ЛЕКЦИЯ 7
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ФРИКЦИОННЫМИ МУФТАМИ ГИБРИДНЫХ ТРАНСМИССИЙ. АЛГОРИТМЫ ПЛАВНОГО ПОДКЛЮЧЕНИЯ ДВС И УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕХОДНЫМИ РЕЖИМАМИ MODE TRANSITION CONTROL

Цель

Сформировать у обучающихся системное представление о принципах построения и функционирования систем управления фрикционными муфтами в гибридных трансмиссиях. Рассмотреть алгоритмы плавного подключения двигателя внутреннего сгорания, методы управления переходными режимами (Mode Transition Control), а также интеллектуальные подходы к координации работы ДВС, электродвигателя и муфт для обеспечения комфорта, эффективности и надёжности.

Планируемые результаты

После изучения данной лекции обучающийся сможет:

- объяснять роль фрикционных муфт в гибридных трансмиссиях и их влияние на плавность переключения режимов;
- описывать физические процессы в электрогидравлических системах управления муфтами;
- характеризовать этапы переходных процессов при подключении ДВС;
- объяснять принципы работы иерархических систем управления Mode Transition;
- анализировать применение методов скользящего режима, нечёткой логики, модельного прогнозирующего управления и адаптивных систем для управления муфтами;
- оценивать компромисс между плавностью переключения и энергетическими потерями в муфтах.

Проблемный вопрос

Вопрос занятия. Гибридный автомобиль — это мастер переключений. Он постоянно решает, в каком режиме работать: только на электричестве, только на бензине или в смешанном режиме. Каждое такое переключение — это момент истины для системы управления. Если подключить двигатель внутреннего сгорания слишком резко — пассажиры почувствуют рывок. Если слишком медленно — возрастут потери энергии на трение в муфте, снизится эффективность. Как найти ту самую «золотую середину», когда переключение происходит быстро, плавно и с минимальными потерями? И как алгоритмы управления должны координировать работу электродвигателя, ДВС и фрикционной муфты, чтобы это переключение осталось незаметным для водителя и пассажиров?

1. Введение в управление фрикционными муфтами гибридных трансмиссий

1.1. Роль фрикционных муфт в гибридных трансмиссиях

Фрикционные муфты являются ключевыми исполнительными элементами гибридных трансмиссий, обеспечивающими соединение и разъединение различных компонентов силовой установки. В зависимости от архитектуры гибридной трансмиссии муфты выполняют различные функции:

Муфта подключения ДВС (K0 clutch). В параллельных и последовательно-параллельных гибридах эта муфта соединяет или разъединяет коленчатый вал двигателя внутреннего сгорания с остальной трансмиссией. При работе в EV-режиме муфта разомкнута, ДВС отключён. При переходе в гибридный режим муфта плавно замыкается, подключая ДВС к трансмиссии.

Муфты переключения передач (shift clutches). В гибридных трансмиссиях с двумя сцеплениями (DCT) или с несколькими режимами работы муфты обеспечивают переключение между различными передаточными отношениями и режимами работы.

Муфты управления режимами (mode clutches). В многомодовых трансмиссиях с планетарными механизмами муфты позволяют переключаться между последовательным, параллельным и режимом разделения мощности.

Муфта отключения (disconnect clutch). В некоторых конструкциях используется для полного отключения ДВС от трансмиссии с целью снижения механических потерь.

В работе, посвящённой физическому моделированию электрогидравлических трансмиссий с двойным сцеплением, отмечается, что с помощью координированного управления электрическим масляным насосом (EOP) и двумя пропорциональными соленоидными клапанами регулируются гидравлические давления, а включение/выключение муфты на стороне ДВС и муфты на стороне электродвигателя позволяет гибридной силовой установке переключаться между различными режимами движения.

1.2. Почему управление муфтами — сложная задача?

Управление фрикционными муфтами в гибридных трансмиссиях является одной из наиболее сложных задач в автомобильной электронике по нескольким причинам:

Фрикционная прерывистость. Передача крутящего момента через фрикционную муфту имеет разрывную характеристику. В момент начала контакта поверхностей трения передаваемый момент возрастает скачкообразно. Эта разрывность создаёт основную трудность для обеспечения плавных переходов. Поэтому плавный переход трудно достижим.

Различие динамических характеристик источников мощности. Электродвигатель имеет практически мгновенную реакцию на управляющий сигнал (миллисекунды), в то время как ДВС характеризуется значительно более медленной реакцией (десятки и сотни миллисекунд) из-за

инерционности механических и термодинамических процессов. Это различие создаёт проблему координации при переключениях.

Неопределённость параметров. Система управления сталкивается с неопределённостями, вызванными трением, износом муфт, изменением температуры трансмиссионного масла, производственными отклонениями и внешними возмущениями.

Нелинейность гидравлической системы. Электрогидравлические системы управления муфтами имеют сложные нелинейные характеристики, включая гистерезис между управляющим током и давлением.

Конфликт целей. При управлении муфтой существует фундаментальный компромисс между скоростью включения (чем быстрее, тем меньше потери энергии на трение) и плавностью (чем медленнее, тем меньше рывки).

1.3. Диаграмма состояний муфты

Для анализа и синтеза систем управления фрикционными муфтами используется диаграмма состояний, описывающая три основных состояния муфты:

Состояние 1 — Движение поршня (Piston Moving). В этом состоянии гидравлический поршень перемещается под действием давления масла, преодолевая усилие возвратной пружины. Фрикционные диски ещё не контактируют, крутящий момент не передаётся. Это этап «подготовки» муфты к включению.

Состояние 2 — Пробуксовка муфты (Clutch Slipping). В этом состоянии фрикционные диски контактируют, но вращаются с разной скоростью. Через муфту передаётся крутящий момент, определяемый коэффициентом трения и прижимным усилием. Это ключевой этап управления, на котором происходит основное регулирование.

Состояние 3 — Муфта включена (Clutch Engaged). В этом состоянии скорости ведущей и ведомой частей муфты синхронизированы, пробуксовка отсутствует. Муфта передаёт полный крутящий момент без потерь на трение.

Каждое переключение режимов в гибридной трансмиссии представляет собой последовательный переход муфты (или нескольких муфт) через эти три состояния. Задача системы управления — обеспечить управляемое и предсказуемое прохождение этих состояний с учётом текущих условий эксплуатации.

2. Архитектура систем управления переходными режимами (Mode Transition Control)

2.1. Иерархическая структура управления переходными режимами

Управление переходными режимами в гибридных трансмиссиях обычно организуется по иерархическому принципу, что позволяет разделить сложную задачу на более простые подзадачи и обеспечить модульность системы.

Верхний уровень — стратегическое планирование переключения. На этом уровне принимается решение о необходимости переключения

режима на основе анализа текущих условий движения (скорость, нагрузка, SOC батареи), прогноза маршрута и стиля вождения. Здесь могут использоваться методы прогнозирующего управления с учётом V2I-информации и прогнозирования намерений водителя с помощью нейронных сетей.

Средний уровень — координация крутящих моментов. На этом уровне рассчитываются требуемые крутящие моменты для ДВС, электродвигателя и муфты, обеспечивающие плавное и быстрое переключение. Здесь применяются методы оптимизации, робастного управления и адаптивного управления.

Нижний уровень — исполнительное управление. На этом уровне реализуется точное отслеживание заданных траекторий скорости и положения для гидравлических исполнительных механизмов муфт. Здесь используются методы позиционного и pressure-based управления, адаптивное управление для компенсации неопределённостей.

2.2. Основные этапы переходного процесса

Переход от EV-режима к гибридному режиму (или наоборот) обычно включает несколько последовательных этапов:

Этап 1 — Предварительное заполнение (Pre-fill). Гидравлическая система заполняется маслом для подготовки муфты к включению. Этот этап должен быть выполнен быстро, но без гидравлических ударов.

Этап 2 — Подготовка ДВС (Engine Pre-spin). Электродвигатель разгоняет коленчатый вал ДВС до скорости, близкой к скорости синхронизации с муфтой. Это может выполняться с использованием отдельного стартер-генератора или через буксующую муфту.

Этап 3 — Пробуксовка муфты (Clutch Slipping). Муфта начинает передавать крутящий момент, ДВС разгоняется под действием электродвигателя через буксующую муфту. На этом этапе происходит основное регулирование для обеспечения плавности.

Этап 4 — Синхронизация скоростей (Speed Synchronization). Скорости ведущей и ведомой частей муфты выравниваются. Этот этап требует точного управления скоростью ДВС и моментом муфты.

Этап 5 — Полное включение (Full Engagement). Муфта полностью замыкается, ДВС подключается к трансмиссии. После этого система переходит в гибридный режим.

Этап 6 — Передача управления (Torque Handover). Крутящий момент постепенно передаётся от электродвигателя к ДВС (или наоборот) в соответствии с выбранной стратегией энергоменеджмента.

В работе, посвящённой управлению переходными режимами для полноприводного гибрида с DCT, разработан многоступенчатый метод оптимального управления для принятия решений по крутящему моменту ДВС и крутящему моменту, передаваемому через муфту.

2.3. Физическое моделирование электрогидравлических систем

Для разработки эффективных алгоритмов управления необходимы точные физические модели электрогидравлических систем управления муфтами. Современные исследования предлагают комплексные модели, включающие:

Гидравлическую систему. Описывает взаимодействие между заполнением магистрального трубопровода и камерами управления двумя муфтами. Моделируются процессы заполнения, сброса давления, гидравлические потери.

Механическую систему. Включает динамику поршня и вращательную динамику трансмиссии с двойным сцеплением.

Электрическую систему. Моделирует управление пропорциональными соленоидными клапанами и электрическим масляным насосом.

Результаты физического моделирования показывают, что при переключении с EV-режима на HEV-режим давление в камере управления муфтой на стороне ДВС повышается, тогда как давление в магистральном трубопроводе и камере управления муфтой на стороне электродвигателя падает. При неправильном управлении это может привести к пробуксовке муфты на стороне электродвигателя при высоких нагрузках. На основе физической модели могут быть получены оптимальные управляющие команды для минимальных потерь энергии при приемлемом времени включения и достаточной передаче крутящего момента.

3. Алгоритмы управления фрикционными муфтами

3.1. Управление на основе эталонной модели (Model Reference Control)

В работе, посвящённой координации крутящих моментов при переходе режимов для последовательно-параллельного гибрида, предложен закон управления на основе эталонной модели (Model Reference Control, MRC).

Особенность этой задачи заключается в том, что система является **переопределённой** (overactuated) — три входных сигнала (момент ДВС, момент электродвигателя и момент муфты) могут быть использованы для управления двумя выходными переменными (угловыми скоростями двух сторон муфты). Это создаёт возможность выбора оптимальной комбинации входов для достижения желаемого поведения.

Анализируются эффекты использования различных комбинаций входных сигналов, изучается чувствительность производительности к различным факторам проектирования. Результаты моделирования и экспериментов на автобусе с последовательно-параллельной гибридной установкой демонстрируют, что MRC обеспечивает уменьшение прерывания крутящего момента, снижение рывков автомобиля и меньшие потери на трение по сравнению с традиционным методом управления.

3.2. Иерархическое робастное адаптивное управление (RASMC)

Для параллельных гибридов разработана иерархическая стратегия робастного адаптивного управления переходными режимами. Эта стратегия решает проблему точного и быстрого включения муфты в условиях неопределённости параметров системы и недоступности измерения фактического крутящего момента муфты.

Структура контроллера является иерархической:

Верхний уровень. Используется **робастное адаптивное скользящее управление (RASMC)** для расчёта требуемого крутящего момента, передаваемого через муфту, на основе текущих состояний электродвигателя и ДВС. Параметры управления оптимизируются с помощью **алгоритма роя частиц (PSO)** , который ищет компромисс между рывками автомобиля и потерями энергии на пробуксовку муфты. Дополнительно разработан **нечёткий контроллер** для расчёта ожидаемой скорости включения муфты с использованием отклонения желаемого и фактического крутящих моментов муфты. Фактический крутящий момент муфты не измеряется, а оценивается с помощью **наблюдателя ПИ-типа**.

Нижний уровень. Разработана **схема адаптивного управления с конечным временем (AFTC)** для преодоления люфта зубчатых передач, возмущений параметров и внешних возмущений в процессе слежения за положением муфты.

Эффективность стратегии подтверждена как моделированием в MATLAB/Simulink, так и испытаниями с аппаратным обеспечением в контуре (HIL).

3.3. Управление на основе нечёткой логики

Нечёткая логика активно применяется для управления фрикционными муфтами благодаря своей способности работать с неопределёнными и неточными данными.

В работе, посвящённой оптимизации качества переключения многомодового гибрида, разработана **иерархическая стратегия нечёткого управления гидравлическим давлением муфты**:

Верхний уровень. Нечёткий алгоритм определяет желаемое давление муфты на основе целевого крутящего момента во время переключения.

Нижний уровень. Нечёткий ПИД-контроллер отслеживает фактическое давление.

Разработана **стратегия динамической компенсации крутящего момента электродвигателя** для компенсации работы трения муфты и запаздывания крутящего момента ДВС. Для определения оптимального гидравлического давления муфты используется **многоцелевой нечёткий метод оптимизации**.

Результаты моделирования показывают, что предложенная стратегия управления обеспечивает как мощностные характеристики, так и плавность движения, эффективно подавляет рывки, снижает трение в муфте и улучшает общее качество переключения режимов движения.

Также разработаны нечёткие контроллеры для расчёта ожидаемой скорости включения муфты в иерархических системах управления. Эксперименты показывают, что нечёткая логика может снизить пробуксовку и вибрации муфты, а новая система обеспечивает на 2% более высокую скорость включения по сравнению с гидротрансформатором и устраняет 70% шума и вибраций по сравнению с муфтой механической коробки передач.

3.4. Модельное прогнозирующее управление (MPC)

Модельное прогнозирующее управление является одним из наиболее перспективных подходов к управлению муфтами, особенно для задач подавления крутильных колебаний.

В работе, посвящённой подавлению крутильных колебаний при переходных режимах параллельного гибрида на основе множественного модельного прогнозирующего управления, для обеспечения плавного и быстрого включения муфты была разработана **кривая скорости пробуксовки в качестве эталонной**. Эталонная кривая описывается полиномом третьей степени:

$$\omega_{slref} = 2 \cdot \omega_{sl} \cdot t^3/t_f — 3 \cdot \omega_{sl} \cdot t^2/t_f + \omega_{sl}$$

где ω_{slref} — эталонное значение скорости пробуксовки муфты,
ω_{sl} — начальная скорость пробуксовки,
t — время от начала до конца пробуксовки.

В процессе управления крутящий момент ДВС, крутящий момент электродвигателя и скорость изменения крутящего момента электродвигателя должны контролироваться в разумных пределах. Для обеспечения быстрой и стабильной реакции системы накладываются ограничения на управляющие переменные и их приращения.

Задача оптимизации с ограничениями решается как задача квадратичного программирования. Результаты показывают, что MPC может эффективно подавлять крутильные колебания при переходных режимах.

3.5. Скользящее управление и управление с конечным временем

Методы скользящего управления и управления с конечным временем обеспечивают робастность к неопределённостям и возмущениям.

В работе, посвящённой скользящему координированному управлению гибридным автомобилем с использованием техники конечного времени, переходный процесс разделён на этапы. Для этапов, включающих пробуксовку муфты, разработан **глобальный быстрый интегральный терминальный скользящий контроллер (GFITSMC)**. GFITSMC состоит из глобальной быстрой интегральной терминальной скользящей поверхности (GFITSMS) и **негладкого закона достижения (NSRL)**. Контроллер синтезируется с точки зрения устойчивости за конечное время.

Доказано, что при правильных параметрах NSRL и GFITSMS ошибка слежения за скоростью и перемещением электродвигателя и ДВС может

достичь скользящей поверхности и сойтись к нулю за конечное время. Результаты испытаний демонстрируют, что предложенная стратегия не только обеспечивает более быстрое переключение режимов за счёт улучшения слежения за траекторией состояния, но и значительно снижает продольные рывки, вызванные переходным переключением режимов.

Для полноприводного гибридного автомобиля с DCT разработан **робастный алгоритм управления переходными режимами** с использованием скользящего управления на этапе разгона ДВС и двойной архитектуры слежения (прямая связь + H∞ надежная обратная связь) на этапе синхронизации скоростей.

3.6. Управление с предписанной производительностью (Prescribed Performance Control)

В работе, посвящённой управлению переходными режимами подключённого гибридного автомобиля на основе прогнозирования намерений водителя с использованием нечёткой нейронной сети, предложен иерархический подход:

Верхний уровень. Планирование целевой скорости автомобиля с помощью MPC с учётом уменьшения рывков на основе информации V2I и прогнозирования намерений водителя с использованием нечёткой нейронной сети типа-2.

Нижний уровень. Проектирование **контроллера с предписанной производительностью и фиксированным временем (PPFTC)** для автоматической системы сцепления и расчёт желаемой скорости включения муфты на основе прогнозируемого намерения водителя.

Этот подход позволяет улучшить точность слежения за траекторией положения муфты и стабильность в реальном процессе переходного режима. Слишком быстрая скорость включения муфты вызывает рывки автомобиля и ухудшает комфорт; слишком медленная — вызывает потери энергии на трение в муфте и снижает эффективность трансмиссии.

4. Координация крутящих моментов при переходных режимах

4.1. Проблема координации

Ключевая проблема управления переходными режимами в гибридных трансмиссиях — координация крутящих моментов различных источников мощности. Электродвигатель имеет высокочастотную реакцию (миллисекунды), в то время как ДВС характеризуется низкочастотной реакцией (десятки и сотни миллисекунд). Это различие создаёт проблему координации при переключениях.

Дополнительная сложность возникает из-за **фрикционной прерывистости** муфты — крутящий момент, передаваемый через муфту, имеет разрывную характеристику. В момент начала контакта поверхностей трения передаваемый момент возрастает скачкообразно.

4.2. Стратегии координации

Для решения проблемы координации разработаны различные стратегии:

Компенсация запаздывания ДВС. Электродвигатель используется для компенсации медленной реакции ДВС. В момент начала переключения электродвигатель может временно увеличить момент для компенсации снижения момента ДВС.

Управление моментом муфты. Крутящий момент муфты регулируется таким образом, чтобы обеспечить плавную передачу нагрузки от электродвигателя к ДВС (или наоборот).

Динамическая компенсация. Разработана стратегия динамической компенсации крутящего момента электродвигателя для компенсации работы трения муфты и запаздывания крутящего момента ДВС.

Наблюдатели состояния. Для оценки недоступных для измерения величин (например, фактического крутящего момента муфты) используются наблюдатели состояния.

В работе по координированному управлению скольжением муфты для запуска ДВС в P2-гибридной автоматической трансмиссии предложена многоэтапная стратегия координированного управления, включающая электродвигатель, ДВС и муфту.

4.3. Компромисс между плавностью и эффективностью

При управлении переходными режимами существует фундаментальный компромисс:

Слишком быстрое включение муфты → минимальные потери энергии на трение, но высокие рывки и ухудшение комфорта.

Слишком медленное включение муфты → минимальные рывки и высокий комфорт, но значительные потери энергии на трение и снижение эффективности трансмиссии.

Задача системы управления — найти оптимальный баланс между этими противоречивыми требованиями. Для этого используются методы оптимизации, такие как **алгоритм роя частиц (PSO)** , который ищет компромисс между рывками автомобиля и потерями энергии на пробуксовку муфты. Также применяется **многоцелевая нечёткая оптимизация** для определения оптимального гидравлического давления муфты.

5. Интеллектуальные подходы к управлению муфтами

5.1. Наблюдатели и оценка состояния

Поскольку фактический крутящий момент муфты часто недоступен для прямого измерения, используются **наблюдатели состояния** для его оценки.

В иерархической системе управления разработан **наблюдатель ПИ-типа** (proportional-integral observer) для оценки фактического крутящего момента муфты на основе доступных измерений.

В работе по стратегии динамического координированного управления двухмоторного гибрида на основе наблюдателя крутящего момента трения муфты используется наблюдатель для оценки крутящего момента трения муфты. Это позволяет компенсировать возмущения крутящего момента, вызванные различными динамическими характеристиками электродвигателя и ДВС.

5.2. Прогнозирование намерений водителя

Современные системы управления переходными режимами учитывают **намерения водителя** для упреждающего управления.

В работе по управлению переходными режимами подключённого гибрида используется **нечёткая нейронная сеть типа-2 (T2FNN)** для прогнозирования намерений водителя. Прогнозируемое намерение водителя используется для расчёта желаемой скорости включения муфты. Это позволяет адаптировать управление к стилю вождения — спортивный стиль требует более быстрых переключений, спокойный — более плавных.

5.3. Обучение с подкреплением

Методы **обучения с подкреплением** (Reinforcement Learning) начинают применяться для оптимизации управления переходными режимами. Алгоритм обучается выбирать оптимальные действия (момент муфты, скорость включения) для максимизации вознаграждения (минимальные рывки при минимальных потерях энергии).

Хотя эта область активно развивается, уже существуют исследования по применению обучения с подкреплением для управления энергией гибридов, и можно ожидать распространения этих методов на управление муфтами.

6. Практические примеры и результаты

6.1. Управление переходом из EV в HEV в двухсцепной трансмиссии

В работе по физическому моделированию электрогидравлических трансмиссий с двойным сцеплением показано, что при переключении с EV-режима на HEV-режим:

- Давление в камере управления муфтой на стороне ДВС повышается.
- Давления в магистральном трубопроводе и камере управления муфтой на стороне электродвигателя падают.
- При неправильном управлении это может привести к пробуксовке муфты на стороне электродвигателя при высоких нагрузках.

На основе физической модели могут быть получены оптимальные управляющие команды для минимальных потерь энергии при приемлемом времени включения и достаточной передаче крутящего момента. Модель также позволяет прогнозировать гистерезис между управляющим током и давлением при включении и выключении муфты.

6.2. Управление переходом для полноприводного HEV с DCT

Для полноприводного гибридного автомобиля с DCT разработан робастный алгоритм управления переходными режимами. Алгоритм использует преимущества быстрой и точной реакции по крутящему моменту (или скорости) трёх электрических источников питания и полностью вовлекает муфту DCT в процесс перехода.

Структура управления включает:

- Модели ключевых компонентов трансмиссии.
- Модель продольной динамики автомобиля с пятью степенями свободы с использованием Uni-Tire модели.
- Многоступенчатый метод оптимального управления для принятия решений по крутящему моменту ДВС и крутящему моменту муфты.
- Скользящее управление на этапе разгона ДВС.
- Двойная архитектура слежения (feedforward + H∞ robust feedback) на этапе синхронизации скоростей.

Результаты из MATLAB/Simulink и HIL-тестов подтверждают, что стратегия координирует крутящий момент между различными источниками мощности и муфтой при минимизации продольных рывков и обеспечивает высокую робастность к неопределённостям модели и внешним возмущениям.

6.3. Снижение рывков и потерь энергии

В работе по иерархическому робастному адаптивному управлению параметры управления оптимизируются с помощью PSO для поиска компромисса между рывками автомобиля и потерями энергии на пробуксовку муфты.

В работе по управлению переходными режимами с предписанной производительностью показано, что слишком быстрое включение муфты вызывает рывки и ухудшает комфорт, а слишком медленное — вызывает потери энергии на трение. Предложенный контроллер PPFTC обеспечивает оптимальный баланс между этими противоречивыми требованиями.

В работе по скользящему координированному управлению показано, что предложенная стратегия не только обеспечивает более быстрое переключение режимов, но и значительно снижает продольные рывки.

7. Закрепление и завершение

7.1. Мини-тест

1. Какие три основных состояния выделяют в диаграмме состояний фрикционной муфты?
2. Почему управление фрикционными муфтами в гибридных трансмиссиях является сложной задачей?
3. Какие основные этапы включает переходный процесс при подключении ДВС?
4. Какие методы интеллектуального управления применяются для управления муфтами?

5. В чём заключается фундаментальный компромисс при управлении муфтой?

7.2. Эталонные краткие ответы

1. **Три основных состояния:** движение поршня (поршень перемещается, фрикционные диски не контактируют), пробуксовка муфты (диски контактируют, но вращаются с разной скоростью, передаётся крутящий момент) и муфта включена (скорости синхронизированы, пробуксовка отсутствует).
2. Управление муфтами сложно из-за **фрикционной прерывистости** (скачкообразное изменение передаваемого момента), **различия динамических характеристик** источников мощности (электродвигатель — быстрый, ДВС — медленный), **неопределённости параметров** (износ, температура, производственные отклонения), **нелинейности гидравлической системы** (гистерезис) и **конфликта целей** (скорость vs плавность).
3. **Основные этапы:** предварительное заполнение гидросистемы, подготовка ДВС (разгон до скорости синхронизации), пробуксовка муфты (основное регулирование), синхронизация скоростей, полное включение муфты, передача управления (torque handover).
4. Применяются **управление на основе эталонной модели (MRC)** , **иерархическое робастное адаптивное скользящее управление (RASMC)** , **нечёткая логика**, **модельное прогнозирующее управление (MPC)** , **управление с конечным временем**, **управление с предписанной производительностью (PPFTC)** , а также **наблюдатели состояния** для оценки недоступных величин.
5. **Фундаментальный компромисс:** слишком быстрое включение муфты → минимальные потери энергии на трение, но высокие рывки и ухудшение комфорта; слишком медленное включение → минимальные рывки, но значительные потери энергии на трение. Задача системы управления — найти оптимальный баланс между скоростью включения и плавностью.

7.3. Итоговые положения

Фрикционные муфты являются ключевыми исполнительными элементами гибридных трансмиссий, обеспечивающими подключение и отключение ДВС, переключение передач и режимов работы.

Управление муфтами является сложной задачей из-за фрикционной прерывистости, различия динамических характеристик ДВС и электродвигателя, неопределённости параметров, нелинейности гидравлической системы и конфликта целей.

Диаграмма состояний муфты включает три состояния: движение поршня, пробуксовка и полное включение.

Переходный процесс при подключении ДВС включает этапы предварительного заполнения, подготовки ДВС, пробуксовки, синхронизации, полного включения и передачи управления.

Иерархическая архитектура управления переходными режимами включает верхний уровень (стратегическое планирование), средний уровень (координация крутящих моментов) и нижний уровень (исполнительное управление).

Интеллектуальные методы управления включают MRC, RASMC, нечёткую логику, MPC, скользящее управление с конечным временем, PPFTC, наблюдатели состояния и прогнозирование намерений водителя.

Фундаментальный компромисс между скоростью включения муфты и плавностью переключения требует оптимизации параметров управления.

Задание после лекции

Выберите один из методов управления фрикционными муфтами гибридных трансмиссий (MRC, RASMC, нечёткая логика, MPC, скользящее управление, PPFTC) и подготовьте аналитический обзор (2–3 страницы), в котором:

1. Опишите выбранный метод и его применение для управления муфтами.
2. Объясните математические и логические принципы, лежащие в его основе.
3. Проанализируйте преимущества и ограничения метода.
4. Приведите примеры из научных исследований или промышленности.
5. Оцените перспективы применения метода в будущих системах управления.

Контрольные вопросы

1. Какую роль выполняют фрикционные муфты в гибридных трансмиссиях?
2. Какие типы муфт используются в гибридных трансмиссиях?
3. Почему управление фрикционными муфтами является сложной задачей?
4. Что такое фрикционная прерывистость и как она влияет на управление?
5. Какие три состояния выделяют в диаграмме состояний муфты?
6. Что происходит на этапе «движение поршня»?
7. Что происходит на этапе «пробуксовка муфты»?
8. Что происходит на этапе «муфта включена»?
9. Какие этапы включает переходный процесс при подключении ДВС?

10. Что такое предварительное заполнение гидросистемы?
11. Как выполняется подготовка ДВС перед включением муфты?
12. Что такое синхронизация скоростей и почему она важна?
13. Что такое передача управления (torque handover)?
14. Опишите иерархическую архитектуру управления переходными режимами.
15. Какие функции выполняет верхний уровень управления?
16. Какие функции выполняет средний уровень управления?
17. Какие функции выполняет нижний уровень управления?
18. В чём заключается принцип управления на основе эталонной модели (MRC)?
19. Что такое переопределённая система (overactuated system) в контексте управления муфтами?
20. Как работает иерархическое робастное адаптивное скользящее управление (RASMC)?
21. Для чего используется алгоритм роя частиц (PSO) при управлении муфтами?
22. Как нечёткая логика применяется для управления муфтами?
23. Что такое иерархическая стратегия нечёткого управления гидравлическим давлением муфты?
24. Как модельное прогнозирующее управление (MPC) используется для подавления крутильных колебаний?
25. Что такое контроллер с предписанной производительностью и фиксированным временем (PPFTC)?
26. В чём заключается проблема координации крутящих моментов при переходных режимах?
27. Какие стратегии используются для координации крутящих моментов?
28. В чём заключается фундаментальный компромисс при управлении муфтой?
29. Как наблюдатели состояния используются для управления муфтами?
30. Как прогнозирование намерений водителя улучшает управление переходными режимами?
31. Каковы перспективы применения обучения с подкреплением для управления муфтами?
32. Какие результаты показывают физические модели электрогидравлических систем управления муфтами?
33. Как управление переходными режимами влияет на комфорт и эффективность гибридного автомобиля?
34. Каковы основные вызовы при разработке систем управления переходными режимами?
35. Каковы перспективы развития систем управления фрикционными муфтами гибридных трансмиссий?

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. Ding J., Jiao X. Efficient hierarchical robust adaptive control of mode transition for parallel hybrid electric vehicles // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. — 2022. — DOI: 10.1177/09544070221104652.
8. Chiang C.-J., Singh A. K., Chang P. I.-T., Yen Y.-H. 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.
9. Torque Coordination Control During Mode Transition for a Series–Parallel Hybrid Electric Vehicle // Scilit.
10. Optimal control of mode transition for four-wheel-drive hybrid electric vehicle with dry dual-clutch transmission // Elsevier.
11. Jin Z., Gao Z. Research on Torque Distribution and Switching Quality Optimization Control of Multi-mode HEV // Journal of Mechanical Engineering. — 2026.
12. Dynamic Coordinated Control of Power-Split Hybrid Electric Vehicle Based on Fixed-Time Adding a Power Integrator // IEEE Transactions on Vehicular Technology. — 2025. — Vol. 74, No. 10. — P. 15523–15535.
13. Sliding mode coordinated control of hybrid electric vehicle via finite-time control technique // Elsevier. — 2024.
14. Mode transition prescribed performance control of connected hybrid electric vehicles based on driver intention fuzzy prediction // Elsevier. — 2023.

15. Torsional Vibration Suppression During Mode Transition Process in a Parallel Hybrid Electric Vehicle Based on Multiple Model Predictive Control // IEEE Access. — 2024.
16. Coordinated Clutch Slip Control for The Engine Start with Power-On Downshift in a P2 Hybrid Automatic Transmission // TRID. — 2025.
17. Configurations and Control Strategies of Hybrid Powertrain Systems // MDPI. — 2023.
18. ISO 26262:2018. Road Vehicles — Functional Safety. Parts 1–10. — Geneva: International Organization for Standardization, 2018.
19. ISO/SAE 21434:2021. Road Vehicles — Cybersecurity Engineering. — Geneva: International Organization for Standardization, 2021.

Электронные ресурсы

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