ЛЕКЦИЯ 5
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ТРАНСМИССИИ E-AXLE. ИНТЕГРАЦИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ, ИНВЕРТОРА И РЕДУКТОРА. УПРАВЛЕНИЕ ОДНО- И ДВУХСТУПЕНЧАТЫМИ РЕДУКТОРАМИ

Цель

Сформировать у обучающихся системное представление об электромеханических трансмиссиях типа e-Axle, их архитектуре, принципах интеграции электродвигателя, инвертора и редуктора в единый компактный узел. Рассмотреть особенности управления одно- и двухступенчатыми редукторами, а также методы повышения эффективности и динамических характеристик электромобилей на основе применения e-Axle.

Планируемые результаты

После изучения данной лекции обучающийся сможет:

- дать определение e-Axle и объяснить его роль в современных электромобилях;
- описать архитектуру и принципы интеграции компонентов в составе e-Axle;
- охарактеризовать преимущества и ограничения одно- и двухступенчатых редукторов;
- объяснить принципы управления переключением передач в двухступенчатом e-Axle;
- анализировать методы повышения эффективности e-Axle;
- оценивать влияние конструктивных параметров e-Axle на динамические и энергетические характеристики автомобиля.

Проблемный вопрос

Вопрос занятия. Традиционная архитектура электромобиля предполагает размещение электродвигателя, инвертора и редуктора как отдельных компонентов, соединённых проводами и механическими связями. Но что если объединить их в один компактный узел, разместив непосредственно вблизи колёс? Такое решение — e-Axle — обещает революцию в компоновке и эффективности. Однако интеграция трёх сложных систем в одном корпусе создаёт новые вызовы: как обеспечить охлаждение, как управлять переключением передач в ограниченном пространстве, как достичь требуемой надёжности? И главное — оправдывает ли выигрыш в компактности и массе те инженерные сложности, которые возникают при таком подходе?

1. Введение в электромеханические трансмиссии e-Axle

1.1. Что такое e-Axle?

E-Axle (Electric Axle) — это интегрированный электромеханический приводной узел для электромобилей и гибридных транспортных средств, который объединяет в едином корпусе три ключевых компонента силовой установки: **электродвигатель** (тяговый электромотор), **инвертор** (силовой преобразователь) и **редуктор** (передаточный механизм). Такая интеграция позволяет создать компактное, лёгкое и высокоэффективное решение, которое заменяет традиционную для автомобилей с двигателем внутреннего сгорания связку «двигатель — трансмиссия — ведущий мост».

Концепция e-Axle возникла как ответ на потребности электромобильной промышленности в снижении массогабаритных показателей, упрощении компоновки и повышении эффективности силовой установки. Вместо того чтобы размещать электродвигатель в моторном отсеке, инвертор — под капотом или в багажнике, а редуктор — в составе трансмиссии, все эти компоненты объединяются в один узел, который может быть установлен непосредственно на оси автомобиля.

Современные e-Axle могут иметь различные степени интеграции:

«3-в-1» — базовый уровень интеграции, объединяющий электродвигатель, инвертор и редуктор.

«8-в-1» — более высокая степень интеграции, включающая, помимо трёх основных компонентов, также DC/DC-преобразователь, блок управления батареей, блок распределения мощности, блок управления электродвигателем, блок управления трансмиссией и другие функции.

Чем выше степень интеграции, тем компактнее и легче становится узел, но тем сложнее становятся задачи охлаждения, электромагнитной совместимости и обслуживания.

1.2. Роль e-Axle в современных электромобилях

E-Axle играет ключевую роль в силовой установке электромобиля, выполняя следующие функции:

Преобразование электрической энергии в механическую. Инвертор преобразует постоянный ток от тяговой батареи в переменный ток, необходимый для питания электродвигателя. Электродвигатель преобразует электрическую энергию в механическую — вращающий момент.

Передача и преобразование крутящего момента. Редуктор увеличивает крутящий момент до требуемого уровня и передаёт его на колёса. В зависимости от конструкции редуктор может быть одноступенчатым (фиксированное передаточное отношение) или двухступенчатым (с возможностью переключения передач).

Рекуперация энергии. При торможении e-Axle работает в обратном направлении: кинетическая энергия автомобиля через колёса и редуктор передаётся на электродвигатель, который переходит в режим генератора, преобразуя механическую энергию в электрическую и заряжая батарею.

Управление тяговым усилием. E-Axle является исполнительным механизмом для систем управления тягой, стабилизации и Torque Vectoring.

В современных электромобилях e-Axle может устанавливаться на передней оси, на задней оси или на обеих осях одновременно (для полноприводных конфигураций). В гибридных автомобилях e-Axle часто используется на задней оси в дополнение к ДВС на передней, обеспечивая функцию электрического полного привода.

2. Архитектура и компоненты e-Axle

2.1. Электродвигатель

Электродвигатель является сердцем e-Axle. Именно он преобразует электрическую энергию в механическую, создавая крутящий момент, который через редуктор передаётся на колёса. В современных e-Axle используются преимущественно следующие типы электродвигателей:

Постоянно-возбуждённые синхронные двигатели с встроенными магнитами (IPMSM — Interior Permanent Magnet Synchronous Motor). Этот тип двигателей является наиболее распространённым в современных электромобилях. В двигателях IPMSM постоянные магниты встроены в ротор, что обеспечивает высокую удельную мощность, высокий КПД в широком диапазоне скоростей и хорошие перегрузочные способности. В проекте FITGEN (Functionally Integrated E-axle) используется новейшая синхронная машина с встроенными постоянными магнитами.

Синхронные двигатели с постоянными магнитами на поверхности (SPMSM — Surface Permanent Magnet Synchronous Motor). Этот тип двигателей имеет магниты, закреплённые на поверхности ротора. Они обеспечивают высокий КПД, но имеют ограничения по максимальной скорости из-за механических напряжений в магнитах.

Асинхронные двигатели (IM — Induction Motor). В асинхронных двигателях ротор не имеет постоянных магнитов, а наводится электромагнитным полем статора. Они дешевле в производстве и более надёжны при высоких температурах, но имеют более низкий КПД и удельную мощность по сравнению с синхронными двигателями.

Электродвигатели с возбуждением от обмоток (WRSM — Wound Rotor Synchronous Motor). В этом типе двигателей ротор имеет обмотку возбуждения, питаемую через контактные кольца. Это позволяет регулировать магнитный поток, но увеличивает сложность и снижает надёжность.

Основные характеристики электродвигателя e-Axle, влияющие на его работу:

Номинальная и пиковая мощность. Определяет тяговые характеристики автомобиля. В проекте FITGEN мощность e-Axle составляет 70–100 кВт.

Номинальная и максимальная частота вращения. Высокоскоростные двигатели позволяют уменьшить размеры и массу, но требуют более

высоких передаточных отношений редуктора и более совершенных систем охлаждения.

КПД. Современные электродвигатели для e-Axle достигают КПД 94–97% в рабочем диапазоне.

Массогабаритные показатели. Удельная мощность (кВт/кг) является ключевым параметром. Проект FITGEN демонстрирует увеличение удельной мощности электродвигателя на 40%.

2.2. Инвертор

Инвертор является «мозгом» e-Axle, управляющим работой электродвигателя. Он преобразует постоянный ток (DC) от тяговой батареи в переменный ток (AC) для питания электродвигателя и, наоборот, при рекуперации преобразует переменный ток от электродвигателя в постоянный для зарядки батареи.

Основные компоненты инвертора:

Силовые ключи. Это полупроводниковые приборы, которые коммутируют ток с высокой частотой. В современных инверторах используются:

- **IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor).** Традиционный тип силовых ключей, широко применяемый в автомобильных инверторах. Обеспечивает хорошее сочетание характеристик и стоимости.
- **SiC MOSFET (Silicon Carbide Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor).** Карбидкремниевые транзисторы являются более современным решением. Они обеспечивают более высокий КПД (до 99% и выше), меньшие потери при переключении, возможность работы при более высоких температурах и напряжениях. В проекте FITGEN используется SiC-инвертор.

Система управления (контроллер). Генерирует ШИМ-сигналы для управления силовыми ключами в соответствии с требуемым режимом работы электродвигателя (скорость, момент). Современные контроллеры используют сложные алгоритмы векторного управления (полеориентированное управление, FOC) для достижения максимальной эффективности.

Конденсаторы DC-звена. Сглаживают пульсации напряжения на входе инвертора, обеспечивая стабильное питание силовых ключей.

Система охлаждения. Инвертор выделяет значительное количество тепла, особенно при высоких нагрузках. Для отвода тепла используются жидкостное охлаждение (обычно с использованием той же системы, что и для двигателя) или специальные радиаторы.

Характеристики инвертора, влияющие на работу e-Axle:

- **КПД.** Современные SiC-инверторы достигают КПД 99% и более, что минимизирует потери.
- **Напряжение питания.** Современные e-Axle работают при напряжениях 400 В и 800 В. Переход на 800 В позволяет снизить токи и, следовательно, уменьшить потери и массу проводки, но требует более совершенных компонентов.
- **Частота ШИМ.** Более высокая частота позволяет снизить уровень шума и вибраций, но увеличивает потери в силовых ключах.

– **Пиковая мощность.** Определяет максимальную мощность, которую инвертор может передать на электродвигатель. В проекте FITGEN инвертор обеспечивает мощность 70–100 кВт, причём удельная мощность инвертора увеличена на 50%.

2.3. Редуктор

Редуктор является механической частью e-Axle, передающей и преобразующей крутящий момент от электродвигателя к колёсам. Основная функция редуктора — **увеличение крутящего момента** и **снижение частоты вращения** до значений, оптимальных для движения автомобиля.

Основные компоненты редуктора:

Входной вал. Соединяется с валом электродвигателя через муфту или непосредственно.

Система шестерён. Обеспечивает передачу и преобразование крутящего момента. В зависимости от конструкции может включать одну или несколько пар шестерён (одноступенчатый или двухступенчатый редуктор).

Дифференциал. Распределяет крутящий момент между левым и правым колёсами, позволяя им вращаться с разной скоростью при повороте.

Выходные валы. Соединяются с полуосями колёс.

Система смазки. Обеспечивает смазку шестерён и подшипников, отвод тепла. В современных e-Axle используется масляное охлаждение с принудительной циркуляцией.

Корпус. Обеспечивает герметичность и жёсткость конструкции, служит для крепления всех компонентов.

Основные характеристики редуктора e-Axle:

Передаточное отношение. Определяет, во сколько раз увеличивается крутящий момент и снижается частота вращения. Для одноступенчатых редукторов типичные значения — от 8:1 до 12:1. Для двухступенчатых редукторов передаточное отношение может изменяться в зависимости от выбранной передачи.

КПД. Современные редукторы для e-Axle имеют КПД 97–98,5%. Потери возникают в основном из-за трения в шестернях и подшипниках, а также из-за перемешивания масла.

Шум, вибрации и жёсткость (NVH — Noise, Vibration, Harshness). Редуктор является одним из основных источников шума и вибраций в электромобиле. Оптимизация геометрии зубьев шестерён, выбор материалов и конструктивные решения позволяют снизить уровень NVH.

Масса и габариты. Компактность редуктора критична для возможности размещения e-Axle в ограниченном пространстве подвески.

2.4. Интеграция компонентов

Интеграция электродвигателя, инвертора и редуктора в единый узел e-Axle — это сложная инженерная задача, требующая решения множества проблем:

Компоновка. Все три компонента должны быть размещены в минимальном объёме с учётом ограничений по размерам и форме. Существуют различные варианты компоновки: соосная (все компоненты на одной оси), параллельно-осевая (оси смещены) и другие.

Охлаждение. Три компонента выделяют тепло, которое необходимо отводить. В проекте FITGEN используется двухконтурная система охлаждения: масляное охлаждение для двигателя и редуктора и жидкостное охлаждение для инвертора. Уникальная масляная структура охлаждения, такая как двухстороннее масляное охлаждение или 2Way-масляный цикл, позволяет подавать охлаждающее масло непосредственно на нагревающиеся участки, повышая эффективность охлаждения.

Электромагнитная совместимость (ЭМС). Инвертор генерирует мощные электромагнитные помехи, которые могут влиять на работу электродвигателя и других электронных систем. Необходимо экранирование, фильтрация и правильная компоновка.

Соединения. Требуются надёжные электрические соединения между инвертором и электродвигателем (высоковольтные кабели), а также механические соединения между электродвигателем и редуктором.

Управление. Необходима интеграция систем управления: блок управления электродвигателем (MCU), блок управления трансмиссией (TCU) и, возможно, блок управления батареей (BMS) должны быть согласованы.

Обслуживание. Интеграция усложняет доступ к отдельным компонентам для обслуживания и ремонта. Выход из строя одного компонента может потребовать замены всего узла.

Несмотря на эти сложности, интеграция даёт значительные преимущества: уменьшение массы и габаритов, сокращение количества соединительных проводов и шлангов, повышение надёжности за счёт уменьшения количества соединений, упрощение монтажа на автомобиле.

3. Одноступенчатые редукторы

3.1. Принцип работы и конструкция

Одноступенчатый редуктор — это наиболее простая и распространённая конструкция редуктора для e-Axle. Он состоит из одной пары шестерён: ведущей (малой) и ведомой (большой). Вращение от электродвигателя передаётся на ведущую шестерню, которая вращает ведомую шестерню, соединённую с дифференциалом и выходными валами.

Преимущества одноступенчатого редуктора:

– **Простота конструкции.** Минимальное количество деталей, что снижает стоимость, массу и повышает надёжность.

– **Высокий КПД.** Минимальные потери на трение, так как всего одна пара шестерён.

– **Низкий уровень шума и вибраций.** Простая кинематическая схема генерирует меньше шума.

– **Компактность.** Одноступенчатый редуктор занимает меньше места, чем двухступенчатый.

Недостатки одноступенчатого редуктора:

– **Фиксированное передаточное отношение.** Невозможность выбора оптимального режима для различных условий движения (город, трасса).

– **Компромиссный выбор передаточного отношения.** Передаточное отношение выбирается как компромисс между динамикой разгона и максимальной скоростью. Слишком большое передаточное отношение даёт хорошую динамику, но ограничивает максимальную скорость; слишком малое — обеспечивает высокую скорость, но ухудшает динамику разгона.

– **Ограниченная эффективность в широком диапазоне скоростей.** Электродвигатель должен работать во всём диапазоне скоростей, что не всегда оптимально с точки зрения КПД.

Несмотря на недостатки, одноступенчатые редукторы широко применяются в электромобилях городского сегмента, где требования к максимальной скорости невысоки, а простота и надёжность имеют первостепенное значение.

3.2. Управление одноступенчатым редуктором

Управление одноступенчатым редуктором относительно простое, так как нет переключения передач. Основные задачи управления:

Регулирование крутящего момента электродвигателя. Инвертор управляет электродвигателем, обеспечивая требуемый крутящий момент в зависимости от положения педали акселератора, скорости и других факторов. Это осуществляется через векторное управление (полеориентированное управление).

Регулирование скорости электродвигателя. Электродвигатель может вращаться в широком диапазоне скоростей (от 0 до 15000–20000 об/мин и выше). Управление скоростью осуществляется через регулирование частоты и амплитуды напряжения, подаваемого инвертором.

Рекуперативное торможение. При торможении инвертор переключает электродвигатель в режим генератора, обеспечивая замедление и зарядку батареи.

Хотя управление одноступенчатым редуктором проще, чем двухступенчатым, оно требует высокой точности и быстродействия для обеспечения плавности хода и эффективности.

4. Двухступенчатые редукторы

4.1. Принцип работы и конструкция

Двухступенчатый редуктор имеет две пары шестерён, что позволяет реализовать два передаточных отношения. Переключение между передачами осуществляется с помощью муфт или синхронизаторов. В электромобилях для переключения передач часто используются электромеханические или электрогидравлические приводы.

Конструктивные варианты двухступенчатых редукторов:

С двумя параллельными валами. Одна пара шестерён обеспечивает первую передачу, другая — вторую. Переключение осуществляется перемещением муфты между шестернями.

С планетарным механизмом. Планетарный механизм позволяет реализовать два передаточных отношения с более компактной конструкцией.

С двойным сцеплением (DCT-подобный). Используется два сцепления и два входных вала, что позволяет переключать передачи без разрыва потока мощности.

В двухступенчатом e-Axle от компании Schaeffler используется двухскоростная трансмиссия с коаксиальной или параллельно-осевой компоновкой. Двухступенчатый редуктор также может быть частью более сложной гибридной трансмиссии, где требуется переключение между режимами работы.

Преимущества двухступенчатого редуктора:

- **Оптимизация режимов работы электродвигателя.** Возможность выбора передачи позволяет поддерживать электродвигатель в зоне максимального КПД в более широком диапазоне скоростей.
- **Улучшение динамических характеристик.** Первая передача с большим передаточным отношением обеспечивает высокий крутящий момент на колёсах при разгоне.
- **Увеличение максимальной скорости.** Вторая передача с меньшим передаточным отношением позволяет достичь более высокой максимальной скорости.
- **Снижение энергопотребления.** Оптимизация режимов работы электродвигателя позволяет снизить расход энергии на заданном ездовом цикле.

Недостатки двухступенчатого редуктора:

- **Увеличение массы и габаритов.** Дополнительные шестерни, валы, муфты и приводы увеличивают массу и размеры.
- **Увеличение стоимости.** Более сложная конструкция требует больше деталей и более сложного производства.
- **Потери на трение.** Дополнительные шестерни и подшипники увеличивают потери на трение, что может снизить общий КПД.
- **Сложность управления.** Требуется управление переключением передач, синхронизация с работой электродвигателя.

– **Рывки при переключении.** Неправильное управление переключением может привести к рывкам и дискомфорту.

– **Повышенный уровень шума.** Дополнительные шестерни могут создавать дополнительный шум.

4.2. Управление двухступенчатым редуктором

Управление двухступенчатым редуктором значительно сложнее, чем одноступенчатым. Оно включает следующие задачи:

Определение момента переключения передачи. Система управления должна определить оптимальный момент переключения передачи на основе текущих условий движения: скорость, нагрузка, положение педали акселератора, состояние батареи. Для этого используются карты переключения передач (shift maps), разрабатываемые на основе испытаний и оптимизации.

Управление процессом переключения. Переключение передачи должно быть выполнено плавно и без разрыва потока мощности. Для этого используются различные стратегии:

– **Переключение с прерыванием потока мощности.** Электродвигатель временно отключается, муфта переключается, затем электродвигатель снова подключается. Этот метод проще, но может вызывать рывки.

– **Переключение без прерывания потока мощности (бесступенчатое).** Включает управление крутящим моментом электродвигателя для компенсации изменения передаточного отношения. Этот метод сложнее, но обеспечивает более высокий комфорт.

Синхронизация скоростей. При переключении необходимо синхронизировать скорости вращения валов для плавного включения муфты. Для этого используется управление скоростью электродвигателя.

Управление муфтами. В зависимости от конструкции используются электромеханические или электрогидравлические приводы для управления муфтами. Необходимо точное управление усилием и временем срабатывания.

Диагностика. Система управления должна контролировать состояние редуктора, выявлять неисправности (износ шестерён, проблемы с муфтами, недостаток масла) и принимать соответствующие меры.

Современные исследования направлены на создание алгоритмов бесшовного переключения передач в двухступенчатых e-Axle. Предлагаются различные решения, включая использование датчиков крутящего момента и многофункциональных переключающих устройств с одним электрическим актуатором для уменьшения габаритов.

4.3. Оптимизация карт переключения передач

Карты переключения передач (shift maps) являются ключевым элементом управления двухступенчатым редуктором. Они определяют, при каких условиях (скорость, нагрузка) происходит переключение с первой на вторую передачу и обратно.

Традиционный подход. Карты переключения разрабатываются на основе испытаний и инженерного опыта. Они учитывают характеристики электродвигателя, редуктора и автомобиля.

Оптимизационный подход. С развитием методов машинного обучения и оптимизации карты переключения могут быть оптимизированы для минимизации расхода энергии или максимизации динамических характеристик. В работе, посвящённой оптимизации карт переключения для 9-тонного модульного e-Axle для внедорожных тяжёлых автомобилей, анализируются данные о потерях мощности инвертора и двигателя, что позволяет построить карты потерь и эффективности компонентов.

Адаптивный подход. Карты переключения могут адаптироваться к стилю вождения, условиям дороги и состоянию батареи. Например, при спортивном стиле вождения переключения могут происходить при более высоких оборотах для обеспечения максимальной динамики.

5. Управление e-Axle: интеллектуальные подходы

5.1. Модельное прогнозирующее управление (MPC)

Модельное прогнозирующее управление (Model Predictive Control, MPC) является одним из наиболее перспективных подходов к управлению e-Axle. MPC использует модель системы для прогнозирования её будущего поведения и выбора оптимальных управляющих воздействий.

В контексте e-Axle MPC может использоваться для:

- **Оптимального распределения крутящего момента** между несколькими e-Axle (например, на передней и задней осях).
- **Управления переключением передач** для минимизации энергопотребления и обеспечения плавности.
- **Координации работы e-Axle с гидравлической тормозной системой** при рекуперативном торможении.

В работе, посвящённой оптимальному распределению крутящего момента для e-Axle на основе последовательного квадратичного программирования (SQP), показано снижение потерь энергии на e-Axle на 6,15%.

5.2. Машинное обучение

Методы машинного обучения находят всё более широкое применение в управлении e-Axle:

Прогнозирование. Нейронные сети могут прогнозировать будущие нагрузки и условия движения, что позволяет оптимизировать управление.

Оптимизация параметров. Машинное обучение может использоваться для оптимизации карт переключения передач и других параметров управления.

Адаптация. Системы машинного обучения могут адаптировать управление к стилю вождения и состоянию компонентов.

В работе по многодоменной кооптимизации для электрифицированных тяжёлых автомобилей используется машинное обучение для создания модульной и высокоинтегрированной системы e-Axle с двойной конфигурацией синхронных машин с постоянными магнитами.

5.3. Управление вектором скорости (Speed Vectoring)

В транспортных средствах с несколькими e-Axle (например, полноприводных электромобилях) возможно управление вектором скорости — распределение крутящего момента между осями для улучшения управляемости и устойчивости.

Алгоритмы управления вектором скорости являются ключевым элементом блока управления трансмиссией (DCU). Они позволяют реализовать такие функции, как:

- **Улучшение управляемости в поворотах.** Распределение момента между осями для создания корректирующего момента.
- **Повышение устойчивости на скользком покрытии.** Перераспределение момента на ось с лучшим сцеплением.
- **Оптимизация энергопотребления.** Распределение момента между осями для минимизации потерь.

6. Тепловой менеджмент e-Axle

Одной из ключевых проблем при интеграции компонентов e-Axle является отвод тепла. Электродвигатель, инвертор и редуктор выделяют значительное количество тепла, которое необходимо эффективно отводить для обеспечения надёжности и долговечности.

Источники тепла:

- **Электродвигатель.** Потери в обмотках (джоулево тепло), потери в стали (гистерезис и вихревые токи), механические потери.
- **Инвертор.** Потери при переключении силовых ключей, потери проводимости.
- **Редуктор.** Потери на трение в шестернях и подшипниках, потери на перемешивание масла.

Методы охлаждения:

- **Масляное охлаждение.** Масло циркулирует внутри e-Axle, отводя тепло от двигателя и редуктора. Уникальная масляная структура охлаждения, такая как двухстороннее масляное охлаждение или 2Way-масляный цикл, позволяет подавать охлаждающее масло непосредственно на нагревающиеся участки.
- **Жидкостное охлаждение.** Охлаждающая жидкость (антифриз) циркулирует через рубашку охлаждения корпуса, отводя тепло от инвертора и, возможно, от двигателя.
- **Воздушное охлаждение.** Используется для менее нагруженных компонентов или в качестве дополнительного охлаждения.

Управление тепловыми режимами:

Современные системы управления e-Axle включают управление тепловыми режимами. Это позволяет:

- **Оптимизировать производительность.** Поддержание оптимальной температуры компонентов обеспечивает максимальный КПД и мощность.
- **Защитить компоненты от перегрева.** При превышении допустимой температуры система снижает мощность или переходит в аварийный режим.
- **Снизить энергопотребление.** Управление насосами и вентиляторами системы охлаждения позволяет минимизировать энергопотребление.

7. Перспективы развития e-Axle

Технология e-Axle активно развивается, и можно выделить несколько ключевых направлений:

Повышение степени интеграции. Переход от «3-в-1» к «8-в-1» и более высоким уровням интеграции позволит дальнейшее уменьшение массы и габаритов, упрощение компоновки и снижение стоимости.

Повышение напряжения. Переход с 400 В на 800 В и выше позволит снизить токи, уменьшить потери и массу проводки, а также сократить время зарядки.

Применение новых материалов. Использование карбида кремния (SiC) в инверторах, новых магнитных материалов в двигателях, лёгких сплавов и композитов в корпусе позволит повысить КПД и снизить массу.

Развитие многомоторных конфигураций. Использование двух электродвигателей в одном e-Axle (dual-motor e-Axle) позволяет реализовать Torque Vectoring без использования дифференциала, а также оптимизировать режимы работы каждого двигателя.

Интеллектуальное управление. Применение методов машинного обучения, MPC и других интеллектуальных алгоритмов позволит further повысить эффективность, динамику и безопасность e-Axle.

Улучшение NVH-характеристик. Оптимизация геометрии зубьев шестерён, выбор материалов, совершенствование системы смазки и демпфирования позволят снизить шум и вибрации.

8. Закрепление и завершение

8.1. Мини-тест

1. Что такое e-Axle и какие три основных компонента он объединяет?
2. Каковы преимущества одноступенчатого редуктора перед двухступенчатым?
3. Каковы основные недостатки двухступенчатого редуктора?

4. Какие методы используются для управления переключением передач в двухступенчатом e-Axle?

5. Почему тепловой менеджмент является критической проблемой для e-Axle?

8.2. Эталонные краткие ответы

1. **E-Axle** — это интегрированный электромеханический приводной узел, объединяющий в едином корпусе **электродвигатель**, **инвертор** и **редуктор**. Такая интеграция позволяет создать компактное, лёгкое и высокоэффективное решение для электромобилей.

2. **Преимущества одноступенчатого редуктора:** простота конструкции, высокий КПД, низкий уровень шума и вибраций, компактность, низкая стоимость.

3. **Основные недостатки двухступенчатого редуктора:** увеличение массы и габаритов, увеличение стоимости, потери на трение в дополнительных шестернях, сложность управления, возможные рывки при переключении, повышенный уровень шума.

4. Для управления переключением передач в двухступенчатом e-Axle используются: **карты переключения передач** (определяют момент переключения), **управление процессом переключения** (с прерыванием или без прерывания потока мощности), **синхронизация скоростей** валов, **управление муфтами** (электромеханическими или электрогидравлическими приводами).

5. **Тепловой менеджмент** критичен для e-Axle, потому что три компонента (электродвигатель, инвертор, редуктор) выделяют значительное количество тепла в ограниченном объёме. Перегрев может привести к снижению КПД, ограничению мощности, повреждению компонентов и сокращению срока службы.

8.3. Итоговые положения

E-Axle — это интегрированный приводной узел, объединяющий электродвигатель, инвертор и редуктор. Он является ключевым компонентом современных электромобилей, обеспечивая компактность, лёгкость и высокую эффективность.

Интеграция компонентов в едином корпусе решает проблемы компоновки, но создаёт новые вызовы: охлаждение, электромагнитная совместимость, управление и обслуживание.

Одноступенчатые редукторы просты, надёжны и эффективны, но имеют фиксированное передаточное отношение, что ограничивает возможности оптимизации режимов работы.

Двухступенчатые редукторы позволяют выбирать оптимальное передаточное отношение для различных условий движения, улучшая динамику и эффективность, но увеличивают массу, стоимость и сложность управления.

Управление двухступенчатым редуктором включает определение момента переключения, управление процессом переключения, синхронизацию

скоростей и управление муфтами. Для оптимизации используются карты переключения и методы машинного обучения.

Интеллектуальные подходы к управлению e-Axle включают модельное прогнозирующее управление (MPC), машинное обучение и управление вектором скорости.

Тепловой менеджмент является критической проблемой для e-Axle. Используются масляное и жидкостное охлаждение с управлением тепловыми режимами.

Перспективы развития e-Axle связаны с повышением степени интеграции, переходом на более высокое напряжение, применением новых материалов (SiC), развитием многомоторных конфигураций и интеллектуальных алгоритмов управления.

Задание после лекции

Выберите один из аспектов технологии e-Axle (конструкция одноступенчатого редуктора, конструкция двухступенчатого редуктора, система охлаждения, интеллектуальное управление) и подготовьте аналитический обзор (2–3 страницы), в котором:

1. Опишите выбранный аспект и его роль в e-Axle.
2. Приведите схему или описание конструкции.
3. Проанализируйте преимущества и ограничения.
4. Опишите современные тенденции развития в этой области.
5. Приведите примеры конкретных реализаций от известных производителей.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение e-Axle. Какие компоненты он объединяет?
2. Каковы основные преимущества интегрированного e-Axle по сравнению с раздельной компоновкой?
3. Какие типы электродвигателей используются в e-Axle?
4. Какую роль выполняет инвертор в составе e-Axle?
5. В чём отличие IGBT-инвертора от SiC-инвертора?
6. Каковы основные функции редуктора в составе e-Axle?
7. Каковы преимущества и недостатки одноступенчатого редуктора?
8. Каковы преимущества и недостатки двухступенчатого редуктора?
9. Как определяется момент переключения передачи в двухступенчатом редукторе?
10. Какие стратегии используются для плавного переключения передач?
11. Какие методы используются для управления муфтами в двухступенчатом редукторе?

12. Что такое карты переключения передач (shift maps) и как они разрабатываются?

13. Как машинное обучение может быть использовано для оптимизации управления e-Axle?

14. Что такое модельное прогнозирующее управление (MPC) и как оно применяется к e-Axle?

15. Какова роль e-Axle в системах Torque Vectoring?

16. Каковы основные источники тепла в e-Axle?

17. Какие методы охлаждения используются в e-Axle?

18. Почему тепловой менеджмент является критической проблемой для e-Axle?

19. Каковы перспективы развития технологии e-Axle?

20. Каковы основные вызовы при проектировании и производстве e-Axle?

Список рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Robert Bosch GmbH. Automotive Handbook. 11th ed. — Chichester: Wiley, 2022. — 2047 p. — ISBN 978-1-119-91190-6.

2. Ulsoy A. G., Peng H., Çakmakcı M. Automotive Control Systems. — Cambridge: Cambridge University Press, 2012. — 407 p. — ISBN 978-1-107-68604-5. — DOI: 10.1017/CBO9780511844577.

3. Rajamani R. Vehicle Dynamics and Control. 2nd ed. — New York: Springer, 2012. — 496 p. — ISBN 978-1-4614-1432-2. — DOI: 10.1007/978-1-4614-1433-9.

4. Liu W. Hybrid Electric Vehicle System Modeling and Control. 2nd ed. — Hoboken: Wiley, 2017. — 576 p. — ISBN 978-1-119-27932-7.

5. Mi C., Masrur M. A., Gao D. W. Hybrid Electric Vehicles: Principles and Applications with Practical Perspectives. 2nd ed. — Hoboken: Wiley, 2018. — 608 p. — ISBN 978-1-119-26065-3.

Дополнительная литература

6. Zhang Y., Mi C. Automotive Power Transmission Systems. — Hoboken: Wiley, 2018. — 384 p. — ISBN 978-1-119-36482-5.

7. Zhu G. G. Design and Control of Automotive Propulsion Systems. — Boca Raton: CRC Press, 2015. — 302 p. — ISBN 978-1-138-74866-8.

8. Brandstätter B., Steiner A., eds. Next Generation Electrified Vehicles Optimised for the Infrastructure. — Cham: Springer, 2024. — ISBN 978-3-031-47259-6. (Включает главу «Modelling and Control Solution of an E-axle for Third-Generation Electric Vehicles»).

9. E-Axle — 驱动电机系统 [Электронный ресурс]. — Baidu Baike, 2026. — Режим доступа: https://baike.baidu.com[reference:61].

10. Valeo Inaugurates New Electric Powertrain Manufacturing Line in Pune [Электронный ресурс]. — Valeo, 2026. — Режим доступа: https://www.valeo.com[reference:62].
11. FITGEN — Functionally Integrated E-axle Ready for Mass Market Third GENeration Electric Vehicles [Электронный ресурс]. — CORDIS, European Commission, 2025. — Режим доступа: https://cordis.europa.eu[reference:63].
12. Seamless Shifting in 2-Speed eAxle Integrated with Torque Sensor and Multifunctional Shifting Device [Электронный ресурс]. — Society of Automotive Engineers of Japan (JSAE). — Режим доступа: https://tech.jsae.or.jp[reference:64].
13. Optimal Torque Allocation for Energy Efficient Operation of Dual E-Axle Based Powertrain for Heavy Duty Electric Vehicles [Электронный ресурс]. — IEEE Xplore, 2025. — DOI: 10.1109/XXXXX.
14. Machine-learning integrated multi-domain Co-optimization for electrified heavy duty fleets [Электронный ресурс]. — TRID, 2025.
15. An Efficiency Optimized Gear-Shift Map to Maximise the Performance of a Modular E-Axle [Электронный ресурс]. — Semantic Scholar, 2024.
16. Speed Vectoring Algorithms for Drivelines with Multiple Modular E-Axles [Электронный ресурс]. — IEEE Xplore, 2024.
17. A Design-Oriented Scoping Review of Electric-Vehicle Gearbox Technologies: Architectures, Gear Ratio Selection, Efficiency, NVH, and Reliability [Электронный ресурс]. — MDPI, 2026.

Электронные ресурсы

18. SAE International. SAE Technical Papers Database. — Режим доступа: https://www.sae.org/publications/technical-papers.
19. SpringerLink. Electronic Collection of Scientific and Educational Literature. — Режим доступа: https://link.springer.com.
20. IEEE Xplore. Scientific and Technical Publications Database. — Режим доступа: https://ieeexplore.ieee.org.