ЛЕКЦИЯ 4
КЛАССИФИКАЦИЯ И ДИНАМИКА ГИБРИДНЫХ ТРАНСМИССИЙ. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНАЯ, ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО-ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ СХЕМЫ. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПОТОКОВ МОЩНОСТИ

Цель

Сформировать у обучающихся системное представление о классификации гибридных трансмиссий, их архитектурных особенностях, принципах работы и динамических характеристиках. Рассмотреть последовательную, параллельную и последовательно-параллельную схемы гибридных приводов, освоить методы математического моделирования потоков мощности в гибридных силовых установках.

Планируемые результаты

После изучения данной лекции обучающийся сможет:

- классифицировать гибридные трансмиссии по архитектурным признакам;
- объяснять принципы работы последовательной, параллельной и последовательно-параллельной гибридных схем;
- описывать потоки мощности в различных типах гибридных трансмиссий;
- применять математические модели для анализа распределения мощности в гибридной силовой установке;
- анализировать преимущества и ограничения различных архитектур гибридных трансмиссий;
- оценивать эффективность гибридных систем на основе математического описания потоков мощности.

Проблемный вопрос

Вопрос занятия. Гибридный автомобиль сочетает два источника энергии — двигатель внутреннего сгорания и электродвигатель. Но как именно их объединить? Должны ли они работать последовательно, когда ДВС только заряжает батарею, или параллельно, когда оба двигателя передают мощность на колёса? А может быть, лучше использовать сложную комбинацию, которая позволяет переключаться между режимами в зависимости от условий? Как выбрать оптимальную архитектуру и как математически описать потоки мощности, чтобы оценить эффективность каждого решения?

1. Введение в классификацию гибридных трансмиссий

Гибридные транспортные средства представляют собой класс автомобилей, в которых для привода используются два или более источника энергии.

Наиболее распространённой конфигурацией является сочетание двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и одного или нескольких электрических двигателей (электромоторов) с тяговой аккумуляторной батареей. Такая комбинация позволяет использовать преимущества обоих типов силовых установок: высокую энергетическую плотность топлива ДВС и высокий КПД электродвигателя в городском цикле, возможность рекуперации энергии при торможении и снижение выбросов вредных веществ.

Ключевым элементом гибридного автомобиля, определяющим его эффективность и эксплуатационные характеристики, является **трансмиссия** — система, обеспечивающая передачу и преобразование мощности от источников энергии к ведущим колёсам. Именно архитектура трансмиссии определяет, каким образом потоки мощности от ДВС и электродвигателя суммируются, распределяются и преобразуются.

В основе классификации гибридных трансмиссий лежит способ соединения источников энергии с ведущими колёсами. По этому признаку выделяют **три основных типа** гибридных силовых установок:

1. **Последовательные (series)** гибриды.
2. **Параллельные (parallel)** гибриды.
3. **Последовательно-параллельные (series-parallel)** гибриды,

также называемые **комбинированными** или **смешанными**.

Кроме того, существует подкласс последовательно-параллельных трансмиссий — **трансмиссии с разделением мощности (power-split)** , в которых используется планетарный механизм для распределения потоков мощности.

Каждая из этих архитектур имеет свои преимущества и ограничения, которые определяют область их применения. Выбор конкретной архитектуры зависит от множества факторов: целевого назначения автомобиля, требуемых динамических характеристик, условий эксплуатации, стоимости и сложности производства.

2. Последовательная гибридная трансмиссия

2.1. Принцип работы последовательной схемы

В **последовательной гибридной трансмиссии** (series hybrid) двигатель внутреннего сгорания не имеет механической связи с ведущими колёсами. ДВС работает исключительно как **генератор** — он приводит во вращение электрогенератор, который вырабатывает электрическую энергию. Эта энергия либо напрямую питает электродвигатель (тяговый электромотор), либо заряжает тяговую аккумуляторную батарею, либо делает и то, и другое одновременно. Колёса приводятся во вращение **исключительно электродвигателем**.

Таким образом, поток мощности в последовательной схеме выглядит следующим образом:

ДВС → Генератор → (Батарея / Инвертор) → Тяговый электродвигатель → Трансмиссия → Колёса.

Важно отметить, что в этой схеме ДВС и колёса **не связаны механически** — вся передача мощности происходит через электрическую цепь. Это является ключевым отличием последовательной схемы от параллельной.

2.2. Режимы работы последовательной схемы

В зависимости от условий движения и состояния батареи последовательная гибридная система может работать в нескольких режимах:

Режим 1 — Чисто электрический (EV Mode). ДВС выключен, батарея питает электродвигатель. Этот режим используется при движении на короткие расстояния, в городском цикле, при низких скоростях, а также при движении задним ходом.

Режим 2 — Последовательный гибридный режим (Series Hybrid Mode). ДВС работает, приводя генератор. Электроэнергия от генератора питает электродвигатель, а избыток (при необходимости) заряжает батарею. Этот режим используется, когда заряд батареи недостаточен для движения в EV-режиме, но условия движения не требуют максимальной мощности (например, движение в городском цикле со средними скоростями).

Режим 3 — Режим подзарядки (Charge Mode). ДВС работает с повышенной мощностью, обеспечивая питание электродвигателя и одновременно интенсивную зарядку батареи. Этот режим используется, когда необходимо восстановить заряд батареи, например, перед въездом в зону с ограничением выбросов.

Режим 4 — Режим максимальной мощности. ДВС и батарея работают совместно, обеспечивая максимальную мощность на электродвигателе. Этот режим используется при интенсивном разгоне или движении на подъём.

Режим 5 — Рекуперативное торможение. Электродвигатель работает в режиме генератора, преобразуя кинетическую энергию автомобиля в электрическую и заряжая батарею.

2.3. Преимущества последовательной схемы

Последовательная гибридная трансмиссия обладает рядом существенных преимуществ:

Работа ДВС в оптимальной зоне. Поскольку ДВС не связан механически с колёсами, он может работать в наиболее эффективном режиме независимо от скорости автомобиля. Это особенно важно для ДВС, максимальный КПД которого достигается в узком диапазоне оборотов и нагрузки. В последовательной схеме ДВС всегда можно загрузить так, чтобы он работал с максимальной эффективностью.

Простота управления. Управление последовательной схемой относительно простое: не требуется синхронизировать работу ДВС и электродвигателя на механическом уровне. Основная задача управления — оптимальное распределение мощности между ДВС-генератором и батареей.

Отсутствие механической трансмиссии. В последовательной схеме нет необходимости в сложной механической трансмиссии с переключением

передач. Это упрощает конструкцию, снижает вес и повышает надёжность. Достаточно простого редуктора между электродвигателем и колёсами.

Гибкость компоновки. ДВС-генератор может быть расположен в любом месте автомобиля, поскольку он не требует механической связи с колёсами. Это даёт свободу в компоновке, что особенно важно для автомобилей с ограниченным пространством.

Высокая эффективность в городском цикле. В условиях частых остановок и разгонов последовательная схема позволяет максимально использовать рекуперацию и держать ДВС в оптимальном режиме.

2.4. Ограничения последовательной схемы

Несмотря на преимущества, последовательная схема имеет и существенные ограничения:

Двойное преобразование энергии. Механическая энергия ДВС преобразуется в электрическую (генератором), а затем снова в механическую (электродвигателем). Каждое преобразование связано с потерями, что снижает общий КПД системы. Суммарные потери могут составлять 10-20% от мощности.

Ограниченная максимальная мощность. Мощность на колёсах ограничена мощностью электродвигателя, который, в свою очередь, ограничен мощностью генератора и батареи. Для достижения высокой пиковой мощности требуется мощный (и дорогой) электродвигатель и соответствующая батарея.

Большая масса и стоимость. Наличие двух электрических машин (генератора и тягового электродвигателя), а также мощной батареи увеличивает массу и стоимость автомобиля.

Низкая эффективность на трассе. При движении с постоянной скоростью на трассе двойное преобразование энергии приводит к более высокому расходу топлива по сравнению с параллельной схемой, где есть прямая механическая передача.

2.5. Примеры последовательных гибридов

Классическим примером последовательной гибридной схемы является **Chevrolet Volt** первого поколения (в некоторых режимах работы). Также последовательная схема используется в некоторых коммерческих автомобилях, автобусах и большегрузных машинах, где преимущества работы ДВС в оптимальном режиме перевешивают потери на двойное преобразование.

В легковых автомобилях чисто последовательная схема встречается редко из-за низкой эффективности на трассе. Однако она широко применяется в качестве одного из режимов работы последовательно-параллельных систем.

3. Параллельная гибридная трансмиссия

3.1. Принцип работы параллельной схемы

В **параллельной гибридной трансмиссии** (parallel hybrid) и двигатель внутреннего сгорания, и электродвигатель имеют **механическую связь с ведущими колёсами**. Оба двигателя могут передавать мощность на трансмиссию одновременно или по отдельности. Электродвигатель в параллельной схеме обычно размещается между ДВС и трансмиссией (так называемая P2-конфигурация) или непосредственно на валу трансмиссии.

Поток мощности в параллельной схеме может реализовываться по двум основным направлениям:

Механический путь: ДВС → Сцепление/Муфта → Трансмиссия → Колёса.

Электрический путь: Батарея → Инвертор → Электродвигатель → Трансмиссия → Колёса (при движении); или Колёса → Трансмиссия → Электродвигатель → Инвертор → Батарея (при рекуперации).

В параллельной схеме ДВС и электродвигатель **механически суммируют** свои крутящие моменты на входе трансмиссии. Это означает, что общий крутящий момент на колёсах равен сумме моментов ДВС и электродвигателя (с учётом передаточных отношений).

3.2. Классификация параллельных схем по расположению электродвигателя

Параллельные гибридные схемы классифицируются по расположению электродвигателя относительно ДВС и трансмиссии. Эта классификация известна как **P-классификация** (от Position) и включает следующие типы:

P0 — Электродвигатель на ремне. Электродвигатель (обычно интегрированный стартер-генератор, ISG) соединён с коленчатым валом ДВС через ременную передачу. Этот тип обеспечивает ограниченную электрическую мощность и используется в основном для систем «старт-стоп» и рекуперации.

P1 — Электродвигатель на коленвале. Электродвигатель установлен непосредственно на коленчатом валу ДВС, между ДВС и сцеплением. Обеспечивает более высокую мощность, чем P0, но всё ещё ограничен.

P2 — Электродвигатель между ДВС и трансмиссией. Электродвигатель установлен между ДВС и коробкой передач, с отдельным сцеплением с каждой стороны. Это наиболее распространённая конфигурация для параллельных гибридов. Позволяет использовать электродвигатель для движения, рекуперации и запуска ДВС.

P3 — Электродвигатель на выходе трансмиссии. Электродвигатель установлен на выходном валу трансмиссии или непосредственно на ведущем валу. Это позволяет использовать электродвигатель независимо от ДВС и коробки передач, но требует дополнительного места.

P4 — Электродвигатель на отдельной оси. Электродвигатель установлен на отдельной оси (например, задней), не связанной с ДВС. Это позволяет реализовать полный привод без механической связи между осями.

3.3. Режимы работы параллельной схемы

Параллельная гибридная система может работать в нескольких режимах:

Режим 1 — Движение только на ДВС. Электродвигатель выключен, ДВС передаёт мощность через трансмиссию на колёса. Используется при движении на трассе с постоянной скоростью, когда ДВС работает в эффективном режиме.

Режим 2 — Движение только на электродвигателе (EV Mode). ДВС выключен и отключён от трансмиссии, электродвигатель передаёт мощность на колёса. Используется при движении на короткие расстояния, в городском цикле, при низких скоростях.

Режим 3 — Гибридный режим (Hybrid Mode). ДВС и электродвигатель работают совместно, суммируя крутящий момент на входе трансмиссии. Обеспечивает максимальную мощность при разгоне или движении на подъём.

Режим 4 — Режим подзарядки. ДВС передаёт мощность на колёса и одновременно вращает электродвигатель, который работает в режиме генератора, заряжая батарею. Используется для восстановления заряда батареи.

Режим 5 — Рекуперативное торможение. При торможении электродвигатель работает в режиме генератора, преобразуя кинетическую энергию в электрическую и заряжая батарею.

3.4. Преимущества параллельной схемы

Параллельная гибридная трансмиссия обладает рядом важных преимуществ:

Высокий КПД на трассе. При движении с постоянной скоростью ДВС может напрямую передавать мощность на колёса без промежуточных преобразований, что обеспечивает высокий КПД.

Высокая пиковая мощность. ДВС и электродвигатель могут работать совместно, обеспечивая суммарную мощность, превышающую мощность каждого из них по отдельности.

Меньшая масса и стоимость по сравнению с последовательной схемой. В параллельной схеме требуется только одна электрическая машина (электродвигатель), которая может работать и как генератор. Это снижает массу и стоимость.

Возможность использования существующих трансмиссий. Параллельная схема может быть реализована на базе существующих механических трансмиссий с минимальными изменениями, что упрощает производство.

Гибкость управления. Параллельная схема позволяет выбирать оптимальный режим работы в зависимости от условий движения и состояния батареи.

3.5. Ограничения параллельной схемы

Основные ограничения параллельной схемы:

ДВС не всегда работает в оптимальном режиме. В параллельной схеме ДВС механически связан с колёсами, поэтому его обороты и нагрузка

зависят от скорости автомобиля. Это ограничивает возможность поддерживать ДВС в зоне максимального КПД.

Сложность управления. Требуется координация работы ДВС и электродвигателя, синхронизация их скоростей, управление сцеплениями и муфтами.

Ограниченная эффективность в городском цикле. В условиях частых остановок и разгонов ДВС часто работает в неэффективных режимах, что снижает общий КПД.

Требования к батарее. Для обеспечения эффективной работы в EV-режиме и режиме рекуперации требуется батарея с достаточной ёмкостью и мощностью.

3.6. Примеры параллельных гибридов

Параллельная гибридная схема широко применяется в автомобильной промышленности. Примерами являются:

Honda Insight (первое поколение) — один из первых массовых параллельных гибридов.

Volkswagen Golf GTE — параллельный гибрид с P2-конфигурацией.

BMW i8 — параллельный гибрид с P4-конфигурацией (электродвигатель на передней оси, ДВС на задней).

Mercedes-Benz S-Class Plug-in Hybrid — параллельный гибрид с P2-конфигурацией.

4. Последовательно-параллельная гибридная трансмиссия

4.1. Принцип работы последовательно-параллельной схемы

Последовательно-параллельная гибридная трансмиссия (series-parallel hybrid), также называемая **комбинированной** или **смешанной**, объединяет в себе преимущества последовательной и параллельной схем. Она может работать как в последовательном, так и в параллельном режиме, в зависимости от условий движения. Ключевым элементом последовательно-параллельной схемы является **устройство разделения мощности** (power-split device), которое позволяет распределять поток мощности от ДВС между механическим (на колёса) и электрическим (на генератор) путями.

В последовательно-параллельной схеме ДВС может:

1. Передавать мощность непосредственно на колёса через механическую трансмиссию (параллельный режим).
2. Передавать мощность на генератор для выработки электроэнергии, которая питает электродвигатель и/или заряжает батарею (последовательный режим).
3. Делать и то, и другое одновременно, разделяя мощность между механическим и электрическим путями (режим разделения мощности).

Наиболее распространённым устройством разделения мощности является **планетарный механизм** (planetary gear set). В планетарном механизме

три основных элемента: солнечная шестерня (sun gear), водило с сателлитами (carrier) и коронная шестерня (ring gear). Каждый из этих элементов может быть соединён с ДВС, генератором и/или выходным валом трансмиссии, что позволяет реализовать различные режимы работы.

4.2. Основные режимы работы последовательно-параллельной схемы

Режим 1 — EV Mode. ДВС выключен, батарея питает электродвигатель, который передаёт мощность на колёса. Используется при движении на короткие расстояния, в городском цикле, при низких скоростях.

Режим 2 — Последовательный режим (Series Mode). ДВС работает, приводя генератор. Электроэнергия от генератора питает электродвигатель, а избыток заряжает батарею. Механической связи между ДВС и колёсами нет. Используется при низких скоростях, когда ДВС неэффективен при прямой механической передаче.

Режим 3 — Параллельный режим (Parallel Mode). ДВС и электродвигатель работают совместно, передавая мощность на колёса через механическую трансмиссию. Используется при высоких скоростях и высоких нагрузках, когда прямая механическая передача эффективна.

Режим 4 — Режим двигателя (Engine-Solo Mode). Только ДВС передаёт мощность на колёса через механическую трансмиссию. Электродвигатель выключен или работает в режиме генератора. Используется при движении на трассе с постоянной скоростью.

Режим 5 — Режим разделения мощности (Power-Split Mode). ДВС работает, разделяя мощность между механическим путём (на колёса) и электрическим (на генератор). Генератор вырабатывает электроэнергию, которая питает электродвигатель, добавляющий мощность к механическому потоку. Это позволяет ДВС работать в оптимальном режиме независимо от скорости автомобиля.

Режим 6 — Рекуперативное торможение. Электродвигатель работает в режиме генератора, преобразуя кинетическую энергию в электрическую и заряжая батарею.

4.3. Трансмиссии с разделением мощности (Power-Split)

Особый подкласс последовательно-параллельных трансмиссий — **трансмиссии с разделением мощности** (power-split transmissions). В этих трансмиссиях используется планетарный механизм для непрерывного (бесступенчатого) изменения передаточного отношения. По сути, такая трансмиссия является **электрически регулируемой бесступенчатой трансмиссией (e-CVT)**.

Принцип работы power-split трансмиссии. ДВС соединён с одним из элементов планетарного механизма (обычно с водилом). Другой элемент соединён с генератором, а третий — с выходным валом трансмиссии (через электродвигатель). Изменяя скорость вращения генератора (а значит, и

электродвигателя), можно непрерывно изменять передаточное отношение от ДВС к колёсам.

Преимущества power-split трансмиссий:

- Бесступенчатое изменение передаточного отношения.
- Возможность поддерживать ДВС в оптимальном режиме независимо от скорости.
- Высокая эффективность в широком диапазоне скоростей.
- Плавность и комфорт.

Недостатки power-split трансмиссий:

- Сложность конструкции и управления.
- Более высокая стоимость по сравнению с параллельными схемами.
- Потери на циркуляцию мощности в некоторых режимах.

4.4. Примеры последовательно-параллельных гибридов

Наиболее известными примерами последовательно-параллельных гибридов являются:

Toyota Hybrid System (THS). Используется в Toyota Prius, Camry Hybrid, RAV4 Hybrid и других моделях. Это классическая power-split трансмиссия с планетарным механизмом, обеспечивающая бесступенчатое изменение передаточного отношения. Toyota Prius THS-IV является одним из наиболее совершенных примеров последовательно-параллельной DHT.

Honda i-MMD (Intelligent Multi-Mode Drive). Используется в Honda Accord Hybrid, CR-V Hybrid и других моделях. Эта система может работать в EV-режиме, последовательном режиме и режиме прямой механической передачи (на высоких скоростях).

Chevrolet Volt (второе поколение). Использует последовательно-параллельную схему с двумя электродвигателями и несколькими муфтами, позволяющую реализовать различные режимы работы.

5. Сравнительный анализ архитектур

5.1. Сравнение по эффективности

Характеристика	Последовательная	Параллельная	Последовательно-параллельная
КПД в городском цикле	Высокий	Средний	Высокий
КПД на трассе	Низкий	Высокий	Высокий
КПД в смешанном цикле	Средний	Средний	Высокий
Возможность работы ДВС в оптимальной зоне	Высокая	Ограниченная	Высокая

Характеристика	Последовательная	Параллельная	Последовательно-параллельная
Потери на преобразование	Высокие	Низкие	Средние

5.2. Сравнение по сложности и стоимости

Характеристика	Последовательная	Параллельная	Последовательно-параллельная
Количество электрических машин	2 (генератор + мотор)	1 (мотор-генератор)	1-2
Наличие механической трансмиссии	Нет	Да	Да
Сложность управления	Низкая	Средняя	Высокая
Стоимость	Высокая	Средняя	Высокая

5.3. Выбор архитектуры в зависимости от применения

Городские автомобили. Для автомобилей, эксплуатируемых преимущественно в городском цикле, оптимальной является последовательная или последовательно-параллельная схема, обеспечивающая высокую эффективность при частых остановках и разгонах.

Автомобили для трассы. Для автомобилей, эксплуатируемых преимущественно на трассе, предпочтительна параллельная схема, обеспечивающая высокий КПД при движении с постоянной скоростью.

Универсальные автомобили. Для автомобилей смешанного применения оптимальна последовательно-параллельная схема, сочетающая преимущества обеих архитектур.

Спортивные автомобили. Для спортивных автомобилей важна высокая пиковая мощность, поэтому часто используется параллельная схема с мощным электродвигателем, обеспечивающая максимальную суммарную мощность.

Коммерческие автомобили и автобусы. Для тяжёлых коммерческих автомобилей и автобусов часто используется последовательная схема, позволяющая ДВС работать в оптимальном режиме независимо от дорожной ситуации.

6. Математическое описание потоков мощности

Математическое описание потоков мощности в гибридных трансмиссиях является основой для анализа эффективности, проектирования систем управления и оптимизации режимов работы. Рассмотрим основные математические модели для каждого типа трансмиссий.

6.1. Общие принципы моделирования

При математическом описании гибридной трансмиссии используются следующие основные величины:

- **Мощность** (P, Вт) — скорость передачи энергии.
- **Крутящий момент** (T, Н·м) — вращающее усилие.
- **Угловая скорость** (ω, рад/с) — скорость вращения.
- **КПД** (η) — отношение полезной мощности к затраченной.

Основное соотношение, связывающее мощность, крутящий момент и угловую скорость:

$$\mathbf{P = T \cdot \omega}$$

Для анализа потоков мощности в гибридных трансмиссиях используется **метод графов связей** (bond graph method). Этот метод позволяет наглядно представить структуру системы и потоки мощности между её элементами. Графы связей используются для моделирования кинематики и динамики различных конфигураций гибридных трансмиссий.

6.2. Модель последовательной гибридной трансмиссии

В последовательной гибридной трансмиссии поток мощности описывается следующей системой уравнений.

Мощность ДВС:

$$\mathbf{P_{ICE} = T_{ICE} \cdot \omega_{ICE}}$$

где P_{ICE} — мощность ДВС,
T_{ICE} — крутящий момент ДВС,
ω_{ICE} — угловая скорость ДВС.

Мощность генератора:

$$\mathbf{P_{gen} = \eta_{gen} \cdot P_{ICE}}$$

где P_{gen} — электрическая мощность генератора,
η_{gen} — КПД генератора.

Мощность батареи (заряд/разряд):

$$\mathbf{P_{batt} = P_{gen} - P_{motor}} \text{ (при разряде)}$$
$$\mathbf{P_{batt} = P_{motor} - P_{gen}} \text{ (при заряде)}$$

где P_{batt} — мощность батареи (положительная при разряде),
P_{motor} — мощность, потребляемая электродвигателем.

Мощность электродвигателя:

$$\mathbf{P_{motor} = \eta_{motor} \cdot (P_{gen} + P_{batt})} \text{ (при разряде)}$$
$$\mathbf{P_{motor} = (P_{gen} + P_{batt}) / \eta_{motor}} \text{ (при заряде)}$$

где η_{motor} — КПД электродвигателя (в режиме мотора или генератора соответственно).

Мощность на колёсах:

$$\mathbf{P_{wheel} = \eta_{trans} \cdot P_{motor}}$$

где P_{wheel} — мощность на колёсах,
η_{trans} — КПД трансмиссии (редуктора).

Общий КПД последовательной схемы:

$\mathbf{\eta_{total} = \eta_{ICE} \cdot \eta_{gen} \cdot \eta_{motor} \cdot \eta_{trans}}$ (при работе от ДВС через генератор)

где η_{ICE} — КПД ДВС в текущем режиме.

6.3. Модель параллельной гибридной трансмиссии

В параллельной гибридной трансмиссии ДВС и электродвигатель механически суммируют свои крутящие моменты.

Суммарный крутящий момент на входе трансмиссии:

$$\mathbf{T_{total} = T_{ICE} + T_{motor}}$$

где T_{total} — суммарный крутящий момент,
T_{ICE} — крутящий момент ДВС,
T_{motor} — крутящий момент электродвигателя.

Мощность ДВС:

$$\mathbf{P_{ICE} = T_{ICE} \cdot \omega_{ICE}}$$

Мощность электродвигателя:

$$\mathbf{P_{motor} = T_{motor} \cdot \omega_{motor}}$$

Суммарная мощность:

$$\mathbf{P_{total} = P_{ICE} + P_{motor}}$$

(при условии $\omega_{ICE} = \omega_{motor}$, что обычно выполняется в параллельной схеме)

Мощность на колёсах:

$\mathbf{P_{wheel} = \eta_{trans} \cdot P_{total}}$ (при прямой передаче)

Мощность батареи:

$\mathbf{P_{batt} = P_{motor} / \eta_{motor}}$ (при разряде)

$\mathbf{P_{batt} = P_{motor} \cdot \eta_{motor}}$ (при заряде, когда электродвигатель работает как генератор)

Общий КПД параллельной схемы зависит от режима работы:

- При работе только на ДВС: $\mathbf{\eta_{total} = \eta_{ICE} \cdot \eta_{trans}}$
- При работе только на электродвигателе: $\mathbf{\eta_{total} = \eta_{batt} \cdot \eta_{motor} \cdot \eta_{trans}}$

– При гибридном режиме:

$$\eta_{total} = (P_{ICE} \cdot \eta_{ICE} + P_{motor} \cdot \eta_{batt} \cdot \eta_{motor}) \cdot \eta_{trans} / P_{total}$$

где η_{batt} — КПД батареи (с учётом потерь при заряде/разряде).

6.4. Модель последовательно-параллельной трансмиссии с планетарным механизмом

Для последовательно-параллельной трансмиссии с планетарным механизмом (power-split) математическое описание более сложное. Рассмотрим базовую модель планетарного механизма.

Кинематическое уравнение планетарного механизма:

$$\omega_s + k \cdot \omega_r = (k+1) \cdot \omega_c$$

где ω_s — угловая скорость солнечной шестерни,
ω_r — угловая скорость коронной шестерни,
ω_c — угловая скорость водила,
k — передаточное отношение планетарного механизма (отношение числа зубьев коронной шестерни к числу зубьев солнечной).

Уравнение моментов (при установившемся режиме, без учёта потерь):

$$T_s / 1 = T_r / k = T_c / (k+1)$$ (с учётом направления)

где T_s — момент на солнечной шестерне,
T_r — момент на коронной шестерне,
T_c — момент на водиле.

Мощность на каждом элементе:

$$Ps = Ts \cdot \omega s$$
$$Pr = Tr \cdot \omega r$$
$$Pc = Tc \cdot \omega c$$

Баланс мощностей (без учёта потерь):

$$Ps + Pr + Pc = 0$$

В режиме разделения мощности ДВС соединён с одним элементом планетарного механизма (обычно с водилом), генератор — с другим (обычно с солнечной шестерней), а выходной вал — с третьим (обычно с коронной шестерней, через электродвигатель).

Мощность ДВС, передаваемая механически:

$$Pmech = Tc \cdot \omega c$$

Мощность ДВС, передаваемая электрически (через генератор):

$$P_{elec} = T_s \cdot \omega_s \cdot \eta_{gen}$$

Мощность на выходе (с учётом электродвигателя):

$$P_{out} = P_r + P_{motor}$$

где Pmotor — мощность, добавляемая электродвигателем, питаемым от генератора (и/или батареи).

Суммарный КПД power-split трансмиссии зависит от режима работы и распределения мощности между механическим и электрическим путями. В общем случае:

$$\eta_{total} = P_{out} / P_{ICE}$$

6.5. Моделирование переходных процессов

Для анализа динамики гибридных трансмиссий используются модели переходных процессов, описывающие поведение системы при изменении режимов работы (переключение между EV и Hybrid режимами, переключение передач и т.д.).

Уравнение динамики вращающихся масс:

$$J \cdot d\omega/dt = T_{drive} - T_{load}$$

где J — приведённый момент инерции,
ω — угловая скорость,
Tdrive — движущий момент,
Tload — момент сопротивления.

Модель батареи (упрощённая):

$$SOC(t) = SOC(0) - (1/C) \cdot \int I(t)\, dt$$

где SOC — состояние заряда,
C — ёмкость батареи,
I — ток батареи.

Модель электродвигателя (упрощённая):

$$T_{motor} = k_t \cdot I$$
$$V = k_e \cdot \omega + R \cdot I$$

где kt — коэффициент момента,
ke — коэффициент ЭДС,
R — сопротивление обмоток,

V — напряжение.

6.6. Анализ потоков мощности

Анализ потоков мощности в гибридных трансмиссиях позволяет определить:

- **Эффективность** системы в различных режимах работы.
- **Потери мощности** в каждом компоненте.
- **Циркуляцию мощности** (когда мощность передаётся по замкнутому контуру, что снижает общий КПД).
- **Оптимальные режимы** работы для минимизации расхода топлива.

Для анализа потоков мощности в последовательно-параллельных трансмиссиях с планетарным механизмом используется метод графов связей. Этот метод позволяет наглядно представить структуру системы и проанализировать потоки мощности в различных режимах работы.

Численные статические кривые, полученные на основе анализа потоков мощности, позволяют оценить максимальный крутящий момент на выходе трансмиссии в широком диапазоне скоростей автомобиля.

7. Интеллектуальное управление гибридными трансмиссиями

7.1. Задачи управления

Управление гибридной трансмиссией — сложная многокритериальная задача, включающая:

- **Выбор режима работы** (EV, последовательный, параллельный, power-split).
- **Распределение мощности** между ДВС и электродвигателем.
- **Управление переключением режимов** (обеспечение плавности и комфорта).
- **Управление батареей** (поддержание оптимального SOC, защита от перезаряда/переразряда).
- **Оптимизация расхода топлива** и выбросов.
- **Адаптация к стилю вождения** и условиям эксплуатации.

7.2. Методы интеллектуального управления

Для решения этих задач применяются методы искусственного интеллекта:

Нечёткая логика. Используется для принятия решений в условиях неопределённости. Например, для выбора режима работы на основе нечётких правил: «если скорость низкая И нагрузка малая И SOC высокий, то EV Mode».

Нейронные сети. Используются для прогнозирования (например, расхода энергии на маршруте) и для аппроксимации нелинейных зависимостей (например, оптимального распределения мощности).

Обучение с подкреплением. Используется для оптимизации стратегий управления. Алгоритм обучается выбирать оптимальные действия (режим, распределение мощности) для максимизации вознаграждения (минимизация расхода топлива).

Модельное прогнозирующее управление (MPC). Использует модель системы для прогнозирования будущего поведения и выбора оптимальных управляющих воздействий.

7.3. Оптимизация на основе математических моделей

Математические модели потоков мощности являются основой для разработки алгоритмов управления. На основе этих моделей можно:

- **Рассчитывать оптимальные карты управления** (зависимости управляющих параметров от условий движения).
- **Разрабатывать стратегии переключения режимов** с учётом эффективности в каждом режиме.
- **Оптимизировать параметры управления** (например, пороги переключения) для минимизации расхода топлива.
- **Прогнозировать энергопотребление** на маршруте.

8. Закрепление и завершение

8.1. Мини-тест

1. Какие три основных типа гибридных трансмиссий существуют?
2. В чём ключевое отличие последовательной схемы от параллельной?
3. Что такое P-классификация параллельных гибридов?
4. Какой элемент является ключевым в последовательно-параллельной трансмиссии с разделением мощности?
5. Какое основное уравнение описывает кинематику планетарного механизма?

8.2. Эталонные краткие ответы

1. **Три основных типа:** последовательная (series), параллельная (parallel) и последовательно-параллельная (series-parallel), также называемая комбинированной.
2. **Ключевое отличие:** в последовательной схеме ДВС не имеет механической связи с колёсами и работает только как генератор, а колёса приводятся исключительно электродвигателем. В параллельной схеме и ДВС, и электродвигатель имеют механическую связь с колёсами и могут передавать мощность на трансмиссию.
3. **P-классификация** — это классификация параллельных гибридов по расположению электродвигателя: P0 (на ремне), P1 (на коленвале), P2 (между ДВС и трансмиссией), P3 (на выходе трансмиссии), P4 (на отдельной оси).
4. **Ключевой элемент** — планетарный механизм (planetary gear set), который позволяет разделять поток мощности от ДВС между механическим и электрическим путями.

5. **Основное кинематическое уравнение планетарного механизма:** $\omega s + k \cdot \omega r = (k+1) \cdot \omega c$, где ωs — скорость солнечной шестерни, ωr — скорость коронной шестерни, ωc — скорость водила, k — передаточное отношение.

8.3. Итоговые положения

Гибридные трансмиссии классифицируются на три основных типа: последовательные, параллельные и последовательно-параллельные.

Последовательная схема характеризуется отсутствием механической связи между ДВС и колёсами. ДВС работает только как генератор. Обеспечивает высокую эффективность в городском цикле, но имеет низкий КПД на трассе из-за двойного преобразования энергии.

Параллельная схема характеризуется механической связью ДВС и электродвигателя с колёсами. Обеспечивает высокий КПД на трассе и высокую пиковую мощность, но ограничивает возможность работы ДВС в оптимальном режиме.

Последовательно-параллельная схема объединяет преимущества обеих архитектур. Использует устройство разделения мощности (обычно планетарный механизм) для распределения потока мощности между механическим и электрическим путями.

Трансмиссии с разделением мощности (power-split) являются подклассом последовательно-параллельных трансмиссий и обеспечивают бесступенчатое изменение передаточного отношения.

Математическое описание потоков мощности включает уравнения баланса мощности, кинематические и динамические уравнения. Для анализа используется метод графов связей.

Интеллектуальное управление гибридными трансмиссиями использует методы нечёткой логики, нейронных сетей, обучения с подкреплением и модельного прогнозирующего управления для оптимизации режимов работы и минимизации расхода топлива.

Задание после лекции

Выберите один из типов гибридных трансмиссий (последовательную, параллельную или последовательно-параллельную) и подготовьте аналитический обзор (2–3 страницы), в котором:

1. Опишите принцип работы выбранной трансмиссии.
2. Приведите структурную схему с указанием потоков мощности.
3. Опишите основные режимы работы.
4. Проанализируйте преимущества и ограничения.
5. Приведите примеры автомобилей, использующих данную архитектуру.
6. Разработайте упрощённую математическую модель потоков мощности для одного из режимов работы.

Контрольные вопросы

1. Какие основные типы гибридных трансмиссий существуют?
2. В чём заключается принцип работы последовательной гибридной трансмиссии?
3. Какие режимы работы характерны для последовательной схемы?
4. В чём преимущества и недостатки последовательной схемы?
5. В чём заключается принцип работы параллельной гибридной трансмиссии?
6. Что такое P-классификация и какие типы P-конфигураций существуют?
7. Какие режимы работы характерны для параллельной схемы?
8. В чём преимущества и недостатки параллельной схемы?
9. В чём заключается принцип работы последовательно-параллельной гибридной трансмиссии?
10. Что такое устройство разделения мощности и как оно работает?
11. Какие режимы работы характерны для последовательно-параллельной схемы?
12. Что такое трансмиссия с разделением мощности (power-split)?
13. В чём преимущества и недостатки последовательно-параллельной схемы?
14. Какие известные примеры последовательно-параллельных гибридов вы знаете?
15. Какой тип трансмиссии наиболее эффективен в городском цикле и почему?
16. Какой тип трансмиссии наиболее эффективен на трассе и почему?
17. Какое основное соотношение связывает мощность, крутящий момент и угловую скорость?
18. Как описывается баланс мощности в последовательной гибридной трансмиссии?
19. Как описывается баланс мощности в параллельной гибридной трансмиссии?
20. Какое кинематическое уравнение описывает планетарный механизм?
21. Для чего используется метод графов связей при анализе гибридных трансмиссий?
22. Какие методы искусственного интеллекта применяются для управления гибридными трансмиссиями?
23. Как математические модели потоков мощности используются для оптимизации управления?
24. Как выбирается архитектура гибридной трансмиссии в зависимости от применения автомобиля?
25. Каковы перспективы развития 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. Zhu G. G. Design and Control of Automotive Propulsion Systems. — Boca Raton: CRC Press, 2015. — 302 p. — ISBN 978-1-138-74866-8.
8. Comparative Analysis of Technical Route and Market Development for Light-Duty PHEV in China and the US // MDPI, 2019.
9. Study of Series-Parallel and Power-Split DHT for Hybrid Powertrains // Springer Professional, 2025.
10. Bond graph modelling and power flow analysis of series–parallel HEV transmissions // TRID, 2013.
11. Bond graph analysis of power flow in series-parallel hybrid electric vehicle transmissions // IEEE Xplore.
12. Powertrain configuration design for two mode power split hybrid electric vehicle // Scientific Reports, 2025.
13. Study and Analysis of a Multi-Mode Power Split Hybrid Transmission // MDPI, 2020.
14. Modelling and Control of a Two-mode Power-split Hybrid Powertrain // TRID, 2015.

Электронные ресурсы

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