ЛЕКЦИЯ 3
АРХИТЕКТУРА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСМИССИЯМИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ И ГИБРИДОВ

Цель

Сформировать у обучающихся системное представление об архитектуре интеллектуальных систем управления трансмиссиями электромобилей и гибридных транспортных средств. Рассмотреть состав и принципы взаимодействия датчиков, электронных блоков управления, бортовых вычислителей и исполнительных устройств. Изучить уровни управления, информационные потоки и архитектурные решения, применяемые в современных системах управления трансмиссией.

Планируемые результаты

После изучения данной лекции обучающийся сможет:

- описать обобщённую архитектуру интеллектуальной системы управления трансмиссией;
- охарактеризовать основные компоненты системы: датчики, контроллеры, исполнительные устройства;
- объяснить принципы взаимодействия компонентов в распределённой системе управления;
- описать уровни управления и их функции;
- характеризовать информационные потоки в системе управления трансмиссией;
- анализировать архитектурные решения на примере конкретных систем.

Проблемный вопрос

Вопрос занятия. Трансмиссия современного электромобиля или гибрида — это не просто механический узел, передающий крутящий момент. Это сложная киберфизическая система, в которой механические, электрические, гидравлические и электронные компоненты тесно интегрированы. Как организовать управление такой системой, чтобы обеспечить эффективность, надёжность и безопасность? И как распределить функции между многочисленными электронными блоками, чтобы система оставалась управляемой и отказоустойчивой?

1. Введение в архитектуру систем управления трансмиссией

Архитектура системы управления — это фундаментальная организационная структура, определяющая, как компоненты системы взаимодействуют друг с другом для достижения поставленных целей. В контексте интеллектуальных систем управления трансмиссиями электромобилей и гибридных автомобилей архитектура охватывает аппаратные средства (датчики, электронные блоки, исполнительные механизмы, сети передачи данных), программное

обеспечение (алгоритмы управления, операционные системы, протоколы обмена) и организационные аспекты (распределение функций, уровни управления, информационные потоки).

Трансмиссия современного электромобиля или гибридного автомобиля — это сложная система, включающая:

- **Силовые компоненты:** электродвигатели, двигатель внутреннего сгорания (для гибридов), редукторы, дифференциалы, карданные валы.
- **Управляющие компоненты:** инверторы, блоки управления двигателем, блоки управления трансмиссией, блоки управления батареей.
- **Вспомогательные системы:** системы охлаждения, системы смазки, гидравлические системы управления муфтами.
- **Сети передачи данных:** CAN, CAN FD, FlexRay, Automotive Ethernet.

Управление такой системой требует координации множества процессов: регулирование крутящего момента электродвигателя, переключение режимов работы (EV/Hybrid), управление фрикционными муфтами, распределение крутящего момента между колёсами, рекуперативное торможение, тепловой менеджмент. Все эти процессы должны выполняться согласованно и с гарантированным временем реакции.

В современных гибридных трансмиссиях, например, в системах DHT (Dedicated Hybrid Transmission), управление включает гидравлический контроль, управление переключением гибридных режимов, управление переключением передач, управление двумя электродвигателями, а также тепловой менеджмент муфт и электродвигателей. Гибридный режим обычно разделяется на четыре режима: EV-режим, последовательный режим, параллельный режим и режим запуска.

2. Обобщённая архитектура интеллектуальной системы управления

2.1. Иерархическая структура управления

Интеллектуальная система управления трансмиссией обычно организуется по иерархическому принципу, который позволяет разделить сложную задачу управления на более простые подзадачи. Выделяют три основных уровня управления:

Верхний уровень — стратегическое управление. На этом уровне принимаются решения о глобальной стратегии работы трансмиссии. Определяется, в каком режиме должна работать силовая установка (EV, последовательный гибрид, параллельный гибрид), как распределять энергию между двигателем внутреннего сгорания и электродвигателем, как планировать использование энергии на маршруте. Здесь активно используются методы искусственного интеллекта: нейронные сети для прогнозирования, нечёткая логика для принятия решений, обучение с подкреплением для оптимизации стратегий.

Верхний уровень управления часто реализуется в **гибридном управляющем модуле (HCP — Hybrid Control Module)**, который обеспечивает общее

управление и координацию работы всех компонентов гибридной силовой установки. HCP координирует работу блока управления двигателем (ECM), блока управления трансмиссией (TCM), блока управления инвертором тягового привода (TPIM) и блока управления батареей (BPCM). Такая архитектура с центральным координатором позволяет обеспечить согласованную работу всех подсистем.

Средний уровень — тактическое управление. На этом уровне стратегические решения конкретизируются в виде управляющих воздействий: требуемый крутящий момент электродвигателя, момент переключения передачи, интенсивность рекуперации, давление в гидравлической системе управления муфтами. Здесь применяются методы оптимизации, модельное прогнозирующее управление, нейросетевые контроллеры.

Тактическое управление распределяется между специализированными блоками: **TCM (Transmission Control Module)** отвечает за управление трансмиссией, **TPIM (Traction Power Inverter Module)** — за управление электродвигателем через инвертор, **BPCM (Battery Pack Control Module)** — за управление тяговой батареей.

Нижний уровень — исполнительное управление. Непосредственное управление исполнительными механизмами: инвертором, муфтами, тормозными механизмами, гидравлическими клапанами. Здесь доминируют классические методы управления (PID-регуляторы, векторное управление), но всё чаще применяются нейросетевые контроллеры для повышения точности и адаптивности.

2.2. Распределённая архитектура управления

В распределённой архитектуре управления каждый компонент системы имеет свой собственный блок управления, который автономно решает свои задачи, но обменивается информацией с другими блоками через бортовые сети.

Для гибридных трансмиссий характерна распределённая архитектура, включающая:

- **ECM (Engine Control Module)** — блок управления двигателем внутреннего сгорания. Управляет работой ДВС: впрыском топлива, зажиганием, дроссельной заслонкой.
- **TCM (Transmission Control Module)** — блок управления трансмиссией. Управляет переключением передач, работой муфт, распределением крутящего момента.
- **TPIM (Traction Power Inverter Module)** — блок управления инвертором тягового привода. Преобразует постоянный ток от батареи в переменный для питания электродвигателя и управляет электродвигателем.
- **BPCM (Battery Pack Control Module)** — блок управления батареей. Контролирует состояние батареи (SOC, SOH, температуру), управляет зарядом и разрядом.
- **HCP (Hybrid Control Module)** — гибридный управляющий модуль. Обеспечивает общее управление и координацию работы всех вышеперечисленных блоков.

Такая распределённая архитектура имеет ряд преимуществ: модульность (каждый блок можно разрабатывать и заменять независимо), отказоустойчивость (отказ одного блока не обязательно приводит к отказу всей системы), масштабируемость (можно добавлять новые блоки для новых функций). Однако она требует надёжной сети передачи данных и чёткого распределения функций.

2.3. Интеграция интеллектуальных алгоритмов

Ключевая особенность современных систем управления трансмиссией — интеграция методов искусственного интеллекта на всех уровнях управления.

На стратегическом уровне искусственный интеллект используется для прогнозирования оптимальных режимов работы. Например, нейронные сети могут прогнозировать профиль маршрута и на этой основе планировать использование энергии. Алгоритмы обучения с подкреплением могут оптимизировать стратегию переключения режимов, минимизируя расход энергии и обеспечивая комфорт.

На тактическом уровне искусственный интеллект применяется для адаптивного управления. Нейросетевые контроллеры могут адаптироваться к изменяющимся условиям эксплуатации, стилю вождения, состоянию дороги. Нечёткая логика позволяет принимать решения в условиях неопределённости, когда точная математическая модель недоступна.

На исполнительном уровне искусственный интеллект используется для точного управления исполнительными механизмами. Например, нейронные сети могут компенсировать нелинейности и гистерезис в гидравлических системах управления муфтами.

3. Компоненты системы управления

3.1. Датчики

Датчики являются «органами чувств» системы управления. Они преобразуют физические параметры в электрические сигналы, которые затем обрабатываются электронными блоками управления.

Датчики положения и скорости:

- **Датчик положения коленчатого вала** — определяет положение и скорость вращения коленчатого вала ДВС.
- **Датчик положения ротора электродвигателя** — определяет положение и скорость вращения ротора электродвигателя (необходим для векторного управления).
- **Датчики скорости вращения колёс** — определяют скорость вращения каждого колеса (используются для ABS, ESP, Torque Vectoring).
- **Датчик скорости автомобиля** — определяет продольную скорость автомобиля.

Датчики усилия и давления:

- **Датчик давления в гидравлической системе** — контролирует давление в гидравлической системе управления муфтами и сцеплением.
- **Датчик усилия на педали акселератора** — определяет желание водителя по ускорению.
- **Датчик усилия на педали тормоза** — определяет желание водителя по замедлению.
- **Датчики крутящего момента** — измеряют крутящий момент на валах трансмиссии.

Датчики температуры:

- **Датчик температуры электродвигателя** — контролирует температуру обмоток и магнитов электродвигателя.
- **Датчик температуры инвертора** — контролирует температуру силовых ключей инвертора.
- **Датчик температуры батареи** — контролирует температуру элементов тяговой батареи.
- **Датчик температуры трансмиссионного масла** — контролирует температуру масла в трансмиссии.

Датчики состояния батареи:

- **Датчик напряжения** — измеряет напряжение на батарее.
- **Датчик тока** — измеряет ток заряда/разряда батареи.
- **Датчик SOC (State of Charge)** — оценивает уровень заряда батареи.

3.2. Электронные блоки управления (ECU)

Электронные блоки управления являются «мозгом» системы. Они обрабатывают сигналы от датчиков, выполняют алгоритмы управления и формируют управляющие сигналы для исполнительных механизмов.

Блок управления двигателем (ECM). ECM управляет работой двигателя внутреннего сгорания. Он получает сигналы от датчиков положения коленвала, расхода воздуха, температуры, давления и формирует управляющие сигналы для форсунок, катушек зажигания, дроссельной заслонки. В гибридных системах ECM взаимодействует с HCP для координации работы ДВС и электродвигателя.

Блок управления трансмиссией (TCM). TCM управляет работой трансмиссии. Он получает сигналы от датчиков скорости, положения селектора передач, давления в гидросистеме и формирует управляющие сигналы для электрогидравлических клапанов управления муфтами, соленоидов переключения передач. TCM также взаимодействует с HCP для выполнения стратегических решений по выбору режима.

В современных гибридных трансмиссиях TCM решает комплексные задачи: управление переключением гибридных режимов (переход между EV, последовательным и параллельным режимами), управление переключением передач, управление гидравлической системой.

Блок управления инвертором (TPIM). TPIM управляет работой инвертора — устройства, преобразующего постоянный ток от батареи в переменный ток для питания электродвигателя. Он получает сигналы от датчиков тока и положения ротора и формирует ШИМ-сигналы для управления силовыми ключами инвертора. TPIM также управляет рекуперативным торможением, преобразуя кинетическую энергию в электрическую.

Блок управления батареей (BMS/BPCM). BPCM управляет работой тяговой батареи. Он контролирует напряжение, ток и температуру каждой ячейки батареи, оценивает SOC и SOH (State of Health), управляет балансировкой ячеек, защищает батарею от перезаряда, переразряда и перегрева.

Гибридный управляющий модуль (HCP). HCP является центральным координатором в гибридной системе. Он получает информацию от всех подчинённых блоков, принимает стратегические решения о распределении мощности между ДВС и электродвигателем, выборе режима работы, и передаёт команды исполнительным блокам.

3.3. Исполнительные устройства

Исполнительные устройства являются «мышцами» системы. Они преобразуют электрические сигналы от ECU в механические действия.

Инвертор. Инвертор преобразует постоянный ток от батареи в переменный ток для питания электродвигателя. Он состоит из силовых ключей (IGBT или MOSFET), которые управляются ШИМ-сигналами от TPIM. Инвертор также может работать в обратном направлении, преобразуя переменный ток от электродвигателя (при рекуперации) в постоянный для зарядки батареи.

Электродвигатель. Электродвигатель преобразует электрическую энергию в механическую. В электромобилях и гибридах чаще всего используются синхронные двигатели с постоянными магнитами (PMSM) или асинхронные двигатели (IM). Управление электродвигателем требует точного контроля тока, частоты и фазы напряжения.

Электрогидравлические клапаны. Электрогидравлические клапаны управляют потоком масла в гидравлической системе трансмиссии. Они используются для управления фрикционными муфтами и сцеплением. Пропорциональные соленоидные клапаны позволяют точно регулировать давление в гидросистеме. Современные системы управления муфтами включают управление моментом контакта (kiss point), адаптацию времени заполнения маслом, управление переходными процессами.

Электрический масляный насос (EOP). В современных гибридных трансмиссиях используется электрический масляный насос, который обеспечивает подачу масла для смазки, охлаждения и гидравлического управления. Управление EOP координируется с работой муфт и электродвигателей.

Муфты и сцепления. Фрикционные муфты и сцепления используются для соединения и разъединения различных компонентов трансмиссии: ДВС и электродвигателя, электродвигателя и колёс, различных ступеней передач. Управление муфтами требует точного контроля давления и учёта переходных процессов.

4. Уровни управления и их функции

4.1. Стратегический уровень

Стратегический уровень управления принимает решения о глобальной стратегии работы трансмиссии. Основные функции:

Выбор режима движения. В гибридных автомобилях система выбирает, в каком режиме работать: EV Mode (только электродвигатель), Hybrid Mode (совместная работа ДВС и электродвигателя), Serial Mode (ДВС работает как генератор для зарядки батареи и питания электродвигателя), Parallel Mode (ДВС и электродвигатель работают вместе на колёса). Решение принимается на основе SOC батареи, скорости, нагрузки, профиля маршрута.

Распределение мощности. Система определяет, какую долю мощности должен обеспечивать ДВС, а какую — электродвигатель. Это решение влияет на расход топлива, заряд батареи и динамические характеристики.

Планирование энергии. Система прогнозирует потребление энергии на маршруте и планирует использование батареи, чтобы обеспечить максимальную эффективность. Например, если впереди спуск, система может использовать энергию батареи более интенсивно, чтобы затем зарядить её за счёт рекуперации.

Управление тепловыми режимами. Система планирует работу систем охлаждения и нагрева для поддержания оптимальной температуры компонентов (батареи, электродвигателя, инвертора, трансмиссионного масла).

4.2. Тактический уровень

Тактический уровень управления конкретизирует стратегические решения в виде управляющих воздействий. Основные функции:

Управление крутящим моментом. Система определяет требуемый крутящий момент электродвигателя и ДВС в зависимости от желания водителя, текущей скорости и выбранного режима.

Управление переключением передач. Система определяет момент переключения передачи и управляет процессом переключения, обеспечивая плавность и минимизацию рывков.

Управление муфтами. Система управляет фрикционными муфтами для плавного подключения и отключения ДВС, а также для переключения режимов. Это включает управление давлением в гидросистеме, учёт времени заполнения маслом, управление переходными процессами.

Управление рекуперативным торможением. Система определяет долю тормозного усилия, которая обеспечивается за счёт рекуперации, и координирует её с гидравлическим торможением.

Управление Torque Vectoring. Система распределяет крутящий момент между колёсами для повышения устойчивости и управляемости.

4.3. Исполнительный уровень

Исполнительный уровень управления непосредственно управляет исполнительными механизмами. Основные функции:

Управление инвертором. Формирование ШИМ-сигналов для управления силовыми ключами инвертора, регулирование тока, частоты и фазы напряжения.

Управление электродвигателем. Реализация алгоритмов векторного управления, регулирование скорости и момента электродвигателя.

Управление гидравлической системой. Регулирование давления в гидросистеме с помощью пропорциональных соленоидных клапанов, управление электрическим масляным насосом.

Управление тепловыми системами. Управление вентиляторами, насосами охлаждающей жидкости, термостатами для поддержания оптимальной температуры.

5. Информационные потоки и взаимодействие компонентов

5.1. Структура информационных потоков

В системе управления трансмиссией циркулируют различные типы информации:

Данные от датчиков. Это первичная информация, поступающая от многочисленных датчиков: скорость, положение, температура, давление, ток, напряжение. Эти данные используются для оценки состояния системы и формирования управляющих сигналов.

Управляющие команды. Это информация, передаваемая от управляющих блоков к исполнительным механизмам: команды на открытие/закрытие клапанов, команды на изменение ШИМ-сигнала, команды на включение/выключение насосов.

Состояния системы. Это информация о текущем состоянии компонентов: режим работы, уровень заряда батареи, температура, ошибки. Эта информация передаётся между блоками для координации работы.

Диагностическая информация. Это информация о неисправностях, ошибках, предупреждениях. Используется для обнаружения и локализации неисправностей.

5.2. Координация работы блоков

Координация работы блоков в распределённой системе управления — одна из ключевых задач архитектуры. В гибридной системе эта координация осуществляется через HCP, который:

- Получает информацию от всех подчинённых блоков (ECM, TCM, TPIM, BPCM).
- Принимает стратегические решения на основе этой информации.
- Передаёт команды исполнительным блокам.
- Контролирует выполнение команд и корректирует их при необходимости.

HCP обеспечивает общее управление гибридной силовой установкой, координируя работу ECM, TCM, TPIM и BPCM. Такая архитектура позволяет

обеспечить согласованную работу всех компонентов, но требует надёжной сети передачи данных и чёткого распределения функций.

5.3. Временные требования

Временные требования к информационным потокам в системе управления трансмиссией очень жёсткие:

Циклические сообщения. Многие сообщения в системе управления передаются циклически с фиксированной частотой. Например, данные о скорости вращения колёс могут передаваться каждые 10 мс, данные о токе электродвигателя — каждые 1 мс.

Событийные сообщения. Некоторые сообщения передаются только при наступлении определённого события. Например, сообщение о нажатии педали тормоза должно быть передано немедленно, с минимальной задержкой.

Приоритеты сообщений. Критичные сообщения (например, о необходимости экстренного торможения) должны иметь более высокий приоритет и передаваться с минимальной задержкой.

Синхронизация. Данные от разных датчиков должны быть синхронизированы по времени. Например, для управления электродвигателем необходимо знать положение ротора и ток в одной и той же момент времени.

6. Бортовые сети в системах управления трансмиссией

6.1. CAN (Controller Area Network)

CAN является основной сетью для передачи управляющих сигналов в автомобилях. В системах управления трансмиссией CAN используется для:

- Передачи команд от HCP к TCM, ECM, TPIM, BPCM.
- Передачи данных от датчиков к блокам управления.
- Передачи диагностической информации.

Скорость CAN (до 1 Мбит/с) достаточна для большинства управляющих сигналов, но может быть недостаточна для передачи больших объёмов данных (например, для калибровок или журналов событий).

6.2. CAN FD (Flexible Data-rate)

CAN FD является развитием CAN, позволяющим увеличить скорость передачи данных (до 10 Мбит/с) и размер полезной нагрузки (до 64 байт). CAN FD используется в современных системах управления трансмиссией для передачи больших объёмов данных, например:

- Калибровочных данных.
- Журналов событий.
- Данных от датчиков с высоким разрешением.

CAN FD сохраняет совместимость с классическим CAN на физическом уровне, что упрощает переход на новую технологию.

6.3. FlexRay

FlexRay — высокоскоростная сеть с детерминированным поведением, разработанная специально для критических по времени применений. В системах управления трансмиссией FlexRay используется для:

- Передачи критичных по времени сигналов (например, управление муфтами).
- Передачи данных, требующих синхронизации (например, данные от датчиков положения ротора).
- Передачи данных в системах by-wire (например, управление тормозами).

FlexRay обеспечивает детерминированное поведение, что критично для систем управления с жёсткими временными ограничениями. Однако стоимость FlexRay выше, чем CAN, поэтому он используется только для наиболее критичных функций.

6.4. Automotive Ethernet

Automotive Ethernet — наиболее быстро развивающаяся автомобильная сеть, основанная на стандартах Ethernet с адаптацией для автомобильных условий. В системах управления трансмиссией Automotive Ethernet используется для:

- Передачи больших объёмов данных (например, калибровочных данных, журналов событий).
- Передачи данных для систем ADAS, интегрированных с управлением трансмиссией.
- Передачи данных для диагностики и обновления ПО.

Automotive Ethernet поддерживает протоколы Time-Sensitive Networking (TSN) для обеспечения детерминированного поведения, что делает его пригодным для критических по времени применений.

7. Архитектура гибридных трансмиссий

7.1. Последовательная гибридная трансмиссия

В последовательной гибридной трансмиссии ДВС работает только как генератор для зарядки батареи и питания электродвигателя. Колёса приводятся исключительно электродвигателем.

Структура: ДВС → Генератор → Батарея/Инвертор → Электродвигатель → Трансмиссия → Колёса.

Особенности управления:

- Управление ДВС направлено на обеспечение максимальной эффективности генерации.
- Управление электродвигателем — на обеспечение требуемой динамики.
- Управление батареей — на поддержание оптимального SOC.

Преимущества: простота конструкции, возможность работы ДВС в оптимальном режиме, хорошая управляемость электродвигателем.

Недостатки: двойное преобразование энергии (механическая → электрическая → механическая), что снижает общий КПД.

7.2. Параллельная гибридная трансмиссия

В параллельной гибридной трансмиссии ДВС и электродвигатель могут работать как вместе, так и по отдельности, передавая мощность на колёса через общую трансмиссию.

Структура: ДВС и Электродвигатель → Муфта → Трансмиссия → Колёса.

Особенности управления:

- Управление муфтой для подключения/отключения ДВС.
- Распределение мощности между ДВС и электродвигателем.
- Управление переключением передач в зависимости от режима.

Преимущества: высокий КПД за счёт прямой передачи мощности, возможность работы в различных режимах.
Недостатки: сложность конструкции и управления, необходимость синхронизации ДВС и электродвигателя.

7.3. Последовательно-параллельная гибридная трансмиссия

Последовательно-параллельная гибридная трансмиссия сочетает преимущества последовательной и параллельной схем. Она может работать как в последовательном, так и в параллельном режиме, а также в режиме с разделением мощности.

Структура: ДВС → Планетарный механизм/Муфты → Генератор и Электродвигатель → Трансмиссия → Колёса.

Особенности управления:

- Сложное управление планетарным механизмом и муфтами.
- Координация работы ДВС, генератора и электродвигателя.
- Выбор оптимального режима работы в зависимости от условий.

Преимущества: максимальная гибкость и эффективность.
Недостатки: очень сложная конструкция и управление.

7.4. H-DCT (Hybrid Dual-Clutch Transmission)

Одной из современных архитектур гибридных трансмиссий является H-DCT — гибридная трансмиссия с двойным сцеплением. В этой архитектуре электродвигатель интегрируется в один из входных валов DCT, что позволяет передавать крутящий момент от ДВС и электродвигателя через различные механические пути.

Особенности управления H-DCT включают:

- Управление двумя сцеплениями для переключения передач.
- Распределение крутящего момента между ДВС и электродвигателем.
- Управление переключением гибридных режимов (EV, последовательный, параллельный).
- Оптимизация топливной экономичности и динамических характеристик.

7.5. Multi-mode electrically variable transmission

В последние годы всё большее распространение получают многомодовые электрически регулируемые трансмиссии, которые постепенно становятся основной структурой гибридных силовых установок. Эти трансмиссии используют планетарные механизмы и несколько муфт для обеспечения различных режимов работы с высокой эффективностью.

Особенности управления:

- Управление несколькими муфтами для переключения режимов.
- Координация работы двух электродвигателей и ДВС.
- Оптимизация распределения мощности между механическим и электрическим путями.

8. Интеллектуальные алгоритмы управления в архитектуре

8.1. Нейросетевые контроллеры

Нейросетевые контроллеры используются для управления нелинейными и трудно моделируемыми процессами. В системах управления трансмиссией они применяются для:

- **Управления крутящим моментом электродвигателя.** Нейронная сеть может аппроксимировать сложную нелинейную зависимость между управляющими сигналами и выходным моментом, учитывая температуру, напряжение батареи, износ компонентов.
- **Управления муфтами.** Нейросетевая модель может предсказывать поведение гидравлической системы и компенсировать нелинейности и гистерезис.
- **Прогнозирования.** Нейронные сети могут прогнозировать будущие состояния системы (например, температуру, нагрузку) для упреждающего управления.

8.2. Нечёткая логика

Нечёткая логика используется для принятия решений в условиях неопределённости. В системах управления трансмиссией она применяется для:

- **Выбора режима движения.** Нечёткая логика позволяет учитывать множество факторов (SOC, скорость, нагрузка, стиль вождения) при выборе оптимального режима.
- **Адаптации к стилю вождения.** Нечёткая система может классифицировать стиль вождения и адаптировать параметры управления.
- **Управления переключением передач.** Нечёткая логика позволяет определить момент переключения передачи с учётом множества факторов.

8.3. Обучение с подкреплением

Обучение с подкреплением используется для оптимизации стратегий управления. В системах управления трансмиссией оно применяется для:

– **Оптимизации стратегии переключения режимов.** Алгоритм обучается выбирать оптимальный режим работы для минимизации расхода энергии и обеспечения комфорта.
– **Оптимизации переключения передач.** Алгоритм обучается выбирать момент и способ переключения для минимизации рывков и износа.
– **Оптимизации распределения мощности.** Алгоритм обучается распределять мощность между ДВС и электродвигателем для максимальной эффективности.

8.4. Физически обоснованное моделирование

Физически обоснованное моделирование (physics-based modeling) является важным инструментом для разработки систем управления трансмиссией. Физическая модель позволяет:
– Анализировать динамику системы.
– Разрабатывать и тестировать алгоритмы управления.
– Оптимизировать параметры управления.

Например, физическая модель электрогидравлической системы управления муфтами включает:
– Гидравлическую систему, описывающую взаимодействие между заполнением трубопровода и камерами управления муфтами.
– Механическую систему, содержащую динамику поршня и вращательную динамику трансмиссии.

На основе физической модели можно получить оптимальные управляющие команды для минимальных потерь энергии при приемлемом времени включения и достаточной передаче крутящего момента.

9. Требования к архитектуре интеллектуальных систем

9.1. Функциональная безопасность (ISO 26262)

Системы управления трансмиссией относятся к системам, влияющим на безопасность движения. Поэтому они должны соответствовать требованиям ISO 26262 «Road vehicles — Functional safety». Стандарт устанавливает уровни целостности безопасности (ASIL) от A до D.

Для систем управления трансмиссией обычно требуется уровень ASIL C или D (в зависимости от конкретных функций). Это означает, что система должна иметь:
– Резервирование критических компонентов.
– Механизмы самодиагностики.
– Защиту от отказов.
– Детерминированное поведение.

9.2. Кибербезопасность (ISO/SAE 21434)

С подключением автомобилей к внешним сетям кибербезопасность становится критически важной. Стандарт ISO/SAE 21434 «Road vehicles —

Cybersecurity engineering» определяет требования к кибербезопасности автомобильных систем.

Для систем управления трансмиссией это означает:

- Защиту от несанкционированного доступа.
- Аутентификацию управляющих команд.
- Шифрование данных при передаче.
- Обнаружение вторжений.

9.3. Надёжность

Автомобильные электронные системы должны работать в тяжёлых условиях: широкий температурный диапазон, вибрации, электромагнитные помехи. Поэтому к архитектуре предъявляются требования по надёжности:

- Использование компонентов автомобильного класса.
- Защита от перегрева, влаги, ударов.
- Механизмы самодиагностики и восстановления.

10. Практические примеры архитектурных решений

10.1. DHT hybrid transmission control (управление гибридной трансмиссией)

В работе, представленной на SAE World Congress Experience в 2024 году, описывается система управления DHT (Dedicated Hybrid Transmission) гибридной трансмиссией.

Система управления включает:

- Гидравлическое управление: преобразование крутящего момента в давление, адаптация точки контакта муфты, адаптация времени заполнения маслом.
- Управление переключением гибридных режимов: четыре режима (EV, последовательный, параллельный, запуск).
- Управление переключением передач: принятие решения о типе переключения, управление последовательностью переключения, управление инерционным процессом с вмешательством электродвигателя.
- Управление электродвигателем: управление током, управление режимами, стратегия повышения напряжения.
- Тепловой менеджмент: распределение потоков масла для муфт и электродвигателя.

Режимы электродвигателя включают:

- Режим инициализации.
- Нормальный режим.
- Режим неисправности.
- Режим активного разряда.
- Режим отключения питания.

10.2. Physics-based modeling of electro-hydraulic dual-clutch transmission

В работе, опубликованной в International Journal of Automotive Technology в 2025 году, представлена физически обоснованная модель электрогидравлической системы управления двухсцепной трансмиссией для гибридных автомобилей.

Модель описывает:

- Гидравлическую систему: взаимодействие между заполнением трубопровода и камерами управления муфтами.
- Механическую систему: динамику поршня и вращательную динамику трансмиссии.

Состояния каждой муфты описываются диаграммой состояний, включающей:

- Движение поршня.
- Пробуксовка муфты.
- Включение муфты.

Результаты показывают, что во время переключения с EV-режима на HEV-режим давление в камере муфты на стороне ДВС повышается, а давление в трубопроводе и камере муфты на стороне электродвигателя падает. При неправильном управлении это может привести к пробуксовке муфты на стороне электродвигателя при высоких нагрузках.

10.3. Control-oriented modelling of HEV with H-DCT

В работе, опубликованной в Journal of Physics: Conference Series в 2024 году, представлена модель для управления гибридным автомобилем с H-DCT (Hybrid Dual-Clutch Transmission).

Модель включает:

- Детальные физические модели компонентов DCT.
- Модели расхода топлива для ДВС, электродвигателя и батареи.
- Модель продольной динамики автомобиля.
- Стратегии управления на основе правил для распределения крутящего момента и переключения передач.

11. Закрепление и завершение

11.1. Мини-тест

1. Какие основные блоки управления входят в распределённую архитектуру гибридной системы?
2. Какую функцию выполняет HCP (Hybrid Control Module)?
3. Какие типы датчиков используются в системе управления трансмиссией?
4. Какие уровни управления выделяют в архитектуре интеллектуальной системы?
5. Какие основные режимы работы выделяют в гибридной трансмиссии DHT?

11.2. Эталонные краткие ответы

1. **Основные блоки управления:** ECM (Engine Control Module) — управление ДВС, TCM (Transmission Control Module) — управление трансмиссией, TPIM (Traction Power Inverter Module) — управление инвертором, BPCM (Battery Pack Control Module) — управление батареей, HCP (Hybrid Control Module) — координация работы всех блоков.
2. **HCP (Hybrid Control Module)** обеспечивает общее управление и координацию работы всех компонентов гибридной силовой установки. Он получает информацию от ECM, TCM, TPIM и BPCM, принимает стратегические решения и передаёт команды исполнительным блокам.
3. **Типы датчиков:** датчики положения и скорости (положения коленвала, ротора, скорости колёс), датчики усилия и давления (давления в гидросистеме, усилия на педалях), датчики температуры (электродвигателя, инвертора, батареи, масла), датчики состояния батареи (напряжения, тока, SOC).
4. **Уровни управления:** стратегический (выбор глобальной стратегии), тактический (конкретизация в виде управляющих воздействий) и исполнительный (непосредственное управление механизмами).
5. **Основные режимы работы DHT:** EV-режим (только электродвигатель), последовательный режим (ДВС работает как генератор), параллельный режим (ДВС и электродвигатель работают вместе), режим запуска.

11.3. Итоговые положения

Архитектура интеллектуальной системы управления трансмиссией строится по иерархическому принципу с разделением на стратегический, тактический и исполнительный уровни.

Распределённая архитектура включает несколько специализированных блоков управления: ECM, TCM, TPIM, BPCM и координирующий HCP.

Основные компоненты системы — датчики (положения, скорости, давления, температуры), электронные блоки управления (ECU) и исполнительные устройства (инверторы, электродвигатели, клапаны, муфты, насосы).

Информационные потоки между блоками осуществляются по бортовым сетям (CAN, CAN FD, FlexRay, Automotive Ethernet) с жёсткими временными требованиями.

Гибридные трансмиссии могут быть последовательными, параллельными, последовательно-параллельными, а также H-DCT и многомодовыми электрически регулируемыми.

Интеллектуальные алгоритмы (нейронные сети, нечёткая логика, обучение с подкреплением) интегрируются на всех уровнях управления для повышения эффективности и адаптивности.

Требования к архитектуре включают функциональную безопасность (ISO 26262), кибербезопасность (ISO/SAE 21434) и высокую надёжность в тяжёлых условиях эксплуатации.

Задание после лекции

Выберите один из компонентов системы управления трансмиссией (электронный блок, датчик, исполнительное устройство, сеть передачи данных) и подготовьте краткий аналитический обзор (1–2 страницы), в котором:

1. Опишите назначение и основные функции выбранного компонента.
2. Охарактеризуйте его технические характеристики (для ECU — тип процессора, память, интерфейсы; для датчика — диапазон измерения, точность; для сети — скорость, протокол).
3. Объясните, как этот компонент взаимодействует с другими компонентами системы.
4. Опишите требования к надёжности и безопасности, предъявляемые к этому компоненту.
5. Приведите пример конкретного устройства от известного производителя.

Контрольные вопросы

1. Опишите обобщённую архитектуру интеллектуальной системы управления трансмиссией.
2. Какие блоки управления входят в распределённую архитектуру гибридной системы?
3. Какую функцию выполняет HCP (Hybrid Control Module)?
4. Какие типы датчиков используются в системе управления трансмиссией?
5. Какие исполнительные устройства используются в системе управления трансмиссией?
6. Какие уровни управления выделяют в архитектуре интеллектуальной системы?
7. В чём отличие стратегического уровня управления от тактического?
8. Какие информационные потоки существуют в системе управления трансмиссией?
9. Какие сети передачи данных используются в системах управления трансмиссией?
10. Каковы особенности CAN, CAN FD, FlexRay и Automotive Ethernet?
11. Опишите структуру последовательной гибридной трансмиссии.
12. Опишите структуру параллельной гибридной трансмиссии.
13. Опишите структуру последовательно-параллельной гибридной трансмиссии.
14. Что такое H-DCT и каковы особенности её управления?
15. Что такое многомодовая электрически регулируемая трансмиссия?

16. Как нейросетевые контроллеры применяются в управлении трансмиссией?

17. Как нечёткая логика применяется в управлении трансмиссией?

18. Как обучение с подкреплением применяется в управлении трансмиссией?

19. Какие требования к функциональной безопасности предъявляются к системам управления трансмиссией?

20. Какие требования к кибербезопасности предъявляются к системам управления трансмиссией?

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

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

Дополнительная литература

6. Brancati R., Gimelli A., Tufano F. Control-Oriented Modelling of a HEV with Dual-Clutch Transmission for Torque Split and Gear Shifting Optimization // Journal of Physics: Conference Series. — 2024. — Vol. 2893. — P. 012102. — DOI: 10.1088/1742-6596/2893/1/012102.

7. Physics-Based Modeling of Electro-Hydraulic Actuated Dual-Clutch Transmissions in Hybrid Electric Vehicles (HEVs) // International Journal of Automotive Technology. — 2025. — Vol. 26. — P. 1639–1654. — DOI: 10.1007/s12239-025-00241-9.

8. Jing J., Zhang J., Liu Y., Wang Z., Xue T. Research on the Control Systems for Hybrid and Electric Powertrains // SAE Technical Paper. — 2024. — No. 2024-01-2786. — DOI: 10.4271/2024-01-2786.

9. ISO 26262:2018. Road Vehicles — Functional Safety. Parts 1–10. — Geneva: International Organization for Standardization, 2018.

10. ISO/SAE 21434:2021. Road Vehicles — Cybersecurity Engineering. — Geneva: International Organization for Standardization, 2021.

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

12. 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.

Электронные ресурсы

13. SAE International. SAE Technical Papers Database. — Режим доступа: https://www.sae.org/publications/technical-papers[reference:74].

14. SpringerLink. Electronic Collection of Scientific and Educational Literature. — Режим доступа: https://link.springer.com[reference:75].

15. IEEE Xplore. Scientific and Technical Publications Database. — Режим доступа: https://ieeexplore.ieee.org.

16. ISO. International Standards Catalogue. — Режим доступа: https://www.iso.org[reference:76][reference:77].