ЛЕКЦИЯ 8
РЕКУПЕРАТИВНОЕ ТОРМОЖЕНИЕ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ. КООРДИНАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ В СИСТЕМЕ BRAKE-BY-WIRE

Цель

Сформировать у обучающихся системное представление о рекуперативном торможении как ключевом элементе повышения энергоэффективности электромобилей и гибридных транспортных средств. Рассмотреть принципы координации электрического (рекуперативного) и гидравлического (фрикционного) торможения в системах Brake-by-Wire, иерархические стратегии управления, методы интеллектуального распределения тормозных усилий, а также практические аспекты реализации в современных автомобилях.

Планируемые результаты

После изучения данной лекции обучающийся сможет:

- объяснять физические принципы рекуперативного торможения и его роль в повышении энергоэффективности;
- описывать архитектуру систем Brake-by-Wire и их отличие от традиционных тормозных систем;
- характеризовать ограничения рекуперативного торможения и причины, по которым требуется координация с гидравлическим торможением;
- объяснять принципы иерархического управления распределением тормозных усилий;
- анализировать применение методов модельного прогнозирующего управления, нечёткой логики, скользящего режима и глубокого обучения с подкреплением для координации торможения;
- оценивать влияние рекуперативного торможения на запас хода, износ тормозных колодок и комфорт водителя.

Вопрос занятия. Традиционный автомобиль тормозит, превращая кинетическую энергию в тепло — и это тепло бесполезно рассеивается в атмосферу. Электромобиль может делать иначе: превращать энергию торможения обратно в электричество и возвращать её в батарею. Это обещает существенное увеличение запаса хода. Но здесь возникает парадокс: чем эффективнее мы тормозим «электрически», тем меньше мы используем гидравлические тормоза. А что происходит, когда батарея полностью заряжена и не может принять энергию? Или когда водитель нажимает на педаль тормоза, а рекуперация внезапно падает из-за изменения температуры батареи? Как система Brake-by-Wire должна координировать работу электродвигателя и гидравлики так, чтобы водитель вообще не замечал этих переключений?

1. Введение в рекуперативное торможение

1.1. Что такое рекуперативное торможение?

Рекуперативное торможение (regenerative braking) — это процесс преобразования кинетической энергии движущегося автомобиля в электрическую энергию, которая может быть сохранена в тяговой батарее для последующего использования. В отличие от традиционного фрикционного торможения, где кинетическая энергия превращается в тепло и рассеивается, рекуперативное торможение позволяет вернуть часть энергии обратно в систему.

Принцип работы рекуперативного торможения основан на обратимости электрических машин. Электродвигатель, который в режиме тяги преобразует электрическую энергию в механическую, при торможении переводится в режим генератора. Кинетическая энергия автомобиля через колёса и трансмиссию передаётся на ротор электродвигателя, который начинает вращаться. При этом в обмотках статора индуцируется электродвижущая сила, и вырабатывается электрический ток. Этот ток через инвертор направляется в тяговую батарею, заряжая её. Одновременно с выработкой электроэнергии возникает электромагнитный тормозной момент, который замедляет вращение ротора, а значит, и колёс.

Важно понимать, что рекуперативное торможение — это не просто «бесплатная энергия». Это **управляемый процесс**, который требует точной координации с другими системами автомобиля. Нельзя просто остановить автомобиль, замкнув обмотки электродвигателя — это приведёт к резкому, неконтролируемому замедлению и, возможно, к блокировке колёс. Рекуперация должна быть дозированной, безопасной и незаметной для водителя.

1.2. Потенциал энергосбережения

Значимость рекуперативного торможения для энергоэффективности электромобилей трудно переоценить. В традиционных автомобилях с двигателем внутреннего сгорания от одной трети до половины энергии, затрачиваемой на движение, рассеивается при торможении. В городском цикле, где частые разгоны и торможения являются нормой, эти потери могут быть ещё выше.

Рекуперативное торможение позволяет возвращать значительную часть этой энергии обратно в батарею. По оценкам производителей, в некоторых электромобилях до 90% повседневных торможений выполняется электрически, без участия фрикционных тормозов. Это не только увеличивает запас хода, но и значительно снижает износ тормозных колодок, что сокращает эксплуатационные расходы.

Однако важно понимать, что рекуперация не может полностью заменить фрикционное торможение. Существуют ситуации, когда рекуперативное торможение либо недоступно, либо недостаточно эффективно. Именно поэтому требуется **гибридная тормозная система**, сочетающая рекуперативное и гидравлическое (фрикционное) торможение.

1.3. Ограничения рекуперативного торможения

Рекуперативное торможение имеет ряд физических и системных ограничений, которые делают необходимым использование гидравлических тормозов:

Ограничения по мощности батареи. Способность батареи принимать энергию при рекуперации ограничена. При высоком уровне заряда (SOC близок к 100%) батарея не может принять дополнительную энергию, и рекуперация должна быть ограничена или полностью отключена. При низких температурах скорость химических реакций в батарее снижается, что также ограничивает допустимый ток заряда.

Ограничения по скорости. При очень низких скоростях (например, при движении «накатом» перед полной остановкой) электродвигатель не может эффективно генерировать энергию. КПД рекуперации при низких оборотах резко падает.

Тепловые ограничения. При интенсивном рекуперативном торможении (например, при движении с горы) электродвигатель и инвертор могут перегреваться. При достижении температурных пределов система должна снизить рекуперацию или полностью отключить её.

Ограничения по сцеплению. Рекуперативное торможение воздействует на ведущие колёса. Если эти колёса теряют сцепление с дорогой (например, на скользком покрытии), рекуперация может привести к блокировке колёс или потере устойчивости.

Именно из-за этих ограничений рекуперативное торможение не может рассматриваться как единственное средство замедления. Оно должно быть интегрировано с гидравлической тормозной системой таким образом, чтобы в любой момент обеспечить требуемое замедление, независимо от состояния батареи, температуры или сцепления.

2. Системы Brake-by-Wire: архитектура и принципы работы

2.1. Что такое Brake-by-Wire?

Brake-by-Wire (BbW) — это технология управления тормозной системой, в которой механическая или гидравлическая связь между педалью тормоза и исполнительными механизмами (тормозными суппортами) заменяется **электрической** связью. Водитель нажимает на педаль, но его усилие не передаётся непосредственно на гидравлическую магистраль. Вместо этого датчики измеряют усилие и/или перемещение педали, и эти сигналы обрабатываются электронным блоком управления, который определяет, какое тормозное усилие должно быть создано и каким образом — за счёт рекуперации, гидравлики или их комбинации.

Ключевое отличие Brake-by-Wire от традиционных систем заключается в том, что **решение о том, как именно тормозить, принимает контроллер, а не водитель напрямую**. Водитель выражает лишь желание замедлиться

(через педаль), а система решает, как именно это желание реализовать с максимальной эффективностью и безопасностью.

В системах Brake-by-Wire педаль тормоза часто не имеет механической связи с главным тормозным цилиндром. Вместо этого используется **электронная педаль** (pedal emulator), которая создаёт искусственное усилие, имитирующее ощущение от традиционной педали. Это позволяет инженерам настраивать «чувство педали» программно, адаптируя его под различные режимы вождения.

2.2. Типы Brake-by-Wire систем

Существует несколько архитектур Brake-by-Wire, различающихся по степени отказа от гидравлики:

Электрогидравлические системы (Electro-Hydraulic Brake, EHB). В этих системах сохраняется гидравлическая магистраль, но управление давлением осуществляется электронно. Педаль не соединена напрямую с главным цилиндром — вместо этого используется электронный блок, который управляет гидравлическими клапанами и насосом для создания давления в тормозных суппортах. Это наиболее распространённый тип Brake-by-Wire, который часто называют «hydraulic brake-by-wire».

Примером является **iBooster** от Bosch — электромеханический усилитель тормозов, который может координировать гидравлическое торможение с рекуперацией в гибридных и электрических автомобилях. iBooster создаёт гидравлическое давление независимо от усилия водителя, что позволяет точно дозировать фрикционное торможение для компенсации изменений рекуперации.

Электромеханические системы (Electromechanical Brake, EMB). В этих системах гидравлика полностью отсутствует. Тормозное усилие создаётся непосредственно электродвигателями, установленными в каждом тормозном суппорте. Это так называемые «dry brakes» — сухие тормоза, в которых нет тормозной жидкости.

Brembo Sensify — одна из первых серийных электромеханических тормозных систем, которая вошла в производство в мае 2026 года. В этой системе управление торможением распределено непосредственно на каждое колесо. Continental выбрала промежуточный путь — «полусухую» архитектуру, где электромеханические тормоза установлены на задней оси, а гидравлические сохранены на передней.

Полностью электронные системы. Наиболее продвинутые системы, в которых управление торможением полностью интегрировано с другими системами управления автомобилем (ESP, ABS, Torque Vectoring, автономное вождение). В таких системах тормозная функция является частью общей платформы управления движением.

2.3. Преимущества Brake-by-Wire для рекуперативного торможения

Brake-by-Wire открывает принципиально новые возможности для координации рекуперативного и гидравлического торможения:

Точная компенсация. Когда рекуперативное торможение изменяется (например, из-за изменения SOC батареи), система Brake-by-Wire может мгновенно скорректировать гидравлическое давление, чтобы общее замедление осталось неизменным. Водитель не чувствует никаких изменений.

Оптимизация распределения. Система может в реальном времени выбирать оптимальное распределение между рекуперацией и гидравликой с учётом множества факторов: состояния батареи, температуры, скорости, сцепления, желаемого замедления.

Интеграция с другими системами. Brake-by-Wire легко интегрируется с ESP, ABS, Torque Vectoring и системами автономного вождения, обеспечивая согласованную работу всех систем управления движением.

Программируемое «чувство педали». Водительское ощущение от педали тормоза может настраиваться под различные режимы вождения — от «спортивного» с более жёсткой педалью до «комфортного» с более мягкой.

Именно эти преимущества делают Brake-by-Wire ключевой технологией для реализации эффективного рекуперативного торможения в современных электромобилях.

3. Задачи координации электрического и гидравлического торможения

3.1. Проблема различных динамических характеристик

Основная проблема координации рекуперативного и гидравлического торможения заключается в том, что эти два типа торможения имеют **принципиально разные динамические характеристики**.

Рекуперативное торможение (электрическое) характеризуется:

– Быстрым откликом (миллисекунды), ограниченным инерционностью инвертора и электродвигателя.
– Зависимостью от состояния батареи (SOC, температура).
– Зависимостью от скорости вращения электродвигателя.
– Ограничением по максимальному тормозному моменту.
– Отсутствием тормозного усилия при остановке (на нулевой скорости).

Гидравлическое торможение (фрикционное) характеризуется:

– Более медленным откликом (десятки миллисекунд), ограниченным сжимаемостью жидкости и инерционностью исполнительных механизмов.
– Более стабильной характеристикой, не зависящей от состояния батареи.
– Возможностью создания тормозного усилия на всех колёсах (не только ведущих).
– Возможностью создания тормозного усилия при полной остановке.

Различие в динамике создаёт проблему **blending** — плавного перехода между рекуперативным и гидравлическим торможением. Если рекуперация внезапно уменьшается (например, из-за достижения предела заряда батареи), а гидравлика не успевает компенсировать это уменьшение, водитель почувствует рывок — уменьшение замедления. И наоборот, если гидравлика

включается слишком быстро, когда рекуперация ещё активна, возникнет резкое увеличение замедления.

Цель системы управления — обеспечить **бесшовное переключение** (seamless blending), при котором водитель не чувствует никаких переходов, независимо от того, как меняется доля рекуперации.

3.2. Требования к педальному ощущению (Pedal Feel)

В Brake-by-Wire системах педаль тормоза не имеет прямой механической связи с гидравлической системой. Поэтому **педальное ощущение** (pedal feel) становится не физической характеристикой, а **задачей калибровки**.

Водитель ожидает, что:

- Усилие на педали растёт пропорционально ходу педали.
- Замедление растёт пропорционально усилию на педали.
- Связь между усилием и замедлением должна быть предсказуемой и стабильной.

Задача системы управления — сохранить это ожидаемое поведение независимо от того, какая доля замедления обеспечивается рекуперацией, а какая — гидравликой. Если рекуперация падает, гидравлика должна возрасти так, чтобы общее замедление осталось неизменным при том же усилии на педали. Это требует точного управления как гидравлическим давлением, так и моментом электродвигателя.

В некоторых системах педальное ощущение может адаптироваться под различные режимы вождения. Например, в спортивном режиме педаль может быть более «жёсткой» и отзывчивой, а в комфортном — более «мягкой».

3.3. Ограничения по сцеплению и ABS

При экстренном торможении или на скользком покрытии система сталкивается с дополнительными ограничениями. Антиблокировочная система (ABS) должна предотвращать блокировку колёс, модулируя тормозное усилие на каждом колесе.

Координация рекуперативного и гидравлического торможения при работе ABS — одна из сложнейших задач. Рекуперативное торможение воздействует только на ведущие колёса и не может регулироваться индивидуально для каждого колеса (если только это не автомобиль с индивидуальными мотор-колёсами). Гидравлическое торможение может регулироваться индивидуально для каждого колеса через ABS-клапаны.

При активации ABS система должна:

1. Обеспечить требуемое замедление без блокировки колёс.
2. Максимизировать рекуперацию энергии, где это возможно.
3. Координировать работу рекуперации и гидравлики так, чтобы они не вступали в конфликт.

Исследования показывают, что электродвигатели, используемые для рекуперации, могут улучшить работу ABS благодаря быстрому и точному управлению тормозным моментом. Однако это требует сложных алгоритмов координации.

4. Иерархические стратегии управления

Управление координацией рекуперативного и гидравлического торможения обычно организуется по **иерархическому принципу**. Это позволяет разделить сложную задачу на более простые подзадачи и обеспечить модульность системы.

4.1. Верхний уровень: распределение тормозного усилия

Верхний уровень управления отвечает за определение общего требуемого тормозного усилия (на основе сигнала от педали тормоза и/или от систем автономного вождения) и его распределение между рекуперативным и гидравлическим торможением.

Основные функции верхнего уровня:

Интерпретация действий водителя. Система анализирует сигналы от датчиков педали тормоза (усилие, ход, скорость нажатия) и определяет требуемое замедление. В некоторых системах используется **PSO-BP нейронная сеть** для определения интенсивности торможения по действиям водителя.

Расчёт максимальной доступной рекуперации. Система оценивает, сколько рекуперативного торможения доступно в текущий момент. Это зависит от:

- SOC и температуры батареи.
- Скорости автомобиля.
- Температуры электродвигателя и инвертора.
- Состояния сцепления колёс с дорогой.

Распределение тормозного усилия. На основе требуемого замедления и доступной рекуперации система определяет, какая доля замедления должна быть обеспечена рекуперацией, а какая — гидравликой. Целевая функция обычно включает:

- Максимизацию рекуперации энергии.
- Обеспечение плавности и стабильности.
- Соблюдение ограничений по безопасности.

Для решения задачи распределения на верхнем уровне часто используется **модельное прогнозирующее управление (MPC)** , которое позволяет учитывать ограничения и прогнозировать будущее поведение системы.

4.2. Средний уровень: управление замедлением и устойчивостью

Средний уровень управления отвечает за точное отслеживание заданного замедления и обеспечение устойчивости автомобиля. На этом уровне учитываются динамические характеристики шин, сцепление с дорогой и ограничения по боковой устойчивости.

Основные функции среднего уровня:

Регулирование замедления. Система сравнивает фактическое замедление (измеряемое акселерометрами) с заданным и корректирует распределение тормозного усилия для минимизации ошибки.

Управление скольжением колёс. При торможении на скользком покрытии система должна предотвращать блокировку колёс. Для этого используется регулировка скольжения шин (slip control). На этом уровне часто применяется **скользящее управление (Sliding Mode Control)**, которое обеспечивает робастность к изменениям коэффициента сцепления.

Координация с ABS. При активации ABS средний уровень управления координирует работу рекуперативного и гидравлического торможения для обеспечения максимальной эффективности и безопасности.

4.3. Нижний уровень: управление исполнительными механизмами

Нижний уровень управления отвечает за точное исполнение команд, поступающих от верхнего уровня. Он управляет непосредственно исполнительными механизмами: инвертором электродвигателя (для рекуперации) и гидравлическими клапанами/электродвигателями (для гидравлического торможения).

Основные функции нижнего уровня:

Управление инвертором. Формирование управляющих сигналов для инвертора для создания требуемого тормозного момента электродвигателя.

Управление гидравлическим давлением. Управление гидравлическими клапанами и насосами для создания требуемого давления в тормозных суппортах.

Двухконтурное управление. В системах EHB нижний уровень часто реализуется как **двухконтурный регулятор** (double closed-loop controller) для повышения точности и быстродействия.

4.4. Пример: иерархическое управление с eBooster

В работе, посвящённой координации рекуперативного торможения с eBooster, предложена следующая иерархическая структура:

1. **Верхний уровень (MPC).** На основе модели автомобиля и ограничений системы рассчитывает оптимальное распределение тормозного момента между рекуперацией и гидравликой. Учитывает целевые функции и ограничения.
2. **Нижний уровень (двухконтурный регулятор).** Учитывая характеристики eBooster, нижний уровень использует двухконтурный регулятор (внутренний контур — давление, внешний — положение) для повышения точности и быстродействия управления гидравлическим давлением.

Моделирование в среде Simulink/AMESim подтвердило, что такая иерархическая структура позволяет эффективно координировать рекуперативное и гидравлическое торможение, повышая безопасность и энергоэффективность.

5. Интеллектуальные методы управления

Современные системы управления рекуперативным торможением всё чаще используют методы искусственного интеллекта для повышения эффективности, адаптивности и робастности.

5.1. Модельное прогнозирующее управление (MPC)

Модельное прогнозирующее управление (Model Predictive Control, MPC) является одним из наиболее эффективных подходов к координации рекуперативного и гидравлического торможения.

MPC использует модель системы для прогнозирования её будущего поведения на конечном горизонте и выбора оптимальных управляющих воздействий, минимизирующих заданную целевую функцию при соблюдении ограничений.

В контексте рекуперативного торможения MPC может:

- Прогнозировать изменение состояния батареи (SOC) и температуры.
- Учитывать ограничения по максимальному току заряда батареи.
- Обеспечивать плавное изменение тормозного усилия (минимизация рывков).
- Учитывать динамику гидравлической системы (задержки, ограничения по скорости изменения давления).
- Адаптироваться к изменяющимся условиям (коэффициент сцепления, уклон дороги).

В работе, посвящённой иерархическому управлению с eBooster, MPC используется на верхнем уровне для распределения тормозного момента между рекуперацией и гидравликой. В другой работе предлагается **стохастический MPC**, который использует оценки коэффициента сцепления, уклона дороги и массы автомобиля для прогнозирования оптимального распределения на горизонте 200–300 мс.

Преимущества MPC включают:

- Способность учитывать ограничения в явном виде.
- Возможность оптимизации по нескольким критериям.
- Прогнозирующий характер, позволяющий упреждать изменения.

Недостатки — вычислительная сложность и необходимость точной модели системы.

5.2. Скользящее управление (Sliding Mode Control)

Скользящее управление (Sliding Mode Control, SMC) обеспечивает робастность к неопределённостям и внешним возмущениям, что особенно важно при управлении торможением на скользких покрытиях.

SMC используется на среднем уровне управления для регулировки скольжения колёс (slip control). Основная идея — удерживать систему на заданной «скользящей поверхности» (например, заданное значение скольжения шин), несмотря на возмущения (изменение коэффициента сцепления).

В работе по иерархическому управлению для электромобилей SMC используется на среднем уровне для точного регулирования скольжения шин, в то время как верхний уровень координирует распределение тормозного усилия. В другой работе SMC комбинируется с Fuzzy-TD3 для координации ABS и рекуперативного торможения при экстренном торможении.

Преимущества SMC:

- Высокая робастность.
- Относительная простота реализации.
- Быстрый отклик.

Недостатки — возможные «дребезжания» (chattering) на скользящей поверхности.

5.3. Нечёткая логика

Нечёткая логика позволяет принимать решения в условиях неопределённости, когда точная математическая модель недоступна. В системах рекуперативного торможения нечёткая логика может использоваться для:

- Классификации стиля вождения и адаптации параметров управления.
- Определения интенсивности торможения по действиям водителя.
- Формирования правил распределения тормозного усилия.

В работе по электрогидравлическому композитному торможению используется **PSO-BP нейронная сеть** для определения интенсивности торможения по действиям водителя. Это позволяет системе адаптироваться к различным стилям вождения.

5.4. Глубокое обучение с подкреплением (Deep Reinforcement Learning)

Глубокое обучение с подкреплением (Deep Reinforcement Learning, DRL) является одним из наиболее перспективных подходов к управлению рекуперативным торможением. DRL позволяет системе обучаться оптимальной стратегии управления методом проб и ошибок, без необходимости точной модели системы.

В работе, посвящённой координации электрогидравлического композитного торможения, предлагается использование **Fuzzy-TD3** (Fuzzy Twin Delayed Deep Deterministic Policy Gradient) алгоритма.

Особенности подхода:

1. **PSO-BP нейронная сеть** используется для определения интенсивности торможения по действиям водителя.
2. **Fuzzy-TD3 алгоритм** оптимизирует распределение рекуперативного и гидравлического тормозных моментов при нормальном торможении, обеспечивая эффективную рекуперацию энергии при сохранении стабильности и комфорта.
3. При экстренном торможении комбинируется **скользящее управление (SMC)** и Fuzzy-TD3 для координации ABS и рекуперации.

Результаты показывают, что по сравнению с традиционным PID-управлением:

– Время торможения снижается на 11,5% при нормальном торможении и на 9,5% при экстренном.

– SOC батареи увеличивается на 0,487% при нормальном и на 0,266% при экстренном торможении.

Эти результаты демонстрируют потенциал DRL для повышения эффективности и безопасности рекуперативного торможения.

5.5. Оптимизация с использованием роя частиц (PSO)

Метод роя частиц (Particle Swarm Optimization, PSO) используется для оптимизации параметров управления рекуперативным торможением.

В работе по PSO-оптимизированной системе рекуперативного торможения алгоритм PSO используется для оптимизации карты распределения тормозного момента, которая зависит от скорости и замедления. Цель оптимизации — максимизировать рекуперируемую энергию при соблюдении ограничений по тормозному пути и комфорту.

5.6. Гибридные модели (DNN-Decision Tree)

В работе по разработке стратегии управления рекуперативным торможением предлагается **гибридная модель DNN-Decision Tree** (Deep Neural Network — Decision Tree).

Модель обучается на оптимальном наборе данных, полученном с помощью **динамического программирования (DP)** , с учётом семи ключевых переменных: уклон дороги, скорость, SOC и другие.

Результаты показывают, что гибридная модель точно отслеживает DP-оптимальные моменты и превосходит эталонные методы, обеспечивая снижение потерь SOC на 1,26–5,06%, что соответствует практическому выигрышу в запасе хода 90–383 метра за цикл.

6. Практические примеры и результаты

6.1. Интегрированное оптимальное распределение тормозного момента (IOTD)

В работе, опубликованной в IEEE Transactions on Transportation Electrification, предлагается **интегрированная стратегия оптимального распределения тормозного момента (Integrated Optimal Torque Distribution, IOTD)** для электромобилей с независимым управлением каждым колесом.

Особенность этой стратегии заключается в том, что она устраняет разделение между распределением момента по осям, между колёсами и между системами (рекуперативной и фрикционной). Вместо этого весь процесс распределения момента **высокоинтегрирован**.

Результаты совместного моделирования и испытаний с аппаратным обеспечением в контуре (HIL) показывают:

– Улучшение устойчивости и экономичности.

- Увеличение скорости рекуперации энергии на 3,32% при комбинированном торможении.
- Приемлемая вычислительная нагрузка для работы в реальном времени.

Это демонстрирует, что интегрированный подход, при котором распределение момента рассматривается как единая задача оптимизации, может обеспечить лучшие результаты, чем иерархические подходы с разделением на подзадачи.

6.2. Архитектура Bosch iBooster

Bosch использует **iBooster** — электромеханический усилитель тормозов, который позволяет координировать гидравлическое торможение с рекуперацией.

В системе iBooster:

- Электронная педаль тормоза передаёт запрос водителя двум независимым гидравлическим приводам.
- iBooster создаёт гидравлическое давление независимо от усилия водителя.
- Это позволяет точно компенсировать изменения рекуперации, поддерживая постоянное замедление.

iBooster является примером **электрогидравлической Brake-by-Wire системы**, которая сохраняет гидравлическую магистраль, но управляет ей электронно.

6.3. Системы Brembo Sensify и Continental

Brembo Sensify — полностью электромеханическая тормозная система, которая вошла в серийное производство в мае 2026 года. В этой системе:

- Отсутствует тормозная жидкость («fluid-free»).
- Управление торможением распределено непосредственно на каждое колесо.
- Каждый тормозной суппорт имеет собственный электродвигатель для создания тормозного усилия.

Continental выбрала промежуточный подход — «полусухую» архитектуру:

- Электромеханические тормоза на задней оси.
- Гидравлические тормоза на передней оси.
- Это позволяет внедрить электронное управление без полной перестройки всей тормозной системы.

6.4. Audi Q8 e-tron: интегрированная тормозная система

Audi Q8 e-tron использует **электрогидравлически интегрированную тормозную систему**. Эта система обеспечивает эффективную рекуперацию, которая является технической предпосылкой для высокой эффективности автомобиля.

В Audi Q8 e-tron рекуперативное торможение интегрировано с гидравлической системой таким образом, что в большинстве повседневных ситуаций торможение выполняется электрически, без износа фрикционных колодок.

7. Вызовы и перспективы развития

7.1. Обеспечение надёжности и безопасности

Brake-by-Wire системы являются критически важными для безопасности. Отказ тормозной системы недопустим. Поэтому к ним предъявляются самые высокие требования по надёжности:

- **Резервирование.** В системах Brake-by-Wire используются два независимых источника питания, два независимых канала управления, резервные гидравлические или механические системы.
- **Диагностика.** Постоянный мониторинг состояния компонентов, обнаружение неисправностей.
- **Отказоустойчивость.** При отказе электроники система должна обеспечивать возможность безопасной остановки автомобиля.
- **Соответствие ISO 26262.** Brake-by-Wire системы должны соответствовать самому высокому уровню функциональной безопасности — ASIL-D.

7.2. Педальное ощущение при различных условиях

Обеспечение стабильного педального ощущения при изменяющихся условиях (разная температура, разный SOC, разные дорожные покрытия) остаётся сложной задачей. Водитель ожидает, что связь между усилием на педали и замедлением будет постоянной и предсказуемой.

Решение этой задачи требует:

- Точного моделирования динамики гидравлической системы.
- Адаптивных алгоритмов, компенсирующих изменения характеристик системы.
- Тщательной калибровки на всех режимах работы.

7.3. Совместимость с ABS при экстренном торможении

Координация рекуперативного и гидравлического торможения при работе ABS остаётся одной из наиболее сложных задач. При экстренном торможении на скользком покрытии система должна одновременно:

- Предотвращать блокировку колёс.
- Максимизировать рекуперацию энергии.
- Обеспечивать устойчивость автомобиля.

Разработка алгоритмов, эффективно решающих эту задачу, требует глубокого понимания динамики шин, характеристик электродвигателя и гидравлической системы.

7.4. Интеграция с системами автономного вождения

В полностью автономных автомобилях торможение будет выполняться не водителем, а системой управления движением. Это открывает новые возможности для оптимизации рекуперативного торможения, но также создаёт новые требования:

- Автономная система может планировать траекторию с учётом оптимального использования рекуперации.
- Требуется более высокий уровень интеграции с системами восприятия (камеры, радары, лидары) для прогнозирования дорожной ситуации.
- Требуется более высокий уровень надёжности, так как водитель не может мгновенно вмешаться в случае отказа.

7.5. Энергоэффективность и запас хода

Основная цель рекуперативного торможения — увеличение запаса хода электромобиля. Достижение максимальной эффективности требует:

- Оптимизации распределения тормозного усилия в реальном времени.
- Учёта состояния батареи (SOC, температура, возраст).
- Использования прогнозной информации (профиль маршрута, дорожные условия).

Современные исследования показывают, что использование методов искусственного интеллекта позволяет достичь средней эффективности рекуперации до 84,7%. Применение PSO-оптимизации карт распределения тормозного момента позволяет максимизировать рекуперируемую энергию без нарушения ограничений по тормозному пути и комфорту.

8. Закрепление и завершение

8.1. Мини-тест

1. Что такое рекуперативное торможение и в чём его основное преимущество?
2. Каковы основные ограничения рекуперативного торможения?
3. Что такое Brake-by-Wire и чем она отличается от традиционной тормозной системы?
4. В чём заключается основная проблема координации рекуперативного и гидравлического торможения?
5. Какие методы искусственного интеллекта применяются для управления рекуперативным торможением?

8.2. Эталонные краткие ответы

1. **Рекуперативное торможение** — это процесс преобразования кинетической энергии движущегося автомобиля в электрическую энергию, которая сохраняется в тяговой батарее. Основное преимущество — повышение энергоэффективности и увеличение запаса хода электромобиля.

2. **Основные ограничения:** ограничения по мощности заряда батареи (при высоком SOC или низкой температуре), низкая эффективность при малых скоростях, тепловые ограничения электродвигателя и инвертора, ограничения по сцеплению ведущих колёс с дорогой.

3. **Brake-by-Wire** — технология управления тормозной системой, при которой механическая или гидравлическая связь между педалью и исполнительными механизмами заменяется электрической. Решение о том, как именно тормозить, принимает контроллер, а не водитель напрямую.

4. **Основная проблема** — различные динамические характеристики рекуперативного (быстрый отклик, зависимость от состояния батареи) и гидравлического (более медленный отклик, стабильная характеристика) торможения. При изменении рекуперации гидравлика должна мгновенно компенсировать это изменение, чтобы водитель не чувствовал рывков.

5. Применяются **модельное прогнозирующее управление (MPC) , скользящее управление (SMC) , нечёткая логика**, **глубокое обучение с подкреплением (Fuzzy-TD3) , оптимизация роем частиц (PSO) , гибридные модели DNN-Decision Tree**.

8.3. Итоговые положения

Рекуперативное торможение — ключевая технология повышения энергоэффективности электромобилей, позволяющая возвращать в батарею энергию, которая в традиционных автомобилях рассеивается в виде тепла.

Ограничения рекуперации (состояние батареи, температура, скорость, сцепление) делают необходимой координацию с гидравлическим (фрикционным) торможением.

Brake-by-Wire — технология, заменяющая механическую связь между педалью и тормозными механизмами электрической, что позволяет точно координировать рекуперативное и гидравлическое торможение.

Координация торможения организована иерархически: верхний уровень распределяет усилие между рекуперацией и гидравликой, средний управляет замедлением и устойчивостью, нижний управляет исполнительными механизмами.

Интеллектуальные методы (MPC, SMC, нечёткая логика, глубокое обучение с подкреплением, PSO) позволяют повысить эффективность, адаптивность и робастность управления.

Практические примеры (IOTD, iBooster, Brembo Sensify, Audi Q8 e-tron) демонстрируют эффективность интеллектуального управления рекуперативным торможением.

Перспективы развития связаны с интеграцией в системы автономного вождения, повышением энергоэффективности и использованием прогнозной информации.

Задание после лекции

Выберите один из аспектов управления рекуперативным торможением (метод координации, алгоритм интеллектуального управления, конкретная реализация в автомобиле) и подготовьте аналитический обзор (2–3 страницы), в котором:

1. Опишите выбранный аспект и его роль в системе рекуперативного торможения.
2. Объясните физические и математические принципы, лежащие в его основе.
3. Проанализируйте преимущества и ограничения.
4. Приведите примеры из промышленности или научных исследований.
5. Сформулируйте рекомендации по дальнейшему развитию.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение рекуперативного торможения.
2. Каковы основные преимущества рекуперативного торможения?
3. Каковы основные ограничения рекуперативного торможения?
4. Почему рекуперативное торможение не может полностью заменить гидравлическое?
5. Что такое Brake-by-Wire и в чём её отличие от традиционной тормозной системы?
6. Какие типы Brake-by-Wire систем существуют?
7. В чём отличие электрогидравлической (EHB) системы от электромеханической (EMB)?
8. Каковы преимущества Brake-by-Wire для координации рекуперативного торможения?
9. В чём заключается проблема различных динамических характеристик рекуперативного и гидравлического торможения?
10. Что такое «blending» в контексте рекуперативного торможения?
11. Почему педальное ощущение (pedal feel) является важной задачей в Brake-by-Wire системах?
12. Каковы особенности координации рекуперативного и гидравлического торможения при работе ABS?
13. Опишите иерархическую структуру управления рекуперативным торможением.
14. Какие функции выполняет верхний уровень управления?
15. Какие функции выполняет средний уровень управления?
16. Какие функции выполняет нижний уровень управления?
17. Как модельное прогнозирующее управление (MPC) применяется для координации торможения?

18. Как скользящее управление (SMC) применяется для управления торможением?

19. Как нечёткая логика применяется в системах рекуперативного торможения?

20. Что такое Fuzzy-TD3 и как он применяется для координации электрогидравлического торможения?

21. Как метод роя частиц (PSO) используется для оптимизации рекуперативного торможения?

22. Что такое гибридная модель DNN-Decision Tree и как она применяется?

23. В чём заключается интегрированная стратегия оптимального распределения тормозного момента (IOTD)?

24. Как работает система Bosch iBooster?

25. В чём особенности Brembo Sensify и Continental «полусухой» архитектуры?

26. Каковы основные вызовы при разработке систем управления рекуперативным торможением?

27. Как рекуперативное торможение влияет на износ тормозных колодок?

28. Как рекуперативное торможение влияет на запас хода электромобиля?

29. Как температура батареи влияет на доступность рекуперативного торможения?

30. Каковы перспективы развития систем управления рекуперативным торможением?

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.

Дополнительная литература

4. Integrated Optimal Control Strategy of Electromechanical Hybrid Braking System for Four-Wheel Independent Drive/Brake Electric Vehicles // IEEE

Transactions on Transportation Electrification. — 2025. — Vol. 11, Issue 6. — P. 13727–13741. — DOI: 10.1109/TTE.2025.11137804.

5. Guo H., Zhao X., Liu J., Zhu F., Chen H., Cao D. Hierarchical coordinated control strategy for regenerative braking energy recuperation with an electrobooster // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. — 2024. — Vol. 238, Issue 5. — P. 1249–1262.

6. A novel hierarchical controller for efficient and safe blending of hydraulic and regenerative braking systems in electric vehicles // International Journal of Dynamics and Control. — 2025. — Vol. 13. — Article 328.

7. Research on coordinated control of electro-hydraulic composite braking for an electric vehicle based on the Fuzzy-TD3 deep reinforcement learning algorithm // Engineering Applications of Artificial Intelligence. — 2025. — DOI: 10.1016/j.engappai.2025.110115.

8. PSO-Optimized Regenerative Braking System for Enhanced Range Efficiency in EVs // IEEE Xplore. — 2026.

9. Artificial Intelligence Enabled Regenerative Braking Optimization Framework for Energy Efficient Electric Vehicles // IEEE Xplore. — 2026.

10. Development of Deep Neural Network—Decision Tree Hybrid Control Strategy for Regenerative Braking in Electric Vehicles // IET Intelligent Transport Systems. — 2026.

11. How brake-by-wire is changing regenerative braking control and validation // EV Engineering Online. — 2026.

12. How To Balance response time and regeneration coordination in Brake-by-Wire Systems // Eureka. — 2026.

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

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

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.

18. ScienceDirect. Scientific and Technical Publications Database. — Режим доступа: https://www.sciencedirect.com.