпереходное и переходное индуктивное сопротивление обобщенной машины. Переходные индуктивные сопротивления обобщенной машины в функции постоянных времени	4	Аналитическое исследование переходных процессов пуска СД без демпферной обмотки на холостом ходу: -путем решения дифференциальных уравнений операторным методом; - путем моделирования на ПЭВМ	4	—	—
		Трехфазное короткое замыкание синхронного генератора с одним контуром на роторе. Решение системы уравнений при условии постоянства скорости вращения ротора	4	Исследование влияния демпферное обмотки на свободные колебания ротора: -путем решения дифференциальных уравнений операторным методом; - путем моделирования на ПЭВМ	8	—	—

№ п/п	Наименование темы (раздела) дисциплины	Содержание лекционных занятий	Трудо- емкость в ак.ч.	Темы практических занятий	Трудо- емкость в ак.ч.	Тема лабора- торных занятий	Трудо- емкость в ак.ч.
3	Теория и методы исследования динамической устойчивости электрических машин. Исследование динамической устойчивости синхронной машины.	Общая характеристика динамической устойчивости и методов ее исследования. Моменты, которые действуют на ротор синхронной машины при малых возмущениях. Собственные и вынужденные колебания ротора. Влияние демпферной обмотки на собственные и вынужденные колебания ротора. Движение ротора при наличии гармонических составляющих сил сопротивления. Явление резонанса.	4	Исследование влияния гармонической составляющей сил сопротивления на колебания ротора СМ без демпферной обмотки: -путем решения дифференциальных уравнений операторным методом; - путем моделирования на ПЭВМ	6	—	—
				- исследование явления биений СМ без демпферной обмотки; - исследование резонанса СМ без демпферной обмотки	6	—	—
4	Методы решения уравнений нелинейной математической модели электрических машин	Численные методы: Рунге-Кутта второго и четвертого порядка точности, метод Адамса. Математическая модель синхронной машины в системе координат d, q. Системы координатных осей, применяемых для исследования асинхронных машин. Математическая модель асинхронной машины в системе координат u, v, которые вращаются с произвольной угловой скоростью.	4	Исследование влияния гармонической составляющей сил сопротивления на колебания ротора СМ с демпферной обмоткой: -путем решения дифференциальных уравнений операторным методом; - путем моделирования на ПЭВМ	6	—	—
				- исследование явления биений СМ с демпферной обмоткой; - исследование резонанса СМ с демпферной обмоткой	6	—	—
				Метод учета влияния эффекта вытеснения тока путем разбиения стержня на слои для	2		

№ п/п	Наименование темы (раздела) дисципли- ны	Содержание лекционных занятий	Трудо- емкость в ак.ч.	Темы практических занятий	Трудо- емкость в ак.ч.	Тема лабора- торных занятий	Трудо- емкость в ак.ч.
				Пакет ELCUT для решения поле- вых задач в электромеханике	4		
				COMSOL Multiphysics – пакет про- грамм для исследования магнитных полей машины.	4		
				MATLAB/Simulink , как язык про- граммирования высокого уровня/ среда для проектирования систем управления, обработка сигналов, моделирование систем связи	4		
Всего аудиторных часов			36		72	–	–

Таблица 4 – Виды занятий по дисциплине и распределение аудиторных часов (заочная форма обучения)

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание лекционных занятий	Трудо- емкость в ак.ч.	Тема практических занятий	Трудо- емкость в ак.ч.	Трудо- емкость в ак.ч.	Тема лабора- торных занятий
1	Основы математиче- ской теории электри- ческих машин	Типы переходных процессов и мето- дов их исследования. Аналитические методы решения дифференциальных уравнений. Основы численных мето- дов решения нелинейных уравнений.	2	–	–	–	–

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание лекционных занятий	Трудо- емкость в ак.ч.	Тема практических занятий	Трудо- емкость в ак.ч.	Трудо- емкость в ак.ч.	Тема лабора- торных занятий
2	Аналитические методы исследования переходных процессов процессов и их практическое применение	Операторный метод решения дифференциальных уравнений. Потокосцепления обобщенной машины в операторной форме $\Psi_d(p)$ $\Psi_q(p)$ в функции токов $i_d(p)$ и $i_q(p)$. Уравнения Парка-Горева в операторной форме	2	—	—	—	—
3-4	Теория и методы исследования динамической устойчивости электрических машин. Исследование динамической устойчивости синхронной машины.	Общая характеристика динамической устойчивости и методов ее исследования. Моменты, которые действуют на ротор синхронной машины при малых возмущениях. Собственные и вынужденные колебания ротора.	2	Исследование динамической устойчивости СМ при малых колебаниях ротора	6	—	—
Всего аудиторных часов			6	—	6	—	—

6 Фонд оценочных средств для проведения текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины

6.1 Критерии оценивания

В соответствии с Положением о кредитно-модульной системе организации образовательного процесса ФГБОУ ВО «ДонГТУ» (<https://www.dstu.education/sveden/eduQuality>) при оценивании сформированности компетенций по дисциплине используется 100-балльная шкала.

Перечень компетенций по дисциплине и способы оценивания знаний приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Перечень компетенций по дисциплине и способы оценивания знаний

Код и наименование компетенции	Способ оценивания	Оценочное средство
ОПК-1	Экзамен	Комплект контролирующих материалов для экзамена

Всего по текущей работе в семестре студент может набрать 100 баллов, в том числе:

- тестовый контроль или устный опрос на коллоквиуме: «Применение уравнения Парка-Горева для исследования переходных процессов» - 40 баллов
- проведение исследований динамической устойчивости синхронной машины при малых колебаниях ротора (3 отчета) – $3 \times 20 = 60$ баллов

Экзамен проставляется автоматически, если студент набрал в течение семестра не менее 60 баллов и отчитался за каждую контрольную точку. Минимальное количество баллов по каждому из видов текущей работы составляет 60% от максимального.

Экзамен по дисциплине «Методы анализа электромагнитных процессов электрических машин» проводится по результатам работы в семестре. В случае, если полученная в семестре сумма баллов не устраивает студента, во время сессии студент имеет право повысить итоговую оценку либо в форме устного собеседования по приведенным ниже вопросам (п. 6.5), либо в результате тестирования.

Шкала оценивания знаний при проведении промежуточной аттестации приведена в таблице 6.

Таблица 6 – Шкала оценивания знаний

Сумма баллов за все виды учебной деятельности	Оценка по национальной шкале зачёт/экзамен
0-59	Не зачтено/неудовлетворительно
60-73	Зачтено/удовлетворительно
74-89	Зачтено/хорошо
90-100	Зачтено/отлично

6.2 Домашние задания

Для студентов очной формы обучения домашние задания не предусмотрены. В контрольную работу, которую должны выполнить студенты заочной формы обучения, входят работы по исследованию динамической устойчивости синхронного двигателя, спроектированного студентом при обучении на бакалавриате или с данными, выдаваемыми преподавателем. Программы исследований приведены в соответствующих методических указаниях ().

6.3 Темы рефератов

Написание реферата учебным планом не предусмотрено

6.4 Оценочные средства для самостоятельной работы и текущего контроля успеваемости

Тема 1 Основы математической теории электрических машин

- 1) Назовите типы переходных процессов и охарактеризуйте методы их исследования.
- 2) Какие аналитические методы решения дифференциальных уравнений применяются при исследовании задач электромеханики?
- 3) Какие преимущества дают аналитические методы решения математических моделей перед использованием численных методов при анализе переходных режимов?
- 4) Составьте математическую модель явнополюсной синхронной машины в фазной системе координат.
- 5) Покажите, как потокосцепления и индуктивности реальных обмоток и синхронной явнополюсной машины зависят от положения ротора.
- 6) Объясните, как можно в математической модели заменить короткозамкнутую многофазную обмотку ротора эквивалентной двухфазной обмоткой?
- 7) Какие системы координатных осей нашли применение в теории электрических машин?
- 8) Охарактеризуйте прием преобразования переменных как метод упрощения математических моделей электрических машин.
- 9) Проведите преобразование уравнений равновесия напряжений, подаваемых на трехфазную обмотку статора к осям d , q , связанных с ротором.

10) В чем преимущество использования относительных единиц при исследовании переходных процессов?

11) Приведите систему базовых единиц, которая нашла применение при исследовании динамических режимов электрических машин.

12) Запишите уравнение равновесия напряжений синхронной машины в относительных единицах.

13) Объясните уравнения Парка-Горева в абсолютных и относительных единицах.

14) Покажите, как определяется электромагнитный момент синхронной машины в осях d , q , связанных с ротором.

15) Охарактеризуйте уравнения Парка-Горева в осях α , β и объясните область их применения.

16) Составьте уравнение движения ротора обобщенной машины в виде, преобразованном для исследований в среде MathCAD.

Тема 2 Аналитические методы исследования переходных процессов и их практическое применение

1) Опишите алгоритм применения операторного метода решения дифференциальных уравнений.

2) Объясните алгоритм использования теорема разложения, формул Эйлера.

3) Как получить зависимость потокосцепления обмоток обобщенной машины в операторной форме $\Psi_d(p)$, $\Psi_q(p)$ в функции токов $i_d(p)$ и $i_q(p)$?

4) Какие сопротивления обобщенной машины являются главными индуктивными сопротивлениями? Как их получить в операторной форме?

5) Какие сопротивления обобщенной машины называются сверхпереходными и переходными индуктивными сопротивлениями?

6) Запишите выражения переходных индуктивных сопротивлений обобщенной машины в функции постоянных времени машины.

7) Запишите математическую модель трехфазного короткого замыкания синхронного генератора с одним контуром на роторе. Дайте математическую интерпретацию короткого замыкания обмотки.

8) Приведите алгоритм исследования короткого замыкания синхронного генератора при условии постоянства скорости вращения его ротора.

9) Покажите, как можно использовать результаты исследования симметричного режима КЗ синхронного генератора без демпферной обмотки для анализа переходных процессов синхронного генератора с демпферной обмоткой?

Тема 3 Теория и методы исследования динамической устойчивости электрических машин. Исследование динамической устойчивости синхронной машины.

1. Дайте определение статической и динамической устойчивости электрической машины.

2. Какой момент называется синхронным? Запишите выражение синхрон-

ного момента при малых колебаниях угла нагрузки электрической машины.

3. Какой момент называется синхронизирующим? Запишите выражение синхронизирующего момента обобщенной машины при малых колебаниях угла нагрузки

4. Назовите источники момента сил сопротивления на валу синхронной машины:

- постоянный момент и его влияние на величину угла нагрузки;
- гармонические составляющие момента сил сопротивления и их влияние на величину угла нагрузки.

4. Запишите и объясните математическую модель синхронной машины для исследования механических переходных процессов. Возможно ли ее решить аналитическими методами?

5. Объясните, почему угол нагрузки синхронной машины без демпферной нагрузки при отсутствии гармонических составляющих момента сил сопротивления будет изменяться по гармоническому закону? В каких случаях эти колебания не будут приводить к выпадению машины из синхронизма?

6. Объясните, какое влияние оказывает короткозамкнутая обмотка на роторе на собственные колебания угла нагрузки СМ при отсутствии гармонических составляющих момента сил сопротивления.

7. Какое влияние на угол нагрузки синхронной машины оказывает постоянная составляющая момента сил сопротивления и как это сказывается на устойчивости работы машины?

8) Какое влияние на угол нагрузки синхронной машины оказывает гармоническая составляющая момента сил сопротивления и как это сказывается на устойчивости работы машины?

9) При каких условиях возникают биения угла нагрузки синхронной машины и как они влияют на динамическую устойчивость синхронной машины?

10) При каких условиях возникает резонанс при малых начальных изменениях угла нагрузки угла нагрузки синхронной машины и как явление резонанса влияет на динамическую устойчивость синхронной машины?

11 Какое влияние демпферная обмотка оказывает на вынужденные колебания угла нагрузки синхронной машины?

Тема 4. Методы решения уравнений нелинейной математической модели электрически.

1) Для каких типов дифференциальных уравнений используются численные методы?

2) Охарактеризуйте численные методы решения нелинейных уравнений:

- метод Адамса;
- методы Эйлера;
- методы Рунге-Кутты.

3) Как влияет эффект вытеснения тока и насыщение магнитной системы на линейность математических моделей электрических машин?

4) Объясните, как влияние эффекта вытеснения тока и насыщения магнитной системы учитывается при исследовании статических режимов электрических машин?

5) Приведите алгоритм учета влияния эффекта вытеснения тока методом разбиения стержня на слои

6) Влияние на какое сопротивление (активное или индуктивное) позволяет учесть метод разбиения стержня на слои?

7) Как используются следующие пакеты прикладных программ для исследования динамической устойчивости СМ:

- MathCAD;
- MATLAB/Simulink;
- COMSOL Multiphysics.

6.5 Вопросы для подготовки к экзамену (коллоквиуму)

Теоретические вопросы

1) Переходные процессы электромеханических устройств (ЭМУ). Приведите классификацию переходных процессов электромеханических устройств и методов их исследования.

2) Сформулируйте основные допущения, применяемые при анализе переходных процессов.

3) Приведите классификацию переходных процессов электрических машин и методов их исследования.

4) Какие системы координатных осей, применяются при исследовании переходных процессов ЭМУ?

5) Охарактеризуйте современные методы анализа переходных процессов электрических машин..

6) Приведите алгоритм применения операторного метода решения дифференциальных уравнений.

7) Приведите алгоритм применения теорема разложения для нахождения оригинала переменной при решении задач операторным методом.

8) Запишите математическую модель явнополюсной синхронной машины в фазной системе координат

9) Как и почему индуктивности и взаимоиндуктивности фазных обмоток с явновыраженными полюсами зависят от положения ротора?

10) Сформулируйте суть преобразование переменных при составлении математических моделей электрических машин. Приведите формулы прямого и обратного преобразования.

11) Объясните преимущества относительных единиц и цель их использования в теории электрических машин.

12) Какая система базовых величин применяется в теории переходных процессов?

13) Как заменить короткозамкнутую обмотку ротора машин переменного тока эквивалентными двухфазной обмоткой?

- 14) Электромагнитный момент вращения синхронной машины в осях d, q .
- 15) Исследование несимметричных переходных процессов численными методами: Рунге-Кутта второго и четвертого порядка точности, Адамса
- 16) Общая характеристика динамической устойчивости ЭМУ и методов ее исследования
- 17) Моменты, возникающие при механических переходных процессах и их линеаризация. Асинхронный момент синхронной машины, покажите, как его величина изменяется с изменением угла нагрузки θ ?
- 18) Динамический момент синхронной машины. Как его величина зависит от угла нагрузки θ ?
- 19) Приведите алгоритм решение задач методами Эйлера.
- 20) Приведите алгоритм решение задач методами Адамса.
- 21) Решение задач методами Рунге-Кутта.
- 22) Нарисуйте схему обобщенной машины.
- 23) Приведите математическая интерпретация режима короткого замыкания
- 25) Приведите алгоритм исследования переходных процессов с использованием уравнений Парка-Горева в операторной форме. Каким путем вводятся начальные условия?
- 26) Объясните, почему для преобразования трехфазной обмотки статора синхронной явнополюсной машины применяются только система координат d, q , связанные с ротором, а для асинхронной машины – любая ортогональная система координат?
- 27) Общие сведения о пакете COMSOL Multiphysics, ELCUT. Создание COMSOL , ELCUT - моделей.
- 28) Общие сведения о пакетах Simulink MATLAB, MathCAD. Создание MATLAB моделей.
- 29) Алгоритм исследование тепловых полей асинхронного двигателя с помощью COMSOL Multiphysics
- 30) Исследование магнитного поля и определение параметров стержня в COMSOL Multiphysics
- 31) Исследование магнитных полей в ELCUT – моделях
- 32) Исследование несимметричных переходных процессов численными методами: Рунге-Кутта второго и четвертого порядка точности, Адамса.
- 33) Характеристика переходных процессов асинхронных машин и методов их исследования
- 34) Системы координатных осей, применяемые для исследования переходных процессов асинхронных машин
- 35) Математическая модель асинхронного двигателя в произвольной системе координат $u, v, 0$, вращающихся с произвольной угловой скоростью ω_x ,

Практические вопросы для подготовки к коллоквиуму №1

- 1) Запишите уравнения в матричном виде и определите потокосцепление по оси d - $\Psi_d(p)$

$$\Psi_d(p) = x_d i_d(p) + x_{ad} i_f(p) + x_{ad} i_{yd}(p);$$

$$U_f = r_f i_f(p) + p x_f i_f(p) + p x_{ad} i_d(p) + p x_{ad} i_{yd}(p);$$

$$0 = r_{yd} i_{yd}(p) + p x_{yd} i_{yd}(p) + p x_{ad} i_d(p) + p x_{ad} i_f(p)$$

2) Запишите уравнения в матричном виде и определите потокосцепление по оси d - $\Psi_q(p)$

$$\Psi_q(p) = x_q i_q(p) + x_{aq} i_{yq}(p);$$

$$0 = r_{yq} i_{yq}(p) + p x_{yq} i_{yq}(p) + p x_{aq} i_q(p).$$

3) Изображение индуктивного сопротивления в переходном режиме $x_d(p)$, определяется следующим уравнением

$$x_d(p) = x_d - \frac{p x_{ad} [(r_f + p x_f) + (r_{yd} + p x_{yd})] - 2 p^2 x_{ad}^2}{(r_f + p x_f)(r_{yd} + p x_{yd}) - p^2 x_{ad}^2};$$

Объясните физические причины, по которым приведенное выражение зависит от параметров успокоительной обмотки и обмотки возбуждения.

4) Изображение закона тока по оси d синхронного генератора в режиме короткого замыкания описывается следующим уравнением

$$i_d(p) = -\frac{E_{10}}{x'_d} \frac{p + \frac{1}{T_{do}}}{\left(p + \frac{1}{T'_d}\right) \left(p^2 + 2 \frac{r_1}{x'_2} p + 1\right)};$$

Найдите оригинал закона изменения тока, используя теорему разложения.

5) Основные уравнения математической модели обобщенной машины представлены следующими уравнениями:

$$\pm U_d(t) = r_1 i_d(t) + \frac{d}{dt} \Psi_d(t) - \Psi_q(t) \omega(t);$$

$$\pm U_q(t) = r_1 i_q(t) + \frac{d}{dt} \Psi_q(t) + \Psi_d(t) \omega(t)$$

$$U_f = r_f i_f(t) + \frac{d}{dt} \Psi_f(t);$$

$$0 = r_{yd} i_{yd}(t) + \frac{d}{dt} \Psi_{yd}(t);$$

$$0 = r_{yq} i_{yq}(t) + \frac{d}{dt} \Psi_{yq}(t);$$

Объясните (с физической точки зрения), почему в первых двух уравнениях, в сравнении с остальными, присутствуют следующие члены: $\Psi_q(t) \omega(t)$ и $\Psi_d(t) \omega(t)$.

6) Укажите допущения, при которых главные индуктивные сопротивления

обобщенной машины будут равны сверхпереходным:

$$x_d(p) = x_d'';$$

$$x_q(p) = x_q''$$

7) Запишите следующие уравнения в матричном виде и определите – ток успокоительной обмотки

$$\Psi_q(p) = x_q i_q(p) + x_{aq} i_{yq}(p);$$

$$0 = r_{yq} i_{yq}(p) + p x_{yq} i_{yq}(p) + p x_{ad} i_q(p).$$

– оригинал закона изменения тока, применив теорему разложения

8) Исследования режима короткого замыкания трансформатора при отсутствии форсировки возбуждения показали, что ток возбуждения изменяется и изменяется по следующему закону

$$i_f(t) = E_{10} \frac{x_{ad}}{x_f} \left[\frac{1}{x_d} + \frac{1}{x_d'} e^{-\frac{t}{T_d}} \cos t + \left(\frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} \right]$$

Объясните физические причины, из-за которых:

- при $U_f = \text{const}$, ток возбуждения изменяется;

- почему в уравнении отсутствуют параметры по поперечной оси.

9) Укажите допущения, при которых главные индуктивные сопротивления обобщенной машины будут равны переходным:

$$x_d(p) = x_d';$$

$$x_q(p) = x_q'$$

10) Используя теорему разложения, найдите закон изменения тока по оси q , если изображение функции имеет следующий вид

$$i_q(p) = -\frac{E_{10}}{x_q} \frac{p}{p^2 + 2 \frac{r_1}{x_2'} p + 1};$$

Объясните, почему в уравнение не входят параметры по оси d .

11) Изображение индуктивного сопротивления в сверхпереходном режиме $x_q(p)$, определяется следующим уравнением

$$x_q(p) = x_q - \frac{p x_{aq}^2}{r_{yq} + p x_{yq}};$$

Объясните физические причины, по которым операторное индуктивное сопротивление зависит только от параметров успокоительной обмотки по оси q и не зависит от параметров обмотки возбуждения.

12) Математическая модель синхронной машины без демпферной обмотки

описывается следующей системой уравнения в операторной форме.

$$\pm U_d(t) = r_1 i_d(t) + \frac{d}{dt} \Psi_d(t) - \Psi_q(t) \omega(t);$$

$$\pm U_q(t) = r_1 i_q(t) + \frac{d}{dt} \Psi_q(t) + \Psi_d(t) \omega(t)$$

$$U_f = r_f i_f(t) + \frac{d}{dt} \Psi_f(t);$$

Добавьте уравнения в математическую модель для синхронной машины с демпферной обмоткой.

13) Уравнение, которое описывает изменение тока возбуждения в операторной форме имеет следующий вид

$$U_f = r_f i_f(p) + p x_f i_f(p) + p x_{aq} i_d(p);$$

Определите оригинал закон изменения тока (в зависимости от времени).

14) Изображения индуктивного сопротивления в переходном режиме $x_d(p), x_q(p)$ определяется следующим уравнением

$$x_d(p) = x_d - \frac{p x_{aq}^2}{r_f + p x_f};$$

$$x_q(p) = x_q$$

Получите выражения переходных сопротивлений x'_d, x'_q

15) Основные уравнения математической модели обобщенной машины представлены следующими уравнениями:

$$\pm U_d(t) = r_1 i_d(t) + \frac{d}{dt} \Psi_d(t) - \Psi_q(t) \omega(t);$$

$$\pm U_q(t) = r_1 i_q(t) + \frac{d}{dt} \Psi_q(t) + \Psi_d(t) \omega(t)$$

$$U_f = r_f i_f(t) + \frac{d}{dt} \Psi_f(t);$$

$$0 = r_{yd} i_{yd}(t) + \frac{d}{dt} \Psi_{yd}(t);$$

$$0 = r_{yq} i_{yq}(t) + \frac{d}{dt} \Psi_{yq}(t);$$

Объясните (с физической точки зрения), при решении каких задач в первых двух уравнениях напряжение принимается со знаком минус?

16) Определите закон изменения индуктивного сопротивления $x_d(t)$, если уравнение в операторной форме имеет следующий вид

$$x_d(p) = x_d - \frac{px_{aq}^2}{r_f + px_f}$$

17) Изображения индуктивного сопротивления $x_d(p), x_q(p)$ определяется следующим уравнением

$$x_d(p) = x_d - \frac{px_{ad}[(r_f + px_f) + (r_{yd} + px_{yd})] - 2p^2x_{ad}^2}{(r_f + px_f)(r_{yd} + px_{yd}) - p^2x_{ad}^2};$$

$$x_q(p) = x_q - \frac{px_{aq}^2}{r_{yq} + px_{yq}}.$$

Получите выражения сверхпереходных сопротивлений x_d'', x_q''

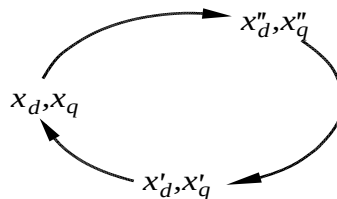
18) Уравнения Парка-Горева содержат следующие уравнения

$$\pm U_d(t) = r_1 i_d(t) + \frac{d}{dt} \Psi_d(t) - \Psi_q(t) \omega(t);$$

$$\pm U_q(t) = r_1 i_q(t) + \frac{d}{dt} \Psi_q(t) + \Psi_d(t) \omega(t)$$

Запишите операторные изображения этих уравнений при условии, что угловая скорость вращения остается величиной постоянной.

19) Объясните физические причины, по которым индуктивные сопротивления по ходу переходного процесса изменяются по следующей схеме:



20) Запишите уравнения в матричном виде, и решите их относительно изображений токов $i_{yq}(p)$ и $i_q(p)$

$$\Psi_q(p) = x_q i_q(p) + x_{aq} i_{yq}(p);$$

$$0 = r_{yq} i_{yq}(p) + px_{yq} i_{yq}(p) + px_{ad} i_q(p).$$

Приведите алгоритм определения оригиналов токов в зависимости от времени.

Вопросы для подготовки к коллоквиуму №2

К защите коллоквиума №2 допускаются обучающиеся, которые выполнили задания по исследованию динамической устойчивости синхронной машины при малых отклонениях угла нагрузки. Данные работы являются для заочников контрольной работой, которая выполняется в течение семестра. Вопросы к защите работ по исследованию динамической устойчивости синхронной машины и составляют содержание коллоквиума.

- 1) Общая характеристика динамической устойчивости ЭМУ и методов ее исследования
- 2) Моменты, возникающие при механических переходных процессах и их линеаризация. Асинхронный момент синхронной машины, покажите, как его величина изменяется с изменением угла нагрузки θ ?
- 3) Динамический момент синхронной машины. Как его величина зависит от угла нагрузки θ ?
- 4) Синхронный и синхронизирующий момент при малых возмущениях угла нагрузки.
- 5) Момент сил сопротивления на валу синхронной машины
– постоянная составляющая и ее влияние на установившееся значение угла нагрузки;
– гармонические составляющие момента сил сопротивления.
- 6) Математическая модель СМ для исследования механических переходных процессов.
- 7) Исследование закона изменения угла нагрузки СМ без демпферной нагрузки при отсутствии гармонических составляющих момента сил сопротивления.
- 8) Влияние демпферной обмотки на собственные колебания угла нагрузки СМ при отсутствии гармонических составляющих момента сил сопротивления.
- 9) Исследование влияния гармонических составляющих момента сил сопротивления на собственные и вынужденные колебания угла нагрузки.
- 10) Явление биений и его влияние на устойчивость работы СМ при малых возмущениях.
- 11) Резонанс и его влияние на устойчивость работы СМ при малых возмущениях.
- 12) Влияние демпферной обмотки на вынужденные колебания угла нагрузки СМ.

6.6 Примерная тематика курсовых работ (проектов)

По дисциплине курсовой проект (работа) не предусмотрен.

7 Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

7.1 Рекомендуемая литература

Основная литература

1. Копылов, И. П. Электрические машины в 2 т. Том 1 : учебник для вузов / И. П. Копылов. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2023. — 267 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-03222-2. — Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. — URL: <https://urait.ru/bcode/512718> (дата обращения: 02.02.2024).

2. Г. Б. Вяльцева, Д. М. Топоркова и др. «Исследование переходных процессов в электрических машинах» : Издательство Новосибирский государственный технический университет, 2023. — 80 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-7782-4955-4. режим доступа [litres.ru>book/georgiy-vyalcev/issledovanie-...](https://litres.ru/book/georgiy-vyalcev/issledovanie-...) (дата обращения 26.07.2024)

3. Татарникова А.Н, Парфенова Н.А. Переходные процессы в электроэнергетических системах. Часть 2: Электромеханические переходные процессы: Учебное пособие для студентов направления подготовки «Электроэнергетика и электротехника» всех форм обучения / Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2016. – 39 с. режим доступа [edu.rubinst.ru>resources/books/Tatarnikova_A.N._...](https://edu.rubinst.ru/resources/books/Tatarnikova_A.N._...) (дата обращения 26.07.2024)

Дополнительная литература

4. Сипайлов, Г.А. Электрические машины : специальный курс : учеб. для студ. вузов, обуч. по спец. "Электрические машины" [Текст] / Г.А. Сипайлов, Е.В. Кононенко, К.А. Хорьков. – М.: Высш. школа 1987. – 279 с. с ил.

5. Постников, И.М. Обобщенная теория и переходные процессы электрических машин Учебник для вузов, изд. 2-е перераб. и доп. [Текст] / И.М. Постников. – М.: Высш. школа, 1975. – 319 с. с ил.

6. Денисов, В. А. Теория и переходные процессы электромагнитных устройств и электромеханических преобразователей энергии : электронное учебное пособие / В. А. Денисов, М. Н. Третьякова. - Тольятти : ТГУ, 2014. - 108 с. - ISBN 978-5-8259-0814-4. Книга из коллекции ТГУ - Инженерно-технические науки (дата обращения 26.07.2024)

7. Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин : учебник для студ. электротехн. и энерг. спец. вузов / И.П. Копылов . — 3-е изд., перераб. и доп. — М. : Высшая школа, 2001 . — 328 с. : ил. — ISBN 5-06-003861-0. Библиотека ДонГТУ 17 экз.

8. Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин: Учеб.для вузов по спец. «Электрич. машины» [Текст] / И.П. Копылов. – М.: Высш. шк., 1987. – 248 с., с ил. Библиотека ДонГТУ 50 экз.

9. Трещев, И.И. Электромеханические процессы в машинах переменного тока [Текст] / И.И. Трещев. –Л.: Энергия, 1980. – 344 с. Библиотека ДонГТУ 9 экз.

10. Важнов, А.И. Переходные процессы в машинах переменного тока [Текст] / А.И. Важнов, А.И. – Л.: Энергия, 1980. –256 с. Библиотека ДонГТУ 8 экз.

11. Переходные процессы в электрических машинах и аппаратах и вопросы их проектирования : учеб. пособие для вузов [Текст] / Гольдберг О. Д., Буль О. Б., Свириденко И. С., и др.; под ред. О. Д. Гольдберга. - Москва. : Высшая школа, 2001. - 512 с. : ил. - ISBN 5-06-003844-0. - Текст : непосредственный. Режим доступа bik.sfu-kras.ru/elib/view...

12 Пакет прикладных программ MatLab, подсистема Simulink. Режим доступа lib.kstu.kz:8300/tb/books/.../Programmnye%20sredstva%20modelirovaniya/.../tema8.... (дата обращения 26.07.2024)

13 [Обзор COMSOL Multiphysics ® 5.1](http://www.comsol.ru/release/5.1) Режим доступа <https://www.comsol.ru/release/5.1> (дата обращения 26.07.2024)

14 Методы анализа электромеханических устройств. Режим доступа- MirZnani.com/mirznani.com/a/120116/metody-analiza-elektromekhanicheskikh-ustroystv (дата обращения 26.07.2024)

В распоряжении студента есть свободный доступ к сети Internet, методические указания на электронном носителе

Учебно-методическое обеспечение (библиотека ДонГТУ)

17. Методические указания к выполнению лабораторной работы на тему «Решение полевых задач в среде ELCUT. Расчет усилий в плунжерном электромагните путем моделирования магнитного поля» по курсу «Методы анализа электромагнитных процессов в электромеханических устройствах» : (для студ. напр. подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» 6 курса всех форм обуч.) / сост. Л.Н. Комаревцева, И.А. Цодик, К.В. Худобин ; Каф. Электрических машин и аппаратов . — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР ДонГТУ, 2019 . — 26 с.

18. Методические указания к выполнению лабораторной работы на тему «Исследование динамической устойчивости синхронной машины средствами MathCAD. Исследование влияния демпферной обмотки на вынужденные колебания угла нагрузки при его малых возмущениях» по курсу «Методы анализа электромагнитных процессов в электромеханических устройствах» : (для студ. напр. подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» 6 курса всех форм обуч.) / сост. Л.Н. Комаревцева, К.В. Худобин ; Каф. Электрических машин и аппаратов . — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР ДонГТУ, 2019 . — 19 с.:

19 Методические указания к выполнению лабораторной работы №2 «Исследование динамической устойчивости синхронной машины средствами MathCAD. Исследование влияния демпферной обмотки на собственные колебания угла нагрузки при его малых возмущениях» по курсу «Методы анализа электромагнитных процессов в электромеханических устройствах» : (для студ. напр. подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» 6 курса всех форм обуч.) / сост. Л.Н. Комаревцева, К.В. Худобин ; Каф. Электрических машин и аппаратов . — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР ДонГТУ, 2019 . — 16 с.

20. Методические указания к выполнению лабораторной работы №3 «Исследование динамической устойчивости синхронной машины средствами MathCAD. Исследование вынужденные колебаний угла нагрузки синхронной машины без демпферной обмотки при его малых возмущениях» по курсу «Методы анализа электромагнитных процессов в электромеханических устройствах» : (для

студ. напр. подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» 6 курса всех форм обуч.) / сост. Л.Н. Комаревцева, К.В. Худобин ; Каф. Электрических машин и аппаратов . — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР ДонГТУ, 2019 . — 21 с.

21. Методические указания к выполнению лабораторной работы №4 «Исследование динамической устойчивости синхронной машины средствами MathCAD. Исследование вынужденные колебаний угла нагрузки синхронной машины без демпферной обмотки при его малых возмущениях» по курсу «Методы анализа электромагнитных процессов в электромеханических устройствах» : (для студ. напр. подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» 6 курса всех форм обуч.) / сост. Л.Н. Комаревцева, К.В. Худобин ; Каф. Электрических машин и аппаратов . — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР ДонГТУ, 2019 . — 21 с.

22. Методические указания к выполнению лабораторной работы «Интеграция данных исследования в среде COMSOL Multiphysics со средой Simulink MATLAB как метод определения параметров обмоток электродвигателя» (для студ. напр. подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» всех форм обуч.) / сост. Л.Н. Комаревцева, К.В. Худобин ; Каф. Электрических машин и аппаратов . — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР ДонГТУ, 2019 . — 20 с.

7.2 Базы данных, электронно-библиотечные системы, информационно-справочные и поисковые системы

1. Научная библиотека ДонГТУ : официальный сайт. — Алчевск. — URL: library.dstu.education. — Текст : электронный.

2. Научно-техническая библиотека БГТУ им. Шухова : официальный сайт. — Белгород. — URL: <http://ntb.bstu.ru/jirbis2/>. — Текст : электронный.

3. Консультант студента : электронно-библиотечная система. — Москва. — URL: <http://www.studentlibrary.ru/cgi-bin/mb4x>. — Текст : электронный.

4. Университетская библиотека онлайн : электронно-библиотечная система. — URL: http://biblioclub.ru/index.php?page=main_ub_red. — Текст : электронный.

5. IPR BOOKS : электронно-библиотечная система. — Красногорск. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/>. — Текст : электронный.

6. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор) : официальный сайт. — Москва. — <https://www.gosnadzor.ru/>. — Текст : электронный.

Материально-техническое обеспечение представлено в таблице 7.

Таблица 7 – Материально-техническое обеспечение

Наименование оборудованных учебных кабинетов	Адрес (местоположение) учебных кабинетов
Специальные помещения: <i>Мультимедийная аудитория. (30 посадочных мест), оборудованная специализированной (учебной) мебелью, рабочее место преподавателя (ПК: монитор + системный блок) – 1 шт., доска аудиторная– 1 шт.), проектор EPSON EB-X7 – 1 шт, широкоформатный экран.</i> Аудитории для проведения практических занятий, для самостоятельной работы: <i>Лаборатория моделирования электромеханических процессов кафедры электромеханики им. А.Б. Зеленова ДонГТУ (25 посадочных мест), оборудованный учебной мебелью, компьютерами с неограниченным доступом к сети Интернет, включая доступ к ЭБС:</i> - Компьютер Intel Celeron 2,8 GHz; - Компьютер HEDY; - Компьютер 80386DX; - Компьютер Intel Celeron 600 MHz; - Компьютер Intel Celeron 2.66 Ghz; - Компьютер Intel Celeron 1,3 Ghz. - Компьютер AthlonXP 1.92 Ghz; - Компьютер AMD Duron 1.79 Hhz; - Компьютер AMD Athlon 3200 Mhz; - Компьютер Intel Celeron 420 1.66 Ghz; - Компьютер Intel Celeron 420 1.66 Ghz; - Компьютер Intel Celeron 420 1.66 Ghz; - Компьютер AMD Athlon 64 x2 Dual Core Proceggor 400+. Доска аудиторная– 1 шт.	<u>ауд. 1129</u> <u>ауд. 1229</u>
Лекционная аудитория (32 посадочных места), оборудованный учебной мебелью, компьютером с неограниченным доступом к сети Интернет, включая доступ к ЭБС. Доска аудиторная– 1 шт.	<u>ауд. 1224</u>

Лист согласования РПД

Разработал
доцент кафедры электромеханики
им. А.Б. Зеленова
(должность)


(подпись)

Л.Н. Комаревцева
(Ф.И.О.)

И.о. зав. кафедрой


(подпись)

Д.И. Морозов
(Ф.И.О.)

Протокол № 1 заседания кафедры
электромеханики им. А.Б.Зеленова

от 22.08 2024 г.

Декана факультета


(подпись)

В.В. Дьячкова
(Ф.И.О.)

Согласовано

Председатель методической
комиссии по направлению подготовки
13.03.02 Электроэнергетика и
Электротехника, профиль
«Электрические машины и аппараты»


(подпись)

Л.Н. Комаревцева
(Ф.И.О.)

Начальник учебно-методического центра


(подпись)

О.А. Коваленко
(Ф.И.О.)

Лист изменений и дополнений

Номер изменения, дата внесения изменения, номер страницы для внесения изменений	
ДО ВНЕСЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ:	ПОСЛЕ ВНЕСЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ:
Основание:	
Подпись лица, ответственного за внесение изменений	