МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего образования

«Юго-Западный государственный университет»

(ЮЗГУ)

Кафедра электроэнергетики и электротехники

УТВЕРЖДАЮ

Проректор

по учебной работе

_____ Т.Ю. Ткачева

«09» 10 2026 г.

«ИННОВАЦИОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ»

Методические указания к практическим занятиям

для обучающихся направления подготовки 13.04.02

«Электроэнергетика и электротехника»

Курск 2026

УДК 510

Составители: И.В. Ворначева, В.А. Чаплыгин

Рецензент
Кандидат технических наук, доцент кафедры
электроэнергетики и электротехники
О.М. Ларин

Инновационное оборудование электроэнергетических систем:
методические указания к практическим занятиям для обучающихся направления подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» / Юго-зап. гос. ун-т; сост.: И.В. Ворначева., В.А. Чаплыгин – Курск, 2026. – 31 с. – Библиогр.: с. 37.

Методические указания содержат задания к практическим занятиям для обучающихся по дисциплине «Инновационное оборудование электроэнергетических систем». Рекомендации могут использоваться при проведении практических работ, максимально облегчают подготовку к зачету. Предназначены преподавателям и обучающимся направления подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 29.10 Формат 60х84 1/16.
Усл. печ.л. 2,15. Уч.-изд.л.1,94. Тираж 100 экз. Заказ 920. Бесплатно.
Юго-Западный государственный университет.
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

СОДЕРЖАНИЕ

Практическое занятие №1……4
Практическое занятие №2……7
Практическое занятие №3……12
Практическое занятие №4……16
Практическое занятие №5……19
Практическое занятие №6……24
Практическое занятие №7……27
Практическое занятие №8……31
Практическое занятие №9……34

Практическое занятие №1

Тема: Инновационные технологии и компоненты электроэнергетической системы

Цель работы: Изучить состав и принципы функционирования инновационных компонентов современной электроэнергетической системы.

Освоить методику выбора и технико-экономического обоснования инновационного оборудования (накопителей энергии, устройств FACTS, цифровых подстанций).

Получить практические навыки расчёта параметров оборудования для интеграции возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в энергосистему.

2. Краткие теоретические сведения

2.1. Концепция Smart Grid

Интеллектуальная электроэнергетическая система (Smart Grid) — это комплексная цифровая энергосистема, обеспечивающая двусторонние потоки электроэнергии и информации между генерирующими источниками, сетями и потребителями.

2.2. Классификация инновационного оборудования

Группа оборудования	Назначение	Примеры
Накопители энергии (BESS)	Сглаживание графика нагрузки, регулирование частоты	Литий-ионные, проточные редокс-батареи, суперконденсаторы
Устройства FACTS	Управление потокораспределением, компенсация реактивной мощности	STATCOM, SVC, TCSC, UPFC
Цифровые подстанции	Цифровая передача измерительных сигналов, МЭК 61850	IED-терминалы, merging units, процессные шины
Умные инверторы	Интеграция ВИЭ, поддержка напряжения и частоты	Гибридные инверторы с функцией grid-forming
AMI-оборудование	Двусторонний учёт, удалённое управление	Smart-счётчики, концентраторы данных

2.3. Основные технические характеристики

Накопители энергии (BESS): Ёмкость (МВт·ч), Номинальная мощность (МВт), КПД цикла (%), Количество циклов заряд-разряд, Удельная

стоимость.

Устройства FACTS: Номинальное напряжение (кВ), Диапазон регулирования реактивной мощности (Мвар), Время отклика (мс), Тип подключения.

Цифровая подстанция (по МЭК 61850): Уровень процесса (Process Bus), Уровень присоединения (Bay Level), Уровень подстанции (Station Bus).

3. Задания для выполнения

Студент выполняет одно из заданий (по варианту, указанному преподавателем) или все три (по усмотрению преподавателя).

Задание 1. Расчёт параметров накопителя энергии (BESS) для сглаживания графика ВИЭ. Исходные данные: Солнечная электростанция (СЭС) мощностью $P_{ном}$=10 МВт подключена к распределительной сети. Определить небаланс мощности в каждом интервале: $\Delta P = P_{СЭС} - P_{нагр}$. Рассчитать необходимую ёмкость накопителя W_BESS (МВт·ч) для полного сглаживания графика. Определить номинальную мощность заряда/разряда P_BESS (МВт). Рассчитать КПД системы с учётом потерь η_BESS = 92%. Оценить срок окупаемости при тарифе на пиковую мощность 5000 руб./кВт·год и стоимости BESS — 25 000 руб./кВт·ч.

Задание 2. Выбор устройства FACTS для компенсации реактивной мощности

Исходные данные: Промышленный узел нагрузки 110 кВ потребляет активную мощность P = 40 МВт при $\cos \varphi_1 = 0{,}75$. Необходимо повысить коэффициент мощности до $\cos \varphi_2 = 0{,}95$. Рассчитать требуемую мощность компенсирующего устройства Qcomp (Мвар). Обосновать выбор типа устройства FACTS (STATCOM или SVC). Определить снижение потерь активной мощности в питающей линии сопротивлением R = 2 Ом до и после компенсации. Составить схему подключения выбранного устройства.

Задание 3. Анализ архитектуры цифровой подстанции

Исходные данные: Проектируется цифровая подстанция 110/10 кВ с двумя трансформаторами и шестью присоединениями 10 кВ. Разработать

структурную схему цифровой подстанции по трём уровням МЭК 61850. Определить состав оборудования: количество merging units (MU), количество IED-терминалов РЗА, тип процессной шины. Рассчитать снижение капитальных затрат за счёт отказа от аналоговых цепей ТТ и ТН. Составить таблицу сравнения традиционной и цифровой подстанций.

4. Порядок выполнения работы

1. Изучить теоретический материал раздела 2.
2. Получить у преподавателя номер варианта и исходные данные.
3. Выполнить расчёты согласно выбранному заданию.
4. Оформить результаты в виде таблиц и схем.
5. Сформулировать выводы по результатам расчётов.
6. Ответить на контрольные вопросы.

5. Требования к отчёту

Отчёт должен содержать: титульный лист, цель работы и исходные данные, расчётные формулы с пояснениями, таблицы с результатами расчётов, принципиальные схемы, выводы с количественными показателями эффективности, ответы на контрольные вопросы, список использованных источников.

6. Контрольные вопросы

1. В чём заключается принципиальное отличие Smart Grid от традиционной электроэнергетической системы?
2. Перечислите основные типы устройств FACTS и области их применения.
3. Какие стандарты МЭК применяются в цифровых подстанциях и какова их роль?
4. Почему накопители энергии являются критическим компонентом для интеграции ВИЭ?
5. Что такое виртуальная электростанция (ВЭС) и каковы её функции?
6. Как умные инверторы обеспечивают поддержку напряжения и

частоты в сети?

7. Какие преимущества даёт применение AMI-систем для энергокомпании и потребителя?

8. Каковы основные критерии выбора типа накопителя энергии (литий-ионный, проточный, суперконденсатор)?

Практическое занятие №2

Усовершенствованные методы контроля

Цель работы: Научиться подбирать и интегрировать технические средства контроля под специфику конкретного объекта (подстанция, ЛЭП, распределительный пункт).

Краткая теория по усовершенствованию систем контроля энергетического оборудования

Усовершенствование систем контроля энергетического оборудования базируется на переходе от традиционных реактивных и планово-предупредительных моделей управления к проактивным, интеллектуальным и цифровым подходам. Основной теоретической целью является повышение надежности, энергоэффективности и безопасности объектов энергетики при одновременном снижении эксплуатационных затрат.

1. Ключевые теоретические направления

Обслуживание «по состоянию» (Condition-Based Maintenance). Теория предполагает отказ от жестких регламентных ремонтов в пользу управления активами на основе реальных данных о техническом состоянии оборудования. Это позволяет планировать технические вмешательства только при наличии объективных признаков деградации узлов.

Предиктивная аналитика и машинное обучение. Использование исторических и текущих данных с датчиков позволяет строить прогнозные модели, выявляющие скрытые закономерности и предсказывающие возможные отказы до их наступления. Это формирует основу для риск-

ориентированного управления генерирующими активами.

Технология «цифровых двойников» (Digital Twins). Цифровой двойник представляет собой динамическую виртуальную копию физического оборудования, которая постоянно обновляется данными в реальном времени. Такие системы способны выполнять расчетно-диагностические задачи, например, сравнивать контролируемые параметры с нормативными значениями и моделировать аварийные режимы без риска для реального объекта.

Интеллектуальные системы технического учета. Теоретические модели таких систем включают модули для оперативного диагностирования энергопотоков, оптимизации режимов работы оборудования с помощью математических моделей и прогнозирования удельного расхода топливно-энергетических ресурсов.

2. Архитектура усовершенствованных систем контроля

Современная теория проектирования систем контроля выделяет три основных иерархических уровня:

Нижний (физический) уровень: Оснащение оборудования интеллектуальными датчиками и IoT-устройствами, обеспечивающими высокочастотный сбор данных о вибрации, температуре, давлении и электрических параметрах.

Средний (пограничный) уровень: Использование Edge-вычислений и модернизированных автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) для первичной фильтрации данных, локального автоматического регулирования и обеспечения кибербезопасности.

Верхний (аналитический) уровень: Корпоративные платформы и системы поддержки принятия решений (СППР), которые агрегируют информацию, применяют алгоритмы искусственного интеллекта и интегрируются с системами управления предприятием. Важным теоретическим требованием здесь является использование единых

стандартов информационных моделей (например, Common Information Model, CIM) для бесшовной совместимости разнородных систем.

3. Ожидаемые эффекты от усовершенствования

Внедрение указанных теоретических подходов на практике позволяет достичь следующих результатов:

Снизить частоту внеплановых остановок и аварийных ситуаций за счет раннего диагностирования развивающихся дефектов.

Оптимизировать затраты на техническое обслуживание и ремонт (ТОиР) за счет исключения избыточных регламентных работ.

Повысить общий КПД энергетических установок за счет непрерывной автоматической корректировки режимов их работы.

Обеспечить экономическую безопасность предприятия за счет точного прогнозирования расхода энергоресурсов и выявления скрытого потенциала энергосбережения.

Таким образом, усовершенствование систем контроля энергетического оборудования представляет собой комплексную цифровую трансформацию, объединяющую физические активы, передовые ИТ-технологии и новые математические модели управления для достижения максимальной эксплуатационной эффективности.

Задание для студентов

Исходные данные (выбрать один из вариантов или использовать общий):

Объект: Паротурбинная установка (ПТУ) / Газотурбинная установка (ГТУ) / Силовой трансформатор на подстанции 110/220 кВ.

Текущая ситуация: Оборудование эксплуатируется более 15 лет. Диагностика проводится раз в месяц обходчиками (визуально, тепловизором), ремонты - строго по графику (ППР) раз в 1-2 года.

Проблема: Высокие затраты на плановые ремонты (часто оборудование вскрывается без видимых дефектов), при этом 2-3 раза в год случаются внезапные аварийные остановки из-за развития скрытых дефектов между

обходами.

Шаг 1. Анализ узких мест текущей системы

Сформулируйте 3-4 основных недостатка текущей реактивной/плановой модели контроля для выбранного объекта. Укажите, какие риски несет предприятие из-за отсутствия непрерывного мониторинга.

Шаг 2. Выбор контролируемых параметров и датчиков (IoT)

Составьте таблицу «Параметр — Тип датчика — Диагностируемый дефект» для вашего оборудования (не менее 5 строк).

Пример: Вибрация подшипников -> Акселерометр -> Дисбаланс ротора, расцентровка, износ вкладышей.

Шаг 3. Проектирование архитектуры системы

Разработайте и опишите (или нарисуйте в виде блок-схемы) трехуровневую архитектуру интеллектуальной системы мониторинга:

Нижний уровень (Полевой). Сбор данных (какие протоколы передачи данных от датчиков к шлюзу вы выберете? Например, WirelessHART, LoRaWAN, проводной 4-20 мА).

Средний уровень (Edge/АСУ ТП). Локальная предобработка и фильтрация данных.

Верхний уровень (Облако/Сервер). Платформа предиктивной аналитики и цифровой двойник.

Шаг 4. Алгоритм работы предиктивной модели (Цифровой двойник)

Опишите логику работы системы поддержки принятия решений (СППР). Как система должна реагировать, если датчики фиксируют отклонение параметров, но значения еще не достигли критических уставок аварийной защиты? (Опишите концепцию трендов и прогнозирования остаточного ресурса).

Шаг 5. Оценка эффекта

Перечислите 3 ключевых показателя эффективности (KPI), которые улучшатся на предприятии после внедрения разработанной системы (например, снижение коэффициента аварийности, оптимизация склада

запчастей и т.д.).

Требования к отчету:

Отчет должен содержать титульный лист, описание выбранного объекта, таблицу датчиков, структурную схему системы контроля и обоснование перехода на риск-ориентированное управление активами.

Список контрольных вопросов (для защиты практической работы и устного опроса)

Контрольные вопросы

1. В чем заключается принципиальное отличие стратегии ремонта «по состоянию» (Condition-Based Maintenance) от традиционной системы планово-предупредительных ремонтов (ППР)?
2. Что такое «риск-ориентированное управление активами» в электроэнергетике и как оно связано с системами непрерывного контроля?
3. Как концепция «условно-постоянной составляющей» расхода энергоресурсов влияет на оценку энергоэффективности предприятия и как интеллектуальные системы учета помогают ею управлять?
4. Дайте определение понятию «цифровой двойник» (Digital Twin) в контексте энергетики. Чем он отличается от обычной 3D-модели или SCADA-системы?
5. Опишите роль предиктивной аналитики и машинного обучения в системах диагностики. На каких исторических данных обучаются нейросети для прогнозирования отказов?
6. Зачем при интеграции разнородных систем контроля и АСУ ТП необходимо использование унифицированных информационных моделей (например, CIM - Common Information Model)?
7. Какие технологии промышленного интернета вещей (IIoT) наиболее применимы для передачи диагностических данных на удаленных или протяженных объектах (например, на ЛЭП или трубопроводах) и почему?
8. Назовите основные физические методы неразрушающего

контроля и диагностики, применяемые для высоковольтного оборудования (трансформаторов, кабелей) в режиме онлайн.

9. С какими основными рисками в области информационной (кибернетической) безопасности сталкиваются энергокомпании при внедрении облачных платформ предиктивной аналитики и IoT-датчиков в контур критической инфраструктуры?

10. Как должен измениться квалификационный профиль оперативного и ремонтного персонала при переходе предприятия на интеллектуальные системы контроля и цифровые двойники?

Практическое занятие №3
Усовершенствованные интерфейсы и методы поддержки принятия решений

Цель работы: формирование у обучающихся профессиональных компетенций в области проектирования, анализа и применения усовершенствованных человеко-машинных интерфейсов (HMI) и интеллектуальных систем поддержки принятия решений (ИСППР) для безопасного и эффективного управления инновационным оборудованием электроэнергетических объектов.

Усовершенствованные интерфейсы взаимодействия «человек-машина» (Human-Machine Interface, HMI) и интеллектуальные системы поддержки принятия решений (ИСППР, Decision Support Systems, DSS) являются ключевыми элементами цифровой трансформации электроэнергетики. В условиях роста доли возобновляемых источников энергии и усложнения режимов работы сетей традиционные SCADA-системы перестают справляться с объемом данных. Инновационное оборудование (цифровые подстанции, КРУЭ с онлайн-мониторингом, умные трансформаторы) генерирует большие массивы телеметрии, которые необходимо преобразовывать в понятные и своевременные рекомендации для

оперативно-диспетчерского персонала.

2. Ключевые технологии в составе ИСППР

Современные системы строятся на основе замкнутого интеллектуального цикла «восприятие – осмысление – решение – действие». Основные технологические компоненты включают:

Экспертные системы и продукционные правила: базы знаний, содержащие сотни правил (например, «ЕСЛИ температура масла > X И нагрузка > Y, ТО рекомендовать снижение мощности»), позволяющие оценивать причинно-следственные связи в нештатных ситуациях.

Графы знаний (Knowledge Graphs) и большие языковые модели (LLM): обеспечивают семантический поиск, структурированное представление взаимосвязей между объектами сети и генерацию текстовых пояснений к аварийным событиям для оператора.

Предиктивная аналитика и цифровые двойники: позволяют прогнозировать остаточный ресурс оборудования (например, изоляции трансформатора или контактных соединений) и предлагать превентивные меры до наступления отказа.

3. Принципы построения усовершенствованных интерфейсов (HMI)

Традиционный интерфейс, перегруженный мигающими сигналами, приводит к когнитивной перегрузке оператора. Усовершенствованный HMI должен:

Использовать принцип «управления по исключениям»: выделять цветом и формой только те параметры, которые вышли за пределы нормы.

Предлагать не просто констатацию факта аварии, а ранжированный список рекомендуемых действий с оценкой рисков каждого варианта.

Обеспечивать адаптивность: изменять детализацию мнемосхемы в зависимости от роли пользователя (оператор, инженер, диспетчер) и текущей ситуации (нормальный режим или авария).

4. Практическая ценность

Внедрение таких систем в инновационное оборудование позволяет

существенно сократить временные затраты на локализацию аварий, минимизировать влияние «человеческого фактора» и повысить общую надежность электроснабжения потребителей.

Часть 2. Задание на практическую работу

Тема: Проектирование фрагмента системы поддержки принятия решений (СППР) с усовершенствованным интерфейсом для оператора цифровой подстанции.

Цель: Закрепить теоретические знания о методах и средствах поддержки принятия решений, приобрести навыки формализации знаний и проектирования эргономичных интерфейсов для управления инновационным энергетическим оборудованием.

Время выполнения: 90 минут.

Исходные данные (Кейс)

На цифровой подстанции 110/10 кВ, оснащенной интеллектуальными устройствами РЗА и системами онлайн-мониторинга состояния оборудования, зафиксирована следующая совокупность событий:

Срабатывание датчика онлайн-мониторинга: температура верхних слоев масла силового трансформатора Т-1 достигла 85°С (при норме до 75°С).

Срабатывание газового реле (сигнал «Легкая работа»).

Потребление на секции шин 10 кВ №1 превысило номинальную мощность трансформатора на 15% в течение последних 20 минут.

Прогноз погоды: ожидаемое повышение температуры окружающей среды до +35°С в ближайшие 2 часа.

Задачи для студентов

Анализ ситуации и формализация знаний (20 мин):

Составьте фрагмент базы знаний (в виде дерева решений или набора продукционных правил «ЕСЛИ-ТО») для диагностики данной ситуации. Определите не менее 3-х возможных причин и соответствующих им уровней угрозы (низкий, средний, высокий).

Сформулируйте пошаговый алгоритм рекомендаций, который должна выдать система оператору. Алгоритм должен включать:

1. Подтверждение достоверности данных (перекрестная проверка).
2. Оперативные меры (например, перераспределение нагрузки, включение резервного охлаждения).
3. Долгосрочные рекомендации (вызов бригады, внесение в журнал дефектов).

Разработайте словесное описание или эскиз (на бумаге или в графическом редакторе) экрана оператора для данной аварийной ситуации. Макет должен содержать:

Зону мнемосхемы с цветовой индикацией проблемного узла.

Панель критических уведомлений (с приоритетом).

Окно СППР с ранжированными рекомендациями и кнопками быстрого подтверждения действий («Применить», «Отклонить с указанием причины»).

Элементы, снижающие когнитивную нагрузку (например, скрытие второстепенных параметров).

Кратко обоснуйте выбранные методы диагностики и интерфейсные решения с точки зрения скорости реакции оператора и минимизации вероятности ошибки.

Отчет должен содержать:

1. Дерево решений или таблицу продукционных правил.
2. Текстовый алгоритм действий СППР.
3. Эскиз или детальное описание макета интерфейса.
4. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается принципиальное отличие традиционных SCADA-систем от систем с усовершенствованной поддержкой принятия решений?
2. Какие типы инновационного энергетического оборудования (например, КРУЭ, силовые трансформаторы с РПН) наиболее критичны к

качеству и скорости предоставления информации оператору?

3. Какую роль играют графы знаний и прецедентный подход в архитектуре современной интеллектуальной системы управления сетью?

4. Что такое «когнитивная перегрузка» оператора и какие конкретные приемы проектирования HMI позволяют ее предотвратить?

Практическое занятие №4

Предпосылки перехода к стратегии модернизации и инновационного развития электроэнергетики в России

Цель работы: Изучить и систематизировать ключевые предпосылки, обуславливающие необходимость перехода электроэнергетики России от экстенсивного развития к стратегии глубокой модернизации и инновационного обновления.

Проанализировать текущее состояние и основные вызовы, стоящие перед единой энергетической системой (ЕЭС) России.

Оценить роль инновационного оборудования в повышении надежности, эффективности и управляемости энергосистемы.

Рассмотреть механизмы реализации концепции Smart Grid (интеллектуальных энергосистем) как основы технологического обновления отрасли

2. Краткая теория

Текущее состояние и ключевые вызовы. Электроэнергетика является базовой отраслью экономики, но на современном этапе сталкивается с рядом системных проблем.

Высокий износ фондов. Значительная часть генерирующего и сетевого оборудования имеет высокий уровень физического и морального износа, что напрямую влияет на надежность энергоснабжения и увеличивает риски аварий.

Рост и изменение структуры нагрузок. Развитие средств коммуникации, появление нового энергоемкого оборудования и

электрификация транспорта приводят к перегрузкам существующих сетей, требующим не просто расширения, а качественного изменения их архитектуры.

Потери в сетях. Традиционные технологии не позволяют в полной мере минимизировать коммерческие и технические потери при передаче и распределении энергии.

Ключевые предпосылки перехода к инновационному развитию.

Переход к новой стратегии обусловлен комплексом взаимосвязанных факторов. Технологические предпосылки. Исчерпание потенциала простого наращивания мощностей. В Энергетической стратегии России до 2035 года центральной идеей провозглашен переход топливно-энергетического комплекса (ТЭК) от ресурсно-сырьевой модели к ресурсно-инновационному развитию.

Экономические предпосылки: Необходимость снижения энергоемкости ВВП страны и повышения общей энергоэффективности, что невозможно без внедрения инновационных энергосберегающих технологий в сферах производства и передачи энергии.

Экологические предпосылки. Глобальный тренд на декарбонизацию требует создания условий для интеграции возобновляемых источников энергии (ВИЭ), распределенной генерации и систем накопления энергии в единую сеть.

Геополитические и регуляторные предпосылки. Курс на обеспечение технологического суверенитета страны делает приоритетным использование серийного отечественного инновационного оборудования и типовых проектов при реализации программ модернизации.

Роль инновационного оборудования в стратегии модернизации. Модернизация электроэнергетики невозможна без замены устаревших активов на инновационное оборудование, которое обеспечивает цифровизацию и интеллектуализацию. Концепция Smart Grid трактуется как основа инновационного преобразования отрасли, позволяющая перевести

управление сетями на качественно новый уровень.

Новые функции управления. Внедрение интеллектуальных систем учета, контроля, мониторинга и управления децентрализованными сетями для оптимизации конфигурации систем нагрузки.

Технологическая гибкость. Использование устройств FACTS (гибкие технологии передачи переменного тока), цифровых трансформаторов с системами онлайн-диагностики, накопителей энергии и микропроцессорных терминалов релейной защиты.

Развитие изолированных систем: Создание гибридных систем электроснабжения (например, в Арктической зоне РФ), сочетающих традиционную генерацию, ВИЭ и накопители, что снижает зависимость от дорогостоящего привозного топлива.

Задание для студентов

На основе открытых данных (отчеты СО ЕЭС, Росстата или профильных компаний) провести сравнительный анализ двух сценариев развития участка распределительной сети.

Традиционный - замена изношенного оборудования на аналогичное новое.

Инновационный - внедрение цифровой подстанции с интеллектуальными устройствами РЗА и системой автоматического управления режимами.

Критерии оценки: надежность, снижение потерь, капитальные и операционные затраты (CAPEX/OPEX), срок окупаемости.

Контрольные вопросы

1. Какие показатели текущего состояния ЕЭС России являются наиболее критичными и требуют первоочередного внедрения инновационного оборудования?
2. Как концепция Smart Grid решает проблемы интеграции возобновляемых источников энергии в российскую энергосистему?

3. В чем заключаются преимущества и риски импортозамещения инновационного энергетического оборудования в условиях санкционного давления?

4. Как цифровые двойники и системы предиктивной аналитики меняют подходы к техническому обслуживанию оборудования (переход от ППР к обслуживанию по состоянию)?

Практическое занятие №5
Выбор согласующих трансформаторов

Цель работы:

1. Изучить назначение, принцип действия и особенности конструкции согласующих трансформаторов в современных системах электроэнергетики.

2. Научиться производить расчет основных параметров согласующих трансформаторов для систем с высокочастотными преобразователями и нестандартными импедансами.

3. Ознакомиться с инновационными магнитными материалами (аморфные, нанокристаллические сплавы, современные ферриты) и технологиями намотки (лицендрат), применяемыми для повышения эффективности и удельной мощности оборудования.

Краткая теория

Согласующий трансформатор - это электромагнитное устройство, предназначенное для согласования сопротивлений (импедансов) источника и нагрузки с целью обеспечения передачи максимальной активной мощности и минимизации отраженных сигналов (в импульсных и высокочастотных системах).

В отличие от классических силовых трансформаторов промышленной частоты (50 Гц), которые работают в составе традиционных сетей, инновационное оборудование в электроэнергетике использует согласующие трансформаторы в следующих специфических областях:

- Твердотельные трансформаторы (SST) и микросети**.** Высокочастотные трансформаторы (ВЧТ) в составе двунаправленных мостовых преобразователей (DAB - Dual Active Bridge) для стыковки сетей постоянного и переменного напряжения, зарядных станций для электромобилей (EV).
- Возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Согласование переменного импеданса солнечных панелей или ветрогенераторов с входными цепями инверторов.
- Системы беспроводной передачи энергии (WPT). Резонансные согласующие трансформаторы для индукционной зарядки транспорта и питания IoT-устройств

Основное условие согласования. Для передачи максимальной мощности входное сопротивление трансформатора со стороны источника (Z_{in}) должно быть равно комплексно-сопряженному внутреннему сопротивлению источника (Z_{source}). Для чисто активных сопротивлений коэффициент трансформации (n) определяется по формуле:

$$n = \sqrt{\frac{Z_{source}}{Z_{load}}}$$

где Z_{source} — сопротивление источника,

Z_{load} — сопротивление нагрузки.

Инновационные материалы и технологии. Поскольку в современном оборудовании рабочие частоты составляют от единиц до сотен кГц (что позволяет радикально снизить габариты), выбор материалов становится критическим:

1. Магнитопроводы. Вместо традиционной электротехнической стали применяются аморфные и нанокристаллические сплавы (например, Finemet), а также силовые ферриты (Mn-Zn). Они обладают сверхнизкими потерями на вихревые токи и гистерезис на высоких частотах, а также высокой индукцией насыщения.
2. Обмотки. Для борьбы с эффектом вытеснения тока (скин-

эффектом) и эффектом близости на высоких частотах используется лицендрат (Litz wire) - многожильный провод, где каждая жила изолирована и переплетена по специальному алгоритму, обеспечивая равномерное распределение тока по сечению.

Задание для студентов

Вам поручено разработать высокочастотный гальванически развязанный согласующий трансформатор для инновационной станции быстрой зарядки электромобилей (EV Fast Charger). Трансформатор работает в составе изолированного DC-DC преобразователя (топология DAB), соединяющего высоковольтную шину солнечной электростанции и низковольтную шину заряжаемой батареи.

Исходные данные (вариант выдается преподавателем, ниже приведен базовый пример):

- Мощность преобразователя (P): 50 кВт.
- Напряжение на стороне источника (высоковольтная шина ВИЭ, U1): 800 В (постоянное, с ВЧ инверсией).
- Напряжение на стороне нагрузки (шина батареи EV, U2): 400 В.
- Рабочая частота преобразования (f): 20 кГц.
- Требуемый КПД трансформатора: не менее 98.5%.

Необходимо выполнить следующие расчеты и обоснования:

1. Электрический расчет:
   - Рассчитать требуемый коэффициент трансформации (nn).
   - Определить действующие значения токов в первичной и вторичной обмотках с учетом формы токов (принять форму меандра/трапеции, характерную для DAB).
   - Рассчитать габаритную (типовую) мощность трансформатора (Ptyp$Ptyp$).
2. Выбор инновационных материалов:
   - Выбрать материал магнитопровода из предложенных (Сплав АМТЕК / Нанокристаллический сплав / Феррит 3C90). Обосновать выбор,

опираясь на удельные потери на частоте 20 кГц и индукцию насыщения (Bsat).

- Выбрать тип провода для обмоток (Медный прямоугольный шин / Лицендрат). Обосновать выбор с точки зрения минимизации потерь от эффекта близости на частоте 20 кГц.

3. Конструкторский расчет (оценочный):

- Используя метод произведения площадей (Ap=Aw·Ae), оценить необходимые размеры окна сердечника и сечения магнитопровода для заданной мощности и частоты.
- Определить примерное количество витков первичной и вторичной обмоток, исходя из выбранного материала и допустимой индукции (ΔB).

4. Анализ инновационности**:** Написать краткое резюме (1 абзац): какие преимущества дает применение данного согласующего трансформатора в составе твердотельной системы по сравнению с использованием классального низкочастотного (50 Гц) разделительного трансформатора той же мощности.

Отчет должен содержать:

1. Титульный лист и исходные данные.
2. Схему включения трансформатора в составе DC-DC преобразователя.
3. Пошаговый расчет с указанием всех формул и допущений.
4. Таблицу сравнения магнитных материалов и обоснование выбора.
5. Эскиз упрощенной конструкции магнитопровода (например, броневой или стержневой тип, Ш-образный или тороидальный) с указанием габаритных размеров.
6. Выводы по проделанной работе (оценка массогабаритных показателей и эффективности инновационного решения).

Контрольные вопросы

1. Что такое согласующий трансформатор и каково его основное назначение в электрических цепях?

2. Сформулируйте условие передачи максимальной активной мощности от источника к нагрузке с помощью согласующего трансформатора.

3. Как связан коэффициент трансформации (n) с сопротивлениями (импедансами) источника и нагрузки в случае чисто активных сопротивлений?

4. Чем принципиально отличается режим работы согласующего высокочастотного трансформатора от классического силового трансформатора промышленной частоты (50 Гц)?

5. Почему использование традиционной электротехнической стали недопустимо в высокочастотных согласующих трансформаторах (рабочие частоты от 10 до 100 кГц)? Какие физические потери выходят на первый план?

6. В чем заключаются преимущества аморфных и нанокристаллических сплавов по сравнению с традиционными ферритами и электротехнической сталью при работе на высоких частотах?

7. Что такое «лицендрат» (Litz wire)? Какие электромагнитные явления (эффекты) он позволяет компенсировать в обмотках высокочастотных трансформаторов?

8. Как влияет температура на магнитную проницаемость и потери в современных ферритах (например, 3C90) и как это учитывается при выборе материала сердечника?

9. Как увеличение рабочей частоты преобразователя влияет на массогабаритные показатели (объем и вес) магнитопровода и обмоток трансформатора? Обоснуйте ответ.

10. Что такое метод «произведения площадей» (Ap) и для чего он применяется на этапе эскизного проектирования высокочастотных трансформаторов?

11. Как форма тока в обмотках (например, меандр или трапеция в DAB-преобразователях по сравнению с синусоидой) влияет на расчет действующих значений тока и выбор сечения провода?

12. Почему при расчете числа витков высокочастотного трансформатора необходимо ограничивать не только максимальную индукцию (Bmax), но и размах индукции (ΔB)?

13. Какую роль играет высокочастотный согласующий трансформатор в составе твердотельного трансформатора (SST) или двунаправленного мостового преобразователя (DAB)?

14. Какие преимущества дает применение высокочастотного гальванически развязанного DC-DC преобразователя с согласующим трансформатором для станций быстрой зарядки электромобилей по сравнению с классической схемой на базе понижающего трансформатора 50 Гц и неуправляемого выпрямителя?

15. Каким образом согласующие трансформаторы применяются в системах беспроводной передачи энергии (WPT) и в цепях интеграции возобновляемых источников энергии (ВИЭ)?

Практическое занятие №6

Синтез системы автоматического управления

Цель работы: Приобретение практических навыков синтеза систем автоматического управления для инновационного оборудования электроэнергетики. Закрепление теоретических знаний по выбору структуры и аналитическому расчету параметров регуляторов, обеспечивающих заданные показатели качества переходных процессов (устойчивость, быстродействие, перерегулирование) с учетом специфики объектов возобновляемой энергетики (например, инверторных преобразователей или систем возбуждения генераторов).

Краткая теория

Синтез САУ – это процедура выбора структуры и расчета параметров

устройства управления (регулятора), при которых замкнутая система удовлетворяет заданным требованиям к качеству управления и устойчивости. В отличие от анализа (где структура известна, и мы оцениваем ее свойства), при синтезе мы создаем структуру под заданные требования.

Основные показатели качества САУ:

Прямые (оцениваются по переходной характеристике h(t)):

Время регулирования (tp) – время, за которое отклонение от установившегося значения входит в заданный коридор (обычно ±5%).

Перерегулирование (σ,%) – максимальное отклонение от установившегося значения, выраженное в процентах.

Статическая ошибка (est) – отклонение в установившемся режиме.

Косвенные (оцениваются по частотным или корневым характеристикам):

Запас устойчивости по амплитуде (ΔL, дБ) и по фазе ($\Delta\varphi$, град).

Степень затухания (η).

Методы синтеза:

Корневые методы: размещение полюсов замкнутой системы в желаемой области комплексной плоскости (метод модального управления).

Частотные методы: использование логарифмических амплитудно-фазовых частотных характеристик (ЛАФЧХ, диаграммы Боде). Позволяют легко обеспечить требуемые запасы устойчивости.

Методы оптимума, например, оптимум модуля (для быстрой компенсации возмущений) или симметричный оптимум (для систем с большой постоянной времени), широко применяемые для настройки ПИ- и ПИД-регуляторов в электроприводе и силовой электронике.

Специфика инновационного оборудования в электроэнергетике. Объекты управления на базе ВИЭ (солнечные инверторы, преобразователи ветрогенераторов, системы накопления энергии) часто описываются моделями с малыми постоянными времени, но подвержены сильным внешним возмущениям (изменение инсоляции, скорости ветра). Поэтому к

их САУ предъявляются высокие требования по робастности (нечувствительности к изменению параметров объекта) и быстродействию.

Задание для студентов

Синтез ПИД-регулятора напряжения на выходе инвертора солнечной электростанции (СЭС), подключенной к локальной сети.

Исходные данные. Математическая модель инверторного модуля с фильтром (объект управления) имеет вид апериодического звена второго порядка:

$$W_{obj}(s) = \frac{K}{(T_1 s+1)(T_2 s+1)}$$

где K=4.0 (коэффициент усиления), $T1$=0.15, $T2$=0.05

Требования к качеству замкнутой САУ:

Перерегулирование: $\sigma \leq 15\%$

Время регулирования: $tp \leq 0.25$

Статическая ошибка: est=0.

Этапы выполнения работы:

Анализ исходной системы: Записать передаточную функцию разомкнутой системы с единичной отрицательной обратной связью. Оценить ее устойчивость (например, по критерию Гурвица) и построить переходную характеристику (в MATLAB/Simulink, Python или VisSim). Убедиться, что без регулятора требования не выполняются.

Выбор структуры регулятора: Поскольку требуется нулевая статическая ошибка, выбрать ПИ- или ПИД-регулятор с передаточной функцией:

$$W_{reg}(s) = K_p\left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right)$$

Расчет параметров регулятора: Использовать метод оптимума модуля (или частотный метод) для расчета коэффициентов Kp, Ti , Td. Подсказка: для компенсации наибольшей постоянной времени объекта можно использовать условие Ti=$T1$.

Верификация. Записать передаточную функцию синтезированной

замкнутой системы. Построить ее переходную характеристику в среде моделирования.

Анализ результатов. Снять с графика реальные значения σ и tp. Сравнить их с заданными требованиями. Сделать вывод о работоспособности синтезированной САУ для инновационного оборудования СЭС.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается принципиальное различие между задачами анализа и синтеза систем автоматического управления?
2. Перечислите основные прямые и косвенные показатели качества переходных процессов. Как они связаны между собой (например, как запас по фазе влияет на перерегулирование)?
3. Как введение пропорциональной (П), интегральной (И) и дифференциальной (Д) составляющих в регулятор влияет на быстродействие, перерегулирование и статическую ошибку системы?
4. В чем заключаются особенности синтеза САУ для объектов возобновляемой энергетики (инверторы, ветрогенераторы) по сравнению с традиционными объектами (например, тепловой электростанцией)? Почему важна робастность?
5. Сформулируйте частотный критерий устойчивости Найквиста. Как с помощью логарифмических частотных характеристик (Боде) определить запасы устойчивости синтезированной системы?
6. Что такое астатизм системы и как он обеспечивается при синтезе регулятора?

Практическое занятие №7

Выбор датчиков и регуляторов

Цель работы сформировать у студентов практические навыки выбора современных (в том числе интеллектуальных) датчиков и микропроцессорных регуляторов для систем электроснабжения с учетом технических, экономических и эксплуатационных требований, а также

совместимости с современными цифровыми протоколами связи (IoT, IEC 61850, Modbus).

Краткая теория

Роль датчиков в современной электроэнергетике.

Датчики являются первичными источниками информации в системах автоматизации. В инновационных системах (Smart Grid, цифровые подстанции) традиционные аналоговые датчики активно заменяются на «умные» (интеллектуальные) датчики. Такой датчик представляет собой вычислительный узел с собственным процессором и памятью, объединяющий функции измерения, линеаризации сигнала, самодиагностики и цифровой связи в одном устройстве.

Классификация и критерии выбора датчиков:

По измеряемому параметру: тока и напряжения (включая оптические трансформаторы и датчики Холла), температуры (волоконно-оптические, терморезисторы), вибрации, уровня и давления.

По типу выходного сигнала: аналоговые (4–20 мА, 0–10 В) и цифровые (с интерфейсами RS-485, Modbus, IO-Link, беспроводные WSN).

Критерии выбора: диапазон измерений, класс точности, быстродействие, стойкость к электромагнитным помехам, наличие функций самодиагностики на обрывы и мониторинга пороговых значений.

Интеллектуальные датчики превосходят традиционные за счет встроенной обработки сигналов и диагностики, что повышает общую точность и функциональность системы.

Регуляторы в электроэнергетике. Регуляторы вырабатывают управляющее воздействие для поддержания заданных параметров (напряжения, частоты, температуры оборудования).

Типы алгоритмов: П (пропорциональный), ПИ (пропорционально-интегральный), ПИД (пропорционально-интегрально-дифференциальный).

Инновационные решения: микропроцессорные контроллеры с поддержкой адаптивного или нечеткого (fuzzy) регулирования. Установка

микропроцессоров прямо в устройства управления позволяет проверять состояние системы в реальном времени и оптимизировать процессы.

Современные тенденции.

Одним из ключевых примеров цифровых инноваций в энергетике является внедрение «умных» датчиков и счетчиков, собирающих данные для последующего анализа. Решения на основе IoT все чаще сочетаются с функционалом искусственного интеллекта для обработки больших данных и предиктивного обслуживания оборудования. Например, датчики тока и напряжения выявляют перекосы фаз и неоптимальные режимы, позволяя автоматике отключать неиспользуемые нагрузки для энергосбережения.

Задание для студентов

Выбор комплекта «датчик + микропроцессорный регулятор» для системы мониторинга и управления силовым оборудованием.

Исходные данные (для группы или индивидуальной работы):

Объект - силовой масляный трансформатор 110/10 кВ в составе цифровой подстанции.

Контролируемые параметры: температура верхних слоев масла (диапазон 0...120 °С), вибрация корпуса (диапазон 0...20 мм/с).

Требования к датчикам: наличие цифрового интерфейса (Modbus RTU или IO-Link), класс точности не хуже 1.0, степень защиты не ниже IP65, устойчивость к сильным электромагнитным полям.

Требования к регулятору: поддержка минимум 2-х каналов ввода, реализация ПИД-регулирования для управления системой охлаждения (включение вентиляторов), возможность передачи данных по протоколу IEC 61850 или Ethernet, наличие веб-интерфейса для настройки.

Этапы выполнения работы:

Проанализировать исходные данные и выделить ключевые технические требования к оборудованию.

Провести сравнительный анализ минимум двух современных моделей датчиков (например, интеллектуальный датчик температуры с цифровым

выходом и вибродатчик) от известных производителей. Заполнить сравнительную таблицу (параметр, модель 1, модель 2, обоснование выбора).

Выбрать микропроцессорный регулятор (контроллер), совместимый с выбранными датчиками и удовлетворяющий требованиям по алгоритмам управления и связи.

Обосновать выбор инновационных характеристик оборудования (например, наличие встроенного веб-сервера, функций самодиагностики, энергоэффективности).

Сделать вывод о целесообразности применения выбранного комплекта для повышения надежности и инновационности системы электроснабжения.

Контрольные вопросы

1. В чем заключаются основные функциональные отличия «умного» (интеллектуального) датчика от традиционного аналогового датчика в электроэнергетике?
2. Назовите ключевые критерии выбора датчика для работы в условиях сильных электромагнитных полей и экстремальных температур на подстанции.
3. Какие преимущества дает использование микропроцессорных ПИД-регуляторов по сравнению с аналоговыми регуляторами в системах энергоснабжения?
4. Как наличие стандартизированных протоколов связи (Modbus, IO-Link, IEC 61850) влияет на архитектуру и выбор датчиков в инновационных системах?
5. Каким образом интеграция датчиков и регуляторов в IoT-платформы способствует повышению энергоэффективности и переходу к предиктивному обслуживанию?
6. Что такое функция самодиагностики в интеллектуальных датчиках и как она снижает эксплуатационные расходы на техническое обслуживание оборудования?

Практическое занятие № 8

Расчет контура регулирования тока в системе ТП-Д

Цель работы: изучить принципы построения и приобрести навыки инженерного расчета параметров регулятора тока (внутреннего контура) в системе «Тиристорный преобразователь – Двигатель постоянного времени» (ТП-Д) с применением методов синтеза систем автоматического управления. Оценить влияние дискретизации и цифрового управления на динамику инновационных электроприводов.

Краткая теория

В современных высокодинамичных электроприводах (например, для испытательных стендов, прокатных станов, тяговых систем) система ТП-Д строится по каскадному принципу. Контур регулирования тока (КРТ) является внутренним, быстродействующим контуром.

Основные функции КРТ:

1. Обеспечение заданного быстродействия системы.
2. Ограничение тока якоря на допустимом уровне при пусках, торможениях и реверсах.
3. Компенсация возмущений, связанных с колебаниями напряжения сети и ЭДС двигателя.

Структурная схема КРТ включает в себя следующие звенья:

Регулятор тока (РТ): Обычно выполняется в виде пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора.

Тиристорный преобразователь (ТП): В инженерных расчетах заменяется апериодическим звеном с коэффициентом усиления KТП и эквивалентной постоянной времени TТП, учитывающей дискретность и запаздывание выпрямления.

Двигатель (Д) / Якорная цепь моделируется апериодическим звеном с сопротивлением Rя и электромагнитной постоянной времени Tя. ЭДС двигателя в контуре тока рассматривается как внешнее возмущающее воздействие, так как Tмех$\gg T$я.

Датчик тока (ДТ): Пропорциональное звено с коэффициентом передачи KДТ и постоянной времени фильтра Tф.

Методика расчета:

Для обеспечения быстрого отработки возмущений без перерегулирования КРТ настраивают по методу «Технического оптимума» (модального управления). Суть метода заключается в компенсации доминирующей электромагнитной постоянной времени якорной цепи с помощью форсирующего звена ПИ-регулятора.

Передаточная функция ПИ-регулятора:

$$W_{\text{РТ}}(p) = \frac{k_p(T_i p+1)}{T_i p}$$

Параметры настройки при компенсации Tя:

Постоянная интегрирования:Ti=Tя+Tф (или Ti=Tя), если фильтром пренебрегают).

Коэффициент передачи регулятора:

$$k_p = \frac{T_i \cdot R_{\text{я}}}{2 \cdot K_{\text{тп}} \cdot K_{\text{дт}} \cdot T_{\text{тп}}}$$

В современном оборудовании расчетные непрерывные параметры kp и Ti далее переводятся в разностные уравнения для цифровых сигнальных процессоров (DSP) или микроконтроллеров. При этом необходимо учитывать шаг дискретизации Td, который вносит дополнительное фазовое запаздывание, требующее корректировки расчетных параметров регулятора.

Задание для студентов

Исходные данные (вариант выдается преподавателем, пример):

Двигатель постоянного времени независимого возбуждения: Pном=100 кВт,

Uном=440 В, Iном=250А, nном=1000 об/мин.

Сопротивление якорной цепи: Rя=0.08 Ом.

Электромагнитная постоянная времени: Tя=0.012 с.

Тиристорный преобразователь: трехфазный нулевой (m=3), частота

сети fc=50 Гц. Режим непрерывного тока якоря.

Датчик тока на базе эффекта Холла: KДТ=0.02В/А, постоянная времени фильтра Tф=0.001с.

Требуется выполнить:

Рассчитать эквивалентные параметры тиристорного преобразователя (KТП, TТП). Подсказка: KТП=Uном/Uупр.ном. (принять Uупр.ном=10 В), TТП≈1/mfc.

Составить структурную схему контура регулирования тока.

Рассчитать параметры аналогового ПИ-регулятора тока (kp, Ti) по методу настройки на технический оптимум.

(Блок инновационного оборудования). Рассчитать коэффициенты цифрового ПИ-регулятора (KP, KI) для реализации в микропроцессорной системе управления при частоте опроса (дискретизации) fd=10 кГц. Оценить, как шаг квантования по времени влияет на запас по устойчивости. Сделать вывод о быстродействии спроектированного контура.

Контрольные вопросы

1. Каково функциональное назначение внутреннего контура регулирования тока в каскадной системе подчиненного регулирования электропривода?

2. Почему при расчете контура тока ЭДС двигателя постоянного времени не включается в передаточную функцию объекта регулирования, а рассматривается как возмущение?

3. Каким математическим звеном заменяется тиристорный преобразователь при инженерных расчетах и от чего зависит его эквивалентная постоянная времени TТП?

4. В чем заключается физический смысл и математическая суть настройки регулятора на «Технический оптимум»?

5. Почему в контуре тока применяется ПИ-регулятор, а не просто пропорциональный (П)? Какую роль играет форсирующее звено (Tip+1)?

6. Как наличие фильтра на датчике тока (Tф) влияет на выбор

постоянной интегрирования Ti регулятора?

7. (Инновационный блок): Какие проблемы возникают при переходе от непрерывного аналогового ПИ-регулятора к его цифровому аналогу в МП СУ? Как шаг дискретизации Td влияет на динамику и устойчивость контура тока?

8. Какие современные датчики тока (например, на эффекте Холла или Rogowski coils) применяются в инновационном оборудовании и каковы их преимущества перед традиционными шунтами или трансформаторами постоянного тока?

Практическое занятие №9

Расчет контура регулирования скорости в системе ТП-Д

Цель работы: Изучить структуру и принцип действия системы подчиненного регулирования координат (СПР) электропривода постоянного тока с тиристорным преобразователем (ТП-Д).

Освоить инженерную методику расчета параметров пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора скорости для настройки контура на симметричный оптимум.

Оценить влияние параметров регулятора и малой постоянной времени системы на динамические и статические характеристики электропривода.
Рассмотреть особенности современной цифровой реализации контуров регулирования в составе инновационного оборудования электроэнергетики (замена аналоговых тахогенераторов на энкодеры, использование DSP/FPGA-контроллеров).

Краткая теория

Система «Тиристорный преобразователь – Двигатель постоянного тока независимого возбуждения» (ТП-Д) является классическим объектом автоматизированного электропривода. Для управления такими системами наиболее эффективно применяется принцип подчиненного регулирования координат, при котором создаются вложенные контуры: внутренний контур

регулирует ток якоря, а внешний (медленный) контур регулирует скорость вращения вала.

Передаточная функция разомкнутого контура скорости с учетом настроенного и быстродействующего внутреннего контура тока может быть представлена как последовательное соединение ПИ-регулятора скорости, интегрирующего звена механической части и звена обратной связи:

$$W_{\text{раз}}(p) = W_{\text{рс}}(p) \cdot \frac{C_M}{J \cdot p} \cdot K_{\text{ос.с}}$$

где:

$W_{\text{рс}}(p) = \frac{K_{\text{рс}}(T_{\text{рс}}p+1)}{T_{\text{рс}}p}$ – передаточная функция ПИ-регулятора скорости;

CM – конструктивная постоянная двигателя по моменту (Н·м/А), численно равная постоянной по ЭДС в системе СИ;

J – суммарный момент инерции движущихся масс, приведенный к валу двигателя (кг·м²);

Kос.с – коэффициент обратной связи по скорости (В·с/рад);

$T\mu$ – суммарная малая постоянная времени контура (слагается из постоянной времени сглаживающего фильтра, задержки тиристорного преобразователя и эквивалентной постоянной времени замкнутого контура тока).

Для обеспечения оптимального быстродействия и подавления возмущений (например, наброса момента нагрузки) контур скорости настраивают на симметричный оптимум (СО). При такой настройке желаемая передаточная функция разомкнутой системы имеет вид:

$$W_{\text{жел}}(p) = \frac{4T_\mu p+1}{8T_\mu^2 p^2}$$

Приравнивая коэффициенты Wраз(p) и Wжел(p), получают расчетные формулы для настройки ПИ-регулятора скорости

Постоянная времени регулятора: Tрс=4·$T\mu$

Коэффициент усиления регулятора: Kрс=JCM·Kос.с·2·$T\mu$

Инновационный аспект: В современных системах вместо аналоговых

тахогенераторов (Kос.сос) применяются цифровые энкодеры и алгоритмы наблюдения скорости, что позволяет существенно уменьшить $T\mu$ (до 2–5 мс), повысить жесткость характеристик и реализовать адаптивные или нечеткие (fuzzy) регуляторы на базе микропроцессорной техники.

Задание для студентов

Исходные данные для расчета. Момент инерции привода, J=0.1 кг·м²;

Постоянная двигателя по моменту, CM=1.0 Н·м/А;

Коэффициент обратной связи по скорости (датчик-энкодер), Kос.с=0.05В·с/рад;

Суммарная малая постоянная времени контура, $T\mu$=0.01.

Необходимо рассчитать постоянную времени Tрс и коэффициент усиления Kрс ПИ-регулятора скорости для настройки контура на симметричный оптимум.

Записать передаточную функцию рассчитанного регулятора скорости Wрс(p).

Оценить, как изменится коэффициент усиления Kрс, если в рамках модернизации оборудования будет применен новый быстродействующий преобразователь, снижающий малую постоянную времени $T\mu$ до 0.005 с (при прочих равных условиях).

Сделать вывод о влиянии уменьшения $T\mu$ на быстродействие и перерегулирование системы при отработке скачка задающего воздействия.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается основной принцип подчиненного регулирования координат в электроприводе и почему контур скорости является внешним по отношению к контуру тока?

2. Какие типы регуляторов (П, ПИ, ПИД) применяются в контуре регулирования скорости системы ТП-Д и каково физическое назначение интегральной составляющей?

3. Что такое симметричный оптимум? Какие требования к переходному процессу (перерегулирование, время регулирования) он

обеспечивает?

4. Из каких составляющих складывается малая постоянная времени $T\mu$ в системе с тиристорным преобразователем?

5. Как изменится характер переходного процесса скорости при увеличении коэффициента усиления регулятора Kрс сверх расчетного значения, полученного по методике симметричного оптимума?

6. Какие инновационные технические решения (аппаратные и алгоритмические) позволяют в современных системах ТП-Д уменьшить задержки в контуре обратной связи по скорости и повысить точность регулирования?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инновационное развитие электроэнергетики на базе Smart Grid: монография / под ред. Ю.Н. Руденко. — М.: НИУ ВШЭ, 2013.

2. ГОСТ Р 72558–2026. Накопители электроэнергии. Общие технические требования.

3. РД 34.20.123-2024. Цифровые подстанции. Требования к проектированию.

4. МПК 61850 «Сети связи на подстанциях».

5. Энергетическая стратегия России на период до 2035 года (утв. Правительством РФ).