

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»
(РУТ (МИИТ))



Рабочая программа дисциплины (модуля),
как компонент образовательной программы
высшего образования - программы бакалавриата
по направлению подготовки
15.03.06 Мехатроника и робототехника,
утвержденной первым проректором РУТ (МИИТ)
Тимониным В.С.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Цифровые двойники электропривода ПСЖД

Направление подготовки: 15.03.06 Мехатроника и робототехника

Направленность (профиль): Электрооборудование и электропривод
подвижного состава

Форма обучения: Очная

Рабочая программа дисциплины (модуля) в виде
электронного документа выгружена из единой
корпоративной информационной системы управления
университетом и соответствует оригиналу

Простая электронная подпись, выданная РУТ (МИИТ)
ID подписи: 5214
Подписал: заведующий кафедрой Пудовиков Олег
Евгеньевич
Дата: 27.06.2025

1. Общие сведения о дисциплине (модуле).

Целью изучения дисциплины (модуля) является:

- формирование у студентов теоретических знаний и практических навыков в области архитектуры, принципов работы и применения цифровых двойников для моделирования, диагностики и оптимизации тяговых электроприводов подвижного состава железных дорог.

Задачами изучения дисциплины (модуля) являются:

- изучение принципов действия, структурных компонентов и характеристик цифровых двойников электроприводов ПСЖД;
- освоение методов анализа рабочих режимов тяговых двигателей и силовых преобразователей через виртуальные модели;
- формирование навыков обработки телеметрических данных и верификации моделей по результатам натурных испытаний.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю).

Перечень формируемых результатов освоения образовательной программы (компетенций) в результате обучения по дисциплине (модулю):

ОПК-4 - Способен понимать принципы работы современных информационных технологий и использовать их для решения задач профессиональной деятельности.;

ОПК-6 - Способен решать стандартные задачи профессиональной деятельности на основе информационной и библиографической культуры с применением информационно-коммуникационных технологий.;

Обучение по дисциплине (модулю) предполагает, что по его результатам обучающийся будет:

Знать:

- архитектуру цифровых двойников электроприводов ПСЖД;
- методы математического моделирования электромеханических и тепловых процессов в ТЭД и силовых преобразователях;
- технологии обработки телеметрии.

Уметь:

- определять параметры цифровых моделей;
- анализировать режимы работы привода по телеметрии.

Владеть:

- навыками верификации моделей;
- методами обработки эксплуатационных данных.

3. Объем дисциплины (модуля).

3.1. Общая трудоемкость дисциплины (модуля).

Общая трудоемкость дисциплины (модуля) составляет 8 з.е. (288 академических часа(ов)).

3.2. Объем дисциплины (модуля) в форме контактной работы обучающихся с педагогическими работниками и (или) лицами, привлекаемыми к реализации образовательной программы на иных условиях, при проведении учебных занятий:

Тип учебных занятий	Количество часов		
	Всего	Семестр	
		№6	№7
Контактная работа при проведении учебных занятий (всего):	160	80	80
В том числе:			
Занятия лекционного типа	64	32	32
Занятия семинарского типа	96	48	48

3.3. Объем дисциплины (модуля) в форме самостоятельной работы обучающихся, а также в форме контактной работы обучающихся с педагогическими работниками и (или) лицами, привлекаемыми к реализации образовательной программы на иных условиях, при проведении промежуточной аттестации составляет 128 академических часа (ов).

3.4. При обучении по индивидуальному учебному плану, в том числе при ускоренном обучении, объем дисциплины (модуля) может быть реализован полностью в форме самостоятельной работы обучающихся, а также в форме контактной работы обучающихся с педагогическими работниками и (или) лицами, привлекаемыми к реализации образовательной программы на иных условиях, при проведении промежуточной аттестации.

4. Содержание дисциплины (модуля).

4.1. Занятия лекционного типа.

№ п/п	Тематика лекционных занятий / краткое содержание
1	Введение в цифровые двойники приводных систем Рассматриваемые вопросы: базовые принципы цифровых двойников; специфика применения для электроприводов ПС; преимущества для диагностики и управления тягой.

№ п/п	Тематика лекционных занятий / краткое содержание
2	Архитектура двойника электропривода Рассматриваемые вопросы: компоненты (физический привод, модель, данные); интеграция с датчиками ТЭД и преобразователей; требования к real-time обработке.
3	Математические модели электромеханических процессов Рассматриваемые вопросы: уравнения движения ТЭД; модели потерь в обмотках; динамика момента; учет люфтов и упругих деформаций.
4	Моделирование тяговых двигателей Рассматриваемые вопросы: FEA-модели магнитных полей; тепловая динамика; прогноз вибраций подшипников; калибровка по датчикам ЭПС.
5	Цифровые двойники силовых инверторов Рассматриваемые вопросы: поведение IGBT/диодов; коммутационные потери; тепловые модели силовых ключей; прогнозирование пробоя.
6	Системы управления тягой в двойнике Рассматриваемые вопросы: эмуляция векторного управления; адаптивные ПИД-регуляторы; тестирование алгоритмов без риска для оборудования.
7	Сенсорика и сбор данных приводов Рассматриваемые вопросы: датчики тока, положения, вибрации; синхронизация данных CAN/Ethernet; фильтрация шумов в реальном времени.
8	Верификация моделей приводов Рассматриваемые вопросы: сравнение с натурными испытаниями ТЭД; погрешности моделирования; калибровка по данным дефектовок.
9	Прогнозирование энергопотребления Рассматриваемые вопросы: моделирование потерь в зависимости от профиля пути; оптимизация рекуперации; учет КПД преобразователя.
10	Предиктивная аналитика приводов Рассматриваемые вопросы: ML-анализ вибраций ТЭД; прогноз износа щеток коллектора; остаточный ресурс подшипников.
11	Отказоустойчивость инверторов Рассматриваемые вопросы: моделирование КЗ в фазах; прогноз старения конденсаторов DC-звена; защитные алгоритмы.
12	Оптимизация режимов тяги Рассматриваемые вопросы: минимизация потерь при разгоне/торможении; адаптация к нагрузке вагона; управление моментом при пробуксовке.
13	Моделирование конвертеров напряжения Рассматриваемые вопросы: динамика DC/DC-преобразователей; тепловые режимы дросселей; взаимодействие с аккумуляторными системами.
14	Адаптация моделей в эксплуатации Рассматриваемые вопросы: автоматическая подстройка параметров; обработка данных с бортовых регистраторов; триггеры для перекалибровки.
15	Двойники приводов ВСМ Рассматриваемые вопросы: моделирование динамики на скоростях 250+ км/ч; влияние аэродинамики на охлаждение ТЭД.
16	ТО на основе состояния приводов Рассматриваемые вопросы: формирование регламентов по данным двойника; прогноз сроков замены подшипников; логистика запчастей.
17	Кибербезопасность систем управления Рассматриваемые вопросы: защита каналов передачи данных; аутентификация команд управления.

№ п/п	Тематика лекционных занятий / краткое содержание
18	Моделирование контактного взаимодействия Рассматриваемые вопросы: динамика токосъема при ускорении; прогноз дугообразования; влияние качества контактной сети.
19	Двойники гибридных приводов Рассматриваемые вопросы: совместная работа ТЭД и ДВС; алгоритмы переключения источников; балансировка нагрузки на АКБ.
20	Python для анализа приводов Рассматриваемые вопросы: обработка телеметрии с Pandas; ML-модели для прогноза отказов на Scikit-learn; визуализация в Matplotlib.
21	Тепловое моделирование компонентов Рассматриваемые вопросы: CFD-расчеты охлаждения IGBT; прогноз температурных точек в обмотках ТЭД; оптимизация радиаторов.
22	ИИ для ускорения моделирования Рассматриваемые вопросы: нейросетевые суррогатные модели; сокращение времени расчетов FEA; GAN для генерации сценариев отказов.
23	AR для обслуживания приводов Рассматриваемые вопросы: интерактивные схемы разборки ТЭД; наложение термограмм на физические узлы; инструкции по замене подшипников.
24	Перспективы для тяговых приводов Рассматриваемые вопросы: двойники для водородных топливных элементов; квантовое ускорение расчетов; цифровые близнецы всего поезда.

4.2. Занятия семинарского типа.

Лабораторные работы

№ п/п	Наименование лабораторных работ / краткое содержание
1	Создание базовой модели ТЭД В результате выполнения лабораторной работы студенты построят математическую модель тягового двигателя постоянного тока, реализуют уравнения электромеханических процессов и проанализируют переходные характеристики (пуск, торможение).
2	Тепловое моделирование обмоток ТЭД В результате выполнения лабораторной работы студенты рассчитают температурные поля статора при различных нагрузках, определят критические точки перегрева и оптимизируют конструкцию системы охлаждения.
3	Моделирование IGBT-инвертора В результате выполнения лабораторной работы студенты проанализируют коммутационные потери силовых ключей, спроектируют систему теплозащиты и оценят КПД преобразователя при рекуперации энергии.
4	Калибровка цифрового двойника по телеметрии В результате выполнения лабораторной работы студенты загрузят реальные данные с датчиков ЭПС (ток, вибрация), адаптируют параметры модели под эксплуатационные режимы и оценят погрешность калибровки.
5	Реализация векторного управления В результате выполнения лабораторной работы студенты настроят FOC-алгоритмы для асинхронного ТЭД, протестируют отклик на изменение момента и оптимизируют ПИД-регуляторы.
6	Прогноз вибраций подшипников с использованием ML В результате выполнения лабораторной работы студенты применяют методы машинного обучения

№ п/п	Наименование лабораторных работ / краткое содержание
	(Scikit-learn) для предсказания остаточного ресурса подшипников ТЭД на основе спектральных данных вибродатчиков.
7	Анализ энергопотребления в различных режимах В результате выполнения лабораторной работы студенты рассчитают потери энергии при разгоне/торможении, оценят эффективность рекуперации и предложат оптимизированный профиль движения для участка Москва-Санкт-Петербург.
8	Моделирование аварийных режимов инвертора В результате выполнения лабораторной работы студенты протестируют поведение цифрового двойника при КЗ фаз, перегрузке по току 150% и разработают алгоритмы аварийной остановки.
9	Интеграция с CAN-шиной локомотива В результате выполнения лабораторной работы студенты настроят обмен данными между цифровым двойником и физической системой управления через протокол CAN, реализуют онлайн-мониторинг параметров.
10	Диагностика межвитковых замыканий В результате выполнения лабораторной работы студенты реализуют алгоритм детектирования дефектов обмотки по гармоникам тока, оценят чувствительность метода и сгенерируют сигналы тревоги.
11	AR-интерфейс для обслуживания ТЭД В результате выполнения лабораторной работы студенты разработают приложение дополненной реальности, визуализирующее износ щеток коллектора и термограммы обмоток поверх физического двигателя.
12	Комплексный кейс для электропоезда «Ласточка» В результате выполнения лабораторной работы студенты интегрируют модели ТЭД, инвертора и управления, оптимизируют энергопотребление на маршруте и подготовят отчет для депо.

Практические занятия

№ п/п	Тематика практических занятий/краткое содержание
1	Расчёт электромеханических параметров ТЭД В результате выполнения практического задания студенты рассчитают момент инерции ротора, постоянную времени двигателя и построят кривые пусковых характеристик на основе паспортных данных.
2	Анализ магнитных полей в обмотках статора В результате выполнения практического задания студенты определяют распределение магнитной индукции, рассчитают потери в стали и выявят зоны максимального насыщения магнитной цепи.
3	Тепловой расчёт IGBT-модуля В результате выполнения практического задания студенты вычислят коммутационные потери силовых ключей, определят тепловое сопротивление «кристалл-корпус» и спрогнозируют температуру перехода при пиковых нагрузках.
4	Статистическая калибровка модели по телеметрии В результате выполнения практического задания студенты рассчитают погрешности параметров цифрового двойника, определяют доверительные интервалы и адаптируют модель под эксплуатационные данные.
5	Анализ переходных процессов векторного управления В результате выполнения практического задания студенты рассчитают время отклика на изменение момента, определяют перерегулирование тока статора и оценят устойчивость системы.
6	Прогнозирование износа подшипников по спектрам вибрации В результате выполнения практического задания студенты выявят частотные признаки дефектов качения, рассчитают остаточный ресурс и построят кривую деградации.

№ п/п	Тематика практических занятий/краткое содержание
7	Расчёт энергоэффективности тягового привода В результате выполнения практического задания студенты определяют КПД системы «инвертор-ТЭД» для заданного профиля пути, рассчитывают потери при рекуперации и сравнят с экспериментальными данными.
8	Анализ аварийных режимов инвертора В результате выполнения практического задания студенты рассчитают токи КЗ при пробое IGBT, определяют тепловую энергию дуги и оценят риски повреждения компонентов.
9	Обработка данных CAN-шины В результате выполнения практического задания студенты вычислят коммутационные потери силовых ключей, определят тепловое сопротивление «кристалл-корпус» и спрогнозируют температуру перехода при пиковых нагрузках.
10	Тепловой баланс системы охлаждения В результате выполнения практического задания студенты вычислят коммутационные потери силовых ключей, определят тепловое сопротивление «кристалл-корпус» и спрогнозируют температуру перехода при пиковых нагрузках.
11	Сравнение точности нейросетевых моделей В результате выполнения практического задания студенты вычислят коммутационные потери силовых ключей, определят тепловое сопротивление «кристалл-корпус» и спрогнозируют температуру перехода при пиковых нагрузках.
12	Анализ гармоник тока при дефектах обмотки В результате выполнения практического задания студенты вычислят коммутационные потери силовых ключей, определят тепловое сопротивление «кристалл-корпус» и спрогнозируют температуру перехода при пиковых нагрузках.
13	Расчёт экономии от предиктивного ТО В результате выполнения практического задания студенты вычислят коммутационные потери силовых ключей, определят тепловое сопротивление «кристалл-корпус» и спрогнозируют температуру перехода при пиковых нагрузках.
14	Анализ термограмм ТЭД В результате выполнения практического задания студенты вычислят коммутационные потери силовых ключей, определят тепловое сопротивление «кристалл-корпус» и спрогнозируют температуру перехода при пиковых нагрузках.
15	Верификация соответствия ГОСТ Р 57700.35 В результате выполнения практического задания студенты вычислят коммутационные потери силовых ключей, определят тепловое сопротивление «кристалл-корпус» и спрогнозируют температуру перехода при пиковых нагрузках.
16	Расчёт динамических нагрузок тележки В результате выполнения практического задания студенты вычислят коммутационные потери силовых ключей, определят тепловое сопротивление «кристалл-корпус» и спрогнозируют температуру перехода при пиковых нагрузках.
17	Анализ износа токоприёмника В результате выполнения практического задания студенты вычислят коммутационные потери силовых ключей, определят тепловое сопротивление «кристалл-корпус» и спрогнозируют температуру перехода при пиковых нагрузках.
18	Оптимизация рекуперации энергии В результате выполнения практического задания студенты вычислят коммутационные потери силовых ключей, определят тепловое сопротивление «кристалл-корпус» и спрогнозируют температуру перехода при пиковых нагрузках.
19	Анализ уязвимостей каналов данных В результате выполнения практического задания студенты вычислят коммутационные потери

№ п/п	Тематика практических занятий/краткое содержание
	силовых ключей, определяют тепловое сопротивление «кристалл-корпус» и прогнозируют температуру перехода при пиковых нагрузках.
20	Расчёт кривых остаточного ресурса В результате выполнения практического задания студенты вычислят коммутационные потери силовых ключей, определяют тепловое сопротивление «кристалл-корпус» и прогнозируют температуру перехода при пиковых нагрузках.
21	Анализ совместной работы ТЭД и ДВС В результате выполнения практического задания студенты вычислят коммутационные потери силовых ключей, определяют тепловое сопротивление «кристалл-корпус» и прогнозируют температуру перехода при пиковых нагрузках.
22	Статистическая обработка телеметрии В результате выполнения практического задания студенты вычислят коммутационные потери силовых ключей, определяют тепловое сопротивление «кристалл-корпус» и прогнозируют температуру перехода при пиковых нагрузках.
23	Тепловой расчёт при экстремальных условиях В результате выполнения практического задания студенты вычислят коммутационные потери силовых ключей, определяют тепловое сопротивление «кристалл-корпус» и прогнозируют температуру перехода при пиковых нагрузках.
24	Анализ истории эксплуатации ТЭД В результате выполнения практического задания студенты вычислят коммутационные потери силовых ключей, определяют тепловое сопротивление «кристалл-корпус» и прогнозируют температуру перехода при пиковых нагрузках.
25	Расчёт пропускной способности OPC UA В результате выполнения практического задания студенты вычислят коммутационные потери силовых ключей, определяют тепловое сопротивление «кристалл-корпус» и прогнозируют температуру перехода при пиковых нагрузках.
26	Анализ аэродинамических потерь ВСМ В результате выполнения практического задания студенты вычислят коммутационные потери силовых ключей, определяют тепловое сопротивление «кристалл-корпус» и прогнозируют температуру перехода при пиковых нагрузках.
27	Классификация дефектов по онтологии В результате выполнения практического задания студенты вычислят коммутационные потери силовых ключей, определяют тепловое сопротивление «кристалл-корпус» и прогнозируют температуру перехода при пиковых нагрузках.
28	Расчёт массово-инерционных характеристик ротора В результате выполнения практического задания студенты вычислят коммутационные потери силовых ключей, определяют тепловое сопротивление «кристалл-корпус» и прогнозируют температуру перехода при пиковых нагрузках.
29	Анализ электромагнитной совместимости В результате выполнения практического задания студенты вычислят коммутационные потери силовых ключей, определяют тепловое сопротивление «кристалл-корпус» и прогнозируют температуру перехода при пиковых нагрузках.
30	Расчёт КПД ДВС-генератора В результате выполнения практического задания студенты вычислят коммутационные потери силовых ключей, определяют тепловое сопротивление «кристалл-корпус» и прогнозируют температуру перехода при пиковых нагрузках.
31	Автоматизация отчётности В результате выполнения практического задания студенты вычислят коммутационные потери

№ п/п	Тематика практических занятий/краткое содержание
	силовых ключей, определяют тепловое сопротивление «кристалл-корпус» и прогнозируют температуру перехода при пиковых нагрузках.
32	Сравнительный анализ эффективности привода В результате выполнения практического задания студенты вычисляют коммутационные потери силовых ключей, определяют тепловое сопротивление «кристалл-корпус» и прогнозируют температуру перехода при пиковых нагрузках.

4.3. Самостоятельная работа обучающихся.

№ п/п	Вид самостоятельной работы
1	Текущая подготовка к лабораторным и практическим занятиям
2	Изучение дополнительной литературы
3	Выполнение курсовой работы.
4	Подготовка к промежуточной аттестации.
5	Подготовка к текущему контролю.

4.4. Примерный перечень тем курсовых работ

Вариант 1: ТЭД электровоза 2ЭС10 «Гранит» (грузовой)

Вариант 2: Асинхронный ТЭД электропоезда «Ласточка»

Вариант 3: ТЭД высокоскоростного поезда «Сокол»

Вариант 4: Двигатель метрополитена (вагон «Москва-2020»)

Вариант 5: ТЭД маневрового тепловоза ТЭМ33А (гибрид)

Вариант 6: ТЭД двухсистемного электровоза ЭП20

Вариант 7: ТЭД электропоезда «Иволга 4.0»

Вариант 8: Двигатель грузового электровоза 2ЭС7 «Дончак»

Вариант 9: ТЭД для высоконагруженного состава «Ермак».

Вариант 10: Двигатель водородного поезда «РЖД» (перспектива)

5. Перечень изданий, которые рекомендуется использовать при освоении дисциплины (модуля).

№ п/п	Библиографическое описание	Место доступа
1	Шестаков, А. В. Математическая теория электрических машин : учебное пособие / А. В. Шестаков. — 2-е изд., доп. и перераб. — Киров : ВятГУ, 2023. — 180 с.	URL: https://e.lanbook.com/book/430280 (дата обращения: 12.07.2025). - Текст: электронный.

2	Солёный, С. В. Цифровые двойники в электроэнергетике : учебное пособие / С. В. Солёный, В. П. Кузьменко, В. Е. Белай. — Санкт-Петербург : ГУАП, 2023. — 106 с. — ISBN 978-5-8088-1872-9.	URL: https://e.lanbook.com/book/461486 (дата обращения: 12.07.2025). - Текст: электронный.
3	Поварехо, А. С. САПР машин. Инженерный анализ в среде MATLAB-Simulink : учебное пособие / А. С. Поварехо, В. Н. Плищ. — Минск : БНТУ, 2022. — 73 с. — ISBN 978-985-583-702-3.	URL: https://e.lanbook.com/book/325697 (дата обращения: 12.07.2025). - Текст: электронный.

6. Перечень современных профессиональных баз данных и информационных справочных систем, которые могут использоваться при освоении дисциплины (модуля).

Официальный сайт РУТ (МИИТ) (<https://www.miiit.ru/>);

Научно-техническая библиотека РУТ (МИИТ) (<http://library.miiit.ru/>);

Образовательная платформа «Юрайт» (<https://urait.ru/>);

Общие информационные, справочные и поисковые системы «Консультант Плюс» (<http://www.consultant.ru/>), «Гарант» (<http://www.garant.ru/>);

«Техэксперт» — справочная система, предоставляющая нормативно-техническую, нормативно-правовую информацию (<https://docs.cntd.ru/>);

Электронно-библиотечная система издательства «Лань» (<http://e.lanbook.com/>);

Электронно-библиотечная система ibooks.ru (<http://ibooks.ru/>);

Главная книга (<https://glavkniga.ru/>).

7. Перечень лицензионного и свободно распространяемого программного обеспечения, в том числе отечественного производства, необходимого для освоения дисциплины (модуля).

Microsoft Office (Word, Excel); SimInTech; Python.

8. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю).

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, оснащенные компьютерной техникой, наборами демонстрационного оборудования и стендами для выполнения лабораторных работ.

9. Форма промежуточной аттестации:

Зачет в 6 семестре.

Курсовая работа в 7 семестре.

Экзамен в 7 семестре.

10. Оценочные материалы.

Оценочные материалы, применяемые при проведении промежуточной аттестации, разрабатываются в соответствии с локальным нормативным актом РУТ (МИИТ).

Авторы:

старший преподаватель кафедры
«Электропоезда и локомотивы»

Д.В. Назаров

Согласовано:

Заведующий кафедрой НТТС

П.А. Григорьев

Заведующий кафедрой ЭлЛ

О.Е. Пудовиков

Председатель учебно-методической
комиссии

С.В. Володин