ЛЕКЦИЯ 6
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ КРУТЯЩИМ МОМЕНТОМ TORQUE VECTORING. АЛГОРИТМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОМЕНТА МЕЖДУ КОЛЁСАМИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ И УПРАВЛЯЕМОСТИ

Цель

Сформировать у обучающихся системное представление о технологии Torque Vectoring, её роли в повышении устойчивости и управляемости автомобиля. Рассмотреть принципы работы, архитектуру и алгоритмы распределения крутящего момента между колёсами, а также методы интеллектуального управления, применяемые в современных системах Torque Vectoring для электромобилей и гибридных транспортных средств.

Планируемые результаты

После изучения данной лекции обучающийся сможет:

- дать определение Torque Vectoring и объяснить его отличие от традиционных систем управления тягой;
- описать иерархическую архитектуру системы управления Torque Vectoring;
- объяснить принципы расчёта прямого курсового момента для стабилизации автомобиля;
- охарактеризовать методы распределения крутящего момента между колёсами;
- описать применение модельного прогнозирующего управления, нечёткой логики и машинного обучения в системах Torque Vectoring;
- анализировать практические примеры реализации Torque Vectoring в современных электромобилях.

Вопрос занятия. Традиционные системы стабилизации, такие как ESP, вмешиваются в управление только когда автомобиль уже начинает терять устойчивость — они «гасят» занос или снос. Но что если система может активно формировать поведение автомобиля в повороте, распределяя крутящий момент между колёсами так, чтобы он поворачивал именно так, как нужно водителю, а не вопреки его желанию? Технология Torque Vectoring обещает не просто спасать от потери управления, а превращать каждый поворот в точное, предсказуемое и захватывающее движение. Как это работает и какие алгоритмы позволяют автомобилю «чувствовать» дорогу лучше, чем это может сделать человек?

1. Введение в Torque Vectoring

1.1. Что такое Torque Vectoring?

Torque Vectoring (TV) — это технология активного распределения крутящего момента между колёсами автомобиля для управления его курсовой устойчивостью и поворачиваемостью. В отличие от традиционных систем, которые просто ограничивают пробуксовку или притормаживают колёса для стабилизации, Torque Vectoring **активно создаёт** управляющий момент, заставляя автомобиль поворачивать в желаемом направлении.

Ключевая идея Torque Vectoring заключается в создании **прямого курсового момента** (Direct Yaw Moment, DYM) — вращающего момента вокруг вертикальной оси автомобиля. Этот момент возникает за счёт разности продольных сил на левых и правых колёсах. Если на правое колесо подать больший крутящий момент, чем на левое, автомобиль будет стремиться повернуть налево, и наоборот.

В традиционных автомобилях с механическим дифференциалом крутящий момент распределяется между колёсами оси поровну (в случае открытого дифференциала) или с некоторым смещением (в случае самоблокирующегося дифференциала). Torque Vectoring позволяет **произвольно изменять** распределение момента в широких пределах — вплоть до передачи 100% момента на одно колесо.

1.2. Эволюция систем управления тягой

Чтобы понять место Torque Vectoring среди других систем, полезно проследить эволюцию технологий управления тягой и устойчивостью:

Антиблокировочная система тормозов (ABS). Первая электронная система, вмешивающаяся в управление. Предотвращает блокировку колёс при торможении, сохраняя управляемость.

Противобуксовочная система (TCS — Traction Control System). Ограничивает пробуксовку ведущих колёс при разгоне, снижая мощность или притормаживая колесо.

Электронная система стабилизации (ESP/ESC — Electronic Stability Control). Обнаруживает потерю устойчивости (занос или снос) и притормаживает отдельные колёса, создавая корректирующий момент, возвращающий автомобиль на траекторию.

Torque Vectoring. Активно распределяет крутящий момент между колёсами не только для стабилизации, но и для улучшения управляемости в поворотах, создавая дополнительный поворачивающий момент.

Ключевое отличие Torque Vectoring от ESP заключается в **проактивности**. ESP реагирует на уже возникшую потерю устойчивости. Torque Vectoring может работать превентивно, формируя желаемое поведение автомобиля ещё до того, как он начнёт отклоняться от траектории.

1.3. Преимущества Torque Vectoring

Технология Torque Vectoring обеспечивает ряд существенных преимуществ:

Повышение курсовой устойчивости. Активное распределение момента позволяет эффективно противодействовать заносу и сносу в широком диапазоне условий.

Улучшение управляемости в поворотах. Автомобиль становится более «острым» и предсказуемым при входе в поворот. Водитель может проходить повороты на более высокой скорости с тем же уровнем комфорта и безопасности.

Снижение недостаточной и избыточной поворачиваемости. Torque Vectoring позволяет корректировать баланс автомобиля в повороте, делая его более нейтральным.

Повышение энергоэффективности. В электромобилях с индивидуальным управлением колёсами оптимальное распределение момента позволяет снизить потери энергии.

Улучшение тяговых характеристик на неоднородных покрытиях. На дорогах с разным сцеплением под колёсами (split-μ) Torque Vectoring обеспечивает оптимальное распределение тяги.

2. Физические основы управления курсовой устойчивостью

2.1. Модель автомобиля для анализа устойчивости

Для понимания принципов Torque Vectoring необходимо рассмотреть базовую модель динамики автомобиля. Простейшая модель, используемая для анализа курсовой устойчивости, — это **модель велосипеда** (bicycle model), в которой левые и правые колёса каждой оси объединены в одно.

В этой модели состояние автомобиля описывается двумя основными переменными:

Угловая скорость рыскания (yaw rate) r — скорость поворота автомобиля вокруг вертикальной оси.

Угол бокового скольжения (sideslip angle) β — угол между продольной осью автомобиля и вектором его скорости.

Уравнения движения для модели велосипеда имеют вид:

$$m \cdot (\dot{v} + r \cdot v) = F_{yf} + F_{yr}$$
$$I_z \cdot \dot{r} = a \cdot F_{yf} — b \cdot F_{yr} + M_z$$

где:

m — масса автомобиля,

v — продольная скорость,

r — угловая скорость рыскания,

F_{yf}, F_{yr} — боковые силы на передней и задней осях,

I_z — момент инерции автомобиля относительно вертикальной оси,

a, b — расстояния от центра масс до передней и задней осей,
M_z — внешний курсовой момент (создаваемый Torque Vectoring).

Боковые силы F_{yf} и F_{yr} зависят от углов увода шин (slip angles) и коэффициента сцепления. В линейной области эта зависимость может быть аппроксимирована как:

$$F_{yf} = C_f \cdot \alpha_f$$
$$F_{yr} = Cr \cdot \alpha_r$$

где Cf, C_r — коэффициенты боковой жёсткости шин,
α_f, α_r — углы увода.

Углы увода, в свою очередь, связаны с углом поворота рулевого колеса δ, угловой скоростью рыскания r и углом бокового скольжения β.

2.2. Недостаточная и избыточная поворачиваемость

Поведение автомобиля в повороте характеризуется понятиями недостаточной и избыточной поворачиваемости.

Недостаточная поворачиваемость (understeer) — состояние, при котором автомобиль поворачивает меньше, чем ожидает водитель. Передние колёса теряют сцепление первыми, автомобиль «выносит» наружу поворота.

Избыточная поворачиваемость (oversteer) — состояние, при котором автомобиль поворачивает больше, чем ожидает водитель. Задние колёса теряют сцепление первыми, автомобиль «заносит».

Нейтральная поворачиваемость — идеальное состояние, при котором автомобиль точно следует траектории, задаваемой поворотом руля.

Torque Vectoring позволяет активно управлять балансом поворачиваемости, смещая его в нужную сторону. При недостаточной поворачиваемости система может подать больший момент на внешнее заднее колесо, создавая момент, «втягивающий» автомобиль в поворот. При избыточной поворачиваемости — подать момент на внешнее переднее колесо или задействовать рекуперативное торможение на внутреннем заднем, стабилизируя автомобиль.

2.3. Прямой курсовой момент (Direct Yaw Moment, DYM)

Прямой курсовой момент M_z является ключевым параметром управления в Torque Vectoring. Он создаётся за счёт разности продольных сил на левых и правых колёсах.

Для автомобиля с индивидуальным управлением каждым колесом (например, с четырьмя мотор-колёсами) полный курсовой момент может быть выражен как:

$$Mz = (T_{FL} + T_{FR} + T_{RL} + T_{RR}) \cdot (d/2) / R_w$$

где T_{FL}, T_{FR}, T_{RL}, T_{RR} — крутящие моменты на каждом колесе (с учётом знака: положительные — тяга, отрицательные — рекуперация),

d — колея,

R_w — радиус колеса.

Задача системы управления — рассчитать требуемый прямой курсовой момент M_{zdes}, а затем распределить его между колёсами с учётом ограничений по сцеплению, состоянию батареи и другим факторам.

Расчёт требуемого момента обычно выполняется на основе сравнения текущего состояния автомобиля с желаемым. Желаемая угловая скорость рыскания r_{des} определяется на основе скорости автомобиля и угла поворота рулевого колеса:

$$\mathbf{r_{des} = v \cdot \delta / (L \cdot (1 + K_{us} \cdot v^2))}$$

где L — колёсная база,

K_{us} — коэффициент недостаточной поворачиваемости.

Система управления стремится минимизировать ошибку между текущей и желаемой угловой скоростью рыскания, формируя соответствующий корректирующий момент.

3. Архитектура системы управления Torque Vectoring

3.1. Иерархическая структура

Система управления Torque Vectoring обычно строится по **иерархическому принципу** с разделением на два или три уровня. Такая архитектура позволяет разделить сложную задачу на более простые подзадачи и обеспечить модульность системы.

Верхний уровень — управление курсовой устойчивостью. На этом уровне система анализирует поведение автомобиля, сравнивает текущие параметры (угловую скорость рыскания, угол бокового скольжения) с желаемыми и вычисляет требуемый прямой курсовой момент M_z_des.

Основные функции верхнего уровня:

– Интерпретация действий водителя (угол поворота руля, положение педали акселератора).

– Оценка состояния автомобиля (скорость, ускорение, угловая скорость рыскания).

– Расчёт желаемой угловой скорости рыскания.

– Вычисление ошибки управления и требуемого корректирующего момента.

Нижний уровень — распределение крутящего момента. На этом уровне полученный требуемый курсовой момент распределяется между отдельными колёсами с учётом ограничений.

Основные функции нижнего уровня:

- Распределение общего требуемого момента между колёсами.
- Учёт ограничений по сцеплению шин с дорогой (friction ellipse).
- Учёт ограничений по мощности электродвигателей и состоянию батареи.
- Оптимизация распределения для минимизации энергопотребления.
- Формирование управляющих сигналов для инверторов или тормозных механизмов.

Дополнительный уровень — координация с другими системами. В современных автомобилях Torque Vectoring интегрируется с другими активными системами: активным рулевым управлением (Active Front Steering, AFS), активной подвеской, системой ESP. На этом уровне разрешаются возможные конфликты между системами и обеспечивается согласованная работа.

3.2. Датчики и источники информации

Для работы системы Torque Vectoring необходима информация о состоянии автомобиля и окружающей обстановке. Основные источники:

Инерциальный измерительный блок (IMU). Измеряет продольное и поперечное ускорения, угловую скорость рыскания. Является ключевым датчиком для оценки состояния автомобиля.

Датчики скорости вращения колёс. Используются для расчёта скорости автомобиля, выявления пробуксовки, оценки сцепления.

Датчик угла поворота рулевого колеса. Определяет желание водителя по изменению направления движения.

Датчик положения педали акселератора. Определяет желание водителя по ускорению.

Навигационная система (GPS/ГЛОНАСС). Обеспечивает информацию о положении и скорости автомобиля, может использоваться для прогнозирования.

Камеры и радары ADAS. Предоставляют информацию о дорожной ситуации, кривизне дороги, других участниках движения.

3.3. Исполнительные механизмы

В зависимости от архитектуры автомобиля Torque Vectoring может реализовываться различными способами:

Индивидуальные электродвигатели на каждом колесе (in-wheel motors). Обеспечивают максимальную гибкость управления. Каждое колесо имеет свой электродвигатель, что позволяет независимо управлять моментом на каждом колесе.

Два электродвигателя на оси (dual-motor e-Axle). Каждая ось имеет два электродвигателя, каждый из которых управляет своим колесом. Это обеспечивает Torque Vectoring на уровне оси.

Активный дифференциал (Torque Vectoring Differential). Механическое устройство, которое может перераспределять крутящий момент между колёсами оси. Управляется электронно.

Тормозные механизмы. В некоторых реализациях Torque Vectoring использует выборочное притормаживание колёс для создания курсового момента (как в ESP, но с более точным управлением).

4. Алгоритмы распределения крутящего момента

4.1. Правила распределения

Простейший подход к распределению крутящего момента — использование правил (rule-based). Эти правила могут быть основаны на эмпирических зависимостях, полученных в ходе испытаний.

Базовое распределение. В нормальных условиях момент распределяется поровну между колёсами оси.

Корректировка при повороте. При повороте момент смещается на внешнее колесо для создания поворачивающего момента. Величина смещения зависит от скорости, угла поворота руля и поперечного ускорения.

Корректировка при потере сцепления. При обнаружении пробуксовки одного из колёс момент перераспределяется на колесо с лучшим сцеплением.

Правила могут быть реализованы в виде таблиц (look-up tables) или нечётких логических выражений.

4.2. Оптимизационное распределение

Более сложный подход — формулировка задачи распределения момента как **задачи оптимизации**. В этом случае система решает оптимизационную задачу в реальном времени, находя распределение момента, которое минимизирует заданную целевую функцию при соблюдении ограничений.

Целевая функция может включать:

- Минимизацию потерь энергии в электродвигателях и шинах.
- Минимизацию износа шин.
- Минимизацию отклонения от желаемого курсового момента.
- Максимизацию запаса сцепления.

Ограничения могут включать:

- Максимальный крутящий момент каждого электродвигателя.
- Максимальная мощность батареи.
- Ограничения по сцеплению шин с дорогой (friction ellipse).
- Ограничения по температуре компонентов.

Решение оптимизационной задачи в реальном времени требует значительных вычислительных ресурсов, но обеспечивает наилучшее качество управления.

4.3. Иерархическое распределение

В иерархическом подходе распределение момента выполняется в два этапа:

Этап 1 — Распределение между осями (Axle Torque Vectoring, ATV). Определяется, какая доля общего момента должна быть передана на переднюю и заднюю оси. Это распределение влияет на баланс продольных сил и, косвенно, на курсовую устойчивость.

Этап 2 — Распределение между колёсами оси. Для каждой оси определяется распределение момента между левым и правым колесом для создания требуемого прямого курсового момента.

Такой подход упрощает задачу и позволяет использовать различные стратегии для каждого уровня.

4.4. Учёт ограничений по сцеплению

Ключевым ограничением при распределении момента является **сцепление шины с дорогой**. Каждая шина может передавать ограниченную продольную и боковую силу. Соотношение между этими силами описывается **эллипсом сцепления** (friction ellipse):

$$(F_x / F_{xmax})^2 + (F_y / F_{ymax})^2 \leq 1$$

где Fx — продольная сила,

Fy — боковая сила,

F_{xmax} и F_{ymax} — максимальные продольная и боковая силы, определяемые коэффициентом сцепления и вертикальной нагрузкой.

Система Torque Vectoring должна распределять момент так, чтобы не превышать это ограничение ни на одном колесе. В противном случае колесо может потерять сцепление, что приведёт к потере управляемости.

5. Интеллектуальные методы управления Torque Vectoring

Современные системы Torque Vectoring всё чаще используют методы искусственного интеллекта для повышения эффективности и адаптивности.

5.1. Модельное прогнозирующее управление (MPC)

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

В контексте Torque Vectoring MPC может:

- Прогнозировать будущее состояние автомобиля на основе текущих измерений и модели динамики.
- Учитывать ограничения по сцеплению, мощности и другим параметрам.
- Оптимизировать распределение момента для минимизации расхода энергии или максимизации устойчивости.
- Адаптироваться к изменяющимся условиям (коэффициент сцепления, профиль дороги).

Исследования показывают, что MPC обеспечивает значительное улучшение управляемости по сравнению с традиционными rule-based контроллерами. В работе, посвящённой нелинейному MPC для распределения момента между осями и тормозными механизмами, показано, что такой подход позволяет снизить ошибки по угловой скорости рыскания и потери мощности в тормозных механизмах.

MPC особенно эффективен в сочетании с **физически обоснованными моделями**, которые учитывают нелинейные характеристики шин и динамику автомобиля.

5.2. Скользящий режим управления (Sliding Mode Control)

Скользящий режим управления (Sliding Mode Control, SMC) — это метод робастного управления, обеспечивающий устойчивость системы к неопределённостям и внешним возмущениям.

В контексте Torque Vectoring SMC может использоваться для:

- Стабилизации угловой скорости рыскания и угла бокового скольжения.
- Обеспечения робастности к изменениям коэффициента сцепления и неровностям дороги.
- Быстрой реакции на возмущения.

В исследовании, посвящённом робастному и энергоэффективному Torque Vectoring для электромобиля с четырьмя мотор-колёсами, предложен двухуровневый контроллер. Верхний уровень использует скользящий режим для управления прямым курсовым моментом и продольной силой. Нижний уровень использует MPC для распределения момента между колёсами. Такой подход обеспечивает как робастность, так и энергоэффективность.

5.3. Нечёткая логика

Нечёткая логика позволяет принимать решения в условиях неопределённости, когда точная математическая модель недоступна или слишком сложна.

В системах Torque Vectoring нечёткая логика может использоваться для:

- Классификации стиля вождения и адаптации параметров управления.
- Определения степени потери устойчивости и выбора режима вмешательства.
- Синтеза управляющих сигналов на основе нечётких правил.

Преимущество нечёткой логики — интерпретируемость правил, что важно для диагностики и настройки.

5.4. Машинное обучение и обучение с подкреплением

Машинное обучение и **обучение с подкреплением (Reinforcement Learning, RL)** открывают новые возможности для Torque Vectoring.

Обучение с подкреплением позволяет системе обучаться оптимальной стратегии управления методом проб и ошибок, без явного программирования правил. Агент (система управления) взаимодействует со средой (автомобиль и дорога), получая вознаграждение за хорошие действия и штраф за плохие.

В контексте Torque Vectoring RL может использоваться для:

- Оптимизации стратегии распределения момента в различных условиях.
- Координации Torque Vectoring с другими системами (активное рулевое управление, ESP).
- Адаптации к стилю вождения и дорожным условиям.

Нейронные сети могут использоваться для аппроксимации сложных нелинейных зависимостей, например, для прогнозирования сцепления шин с дорогой или для оценки состояния автомобиля.

5.5. Многомодовые стратегии

Современные исследования предлагают **многомодовые стратегии Torque Vectoring**, которые переключаются между различными режимами управления в зависимости от условий.

В работе, посвящённой управлению на основе маневренной безопасной области (Maneuverable Safety Region, MSR), предложена многомодовая стратегия, которая определяет пять режимов управления автомобилем. Каждый режим соответствует различной степени конфликта между манёвренностью и устойчивостью. Система выбирает оптимальный режим в зависимости от текущего состояния и переключается между ними для обеспечения баланса между безопасностью и управляемостью.

6. Практические примеры реализации Torque Vectoring

6.1. Alpine A390: трёхмоторная архитектура

Компания Alpine представила систему Active Torque Vectoring для своего электрического фастбека A390. Автомобиль использует трёхмоторную архитектуру: один электродвигатель на передней оси и два на задней.

Система может распределять от 0 до 100% крутящего момента между двумя задними колёсами. Это обеспечивает исключительную управляемость в поворотах, позволяя автомобилю с массой около двух тонн демонстрировать динамику, характерную для спортивных автомобилей.

Передний электродвигатель обеспечивает полный привод, а задние двигатели с активным распределением момента — точное управление поворачиваемостью. Такая архитектура позволяет реализовать как традиционное распределение момента для повышения устойчивости, так и более агрессивные режимы для спортивного вождения.

6.2. Torque Vectoring для автомобилей с централизованным приводом

Не все электромобили имеют индивидуальные электродвигатели на каждом колесе. Для автомобилей с централизованным приводом (один двигатель на ось) разрабатываются специальные решения.

Одно из таких решений — **электрический Torque Vectoring привод-мост (Electric Torque Vectoring Drive-Axle, ETVD)**. Это устройство устанавливается на оси и позволяет перераспределять крутящий момент между колёсами, даже если на оси только один электродвигатель.

ETVD использует планетарный механизм и электродвигатель для управления распределением момента. Это позволяет реализовать Torque Vectoring на автомобилях с централизованным приводом без необходимости установки дополнительных электродвигателей.

6.3. Torque Vectoring на основе контроля буксования колёс

В работе, представленной исследователями Hyundai Motor Company, предложен подход к Torque Vectoring на основе контроля буксования колёс с накоплением опорного смещения.

Особенность этого подхода в том, что он использует быстрое быстродействие и точность управления электродвигателями для реализации управления рысканием без механических дифференциалов. Это значительно улучшает управляемость в поворотах и отзывчивость рулевого управления по сравнению с автомобилями с двигателем внутреннего сгорания.

6.4. Координация Torque Vectoring с активным рулевым управлением

Современные исследования показывают, что максимальная эффективность достигается при **координации Torque Vectoring с другими активными системами** — активным рулевым управлением (Active Front Steering, AFS) и системой стабилизации ESP.

В работе, посвящённой координации AFS и четырёхколёсного Torque Vectoring (4WTV), предложена схема, в которой AFS компенсирует дополнительный курсовой момент, создаваемый Torque Vectoring. Это позволяет сохранить нейтральную поворачиваемость при активном вмешательстве системы.

Другое исследование предлагает адаптивную координацию AFS и TVC на основе энергетической фазовой плоскости и метода Ляпунова. Такой подход позволяет динамически распределять вклад каждой системы в зависимости от их эффективности, а не по эмпирическим правилам.

6.5. Torque Vectoring для управления дрифтом

В экстремальных условиях Torque Vectoring может использоваться для управления дрифтом — контролируемым заносом.

В работе, посвящённой управлению дрифтом заднеприводного автомобиля с Torque Vectoring, предложена схема управления, которая позволяет

автомобилю двигаться в режиме дрифта с углом бокового скольжения до 28 градусов. Система использует обратную динамическую модель для расчёта желаемой скорости задних колёс с учётом насыщения шин. Эксперименты показывают, что предложенный метод обеспечивает отличную траекторную точность даже в экстремальных условиях.

7. Вызовы и перспективы развития

7.1. Основные вызовы

Несмотря на впечатляющие успехи, развитие систем Torque Vectoring сталкивается с рядом вызовов:

Сложность управления. Torque Vectoring требует точных моделей динамики автомобиля и шин, а также сложных алгоритмов управления в реальном времени.

Ограничения по сцеплению. Эффективность Torque Vectoring ограничена сцеплением шин с дорогой. При низком коэффициенте сцепления возможности системы значительно снижаются.

Энергопотребление. Активное распределение момента может приводить к дополнительным потерям энергии, особенно при частых перераспределениях.

Стоимость. Реализация Torque Vectoring требует дополнительных компонентов (электродвигатели, активные дифференциалы, датчики), что увеличивает стоимость автомобиля.

Интеграция с другими системами. Torque Vectoring должен быть согласован с ESP, ABS, активным рулевым управлением и другими системами для предотвращения конфликтов.

7.2. Перспективы развития

Интеграция с автономным вождением. В полностью автономных автомобилях Torque Vectoring станет ключевым элементом системы управления движением, обеспечивая безопасность и комфорт.

Улучшение энергоэффективности. Разработка алгоритмов, минимизирующих потери энергии при распределении момента, позволит увеличить запас хода электромобилей.

Адаптивные алгоритмы. Использование машинного обучения для адаптации Torque Vectoring к стилю вождения, дорожным условиям и состоянию автомобиля.

Интеграция с V2X (Vehicle-to-Everything). Использование информации от дорожной инфраструктуры и других автомобилей для упреждающего управления.

Развитие многомоторных архитектур. Всё большее распространение получают автомобили с двумя и более электродвигателями, что создаёт благоприятные условия для Torque Vectoring.

8. Закрепление и завершение

8.1. Мини-тест

1. Что такое Torque Vectoring и чем он отличается от ESP?
2. Какой физический параметр является ключевым для управления Torque Vectoring?
3. Какие два основных уровня выделяют в иерархической архитектуре системы Torque Vectoring?
4. Какие методы искусственного интеллекта применяются в системах Torque Vectoring?
5. Как распределяется крутящий момент в трёхмоторной архитектуре Alpine A390?

8.2. Эталонные краткие ответы

1. **Torque Vectoring** — это технология активного распределения крутящего момента между колёсами для управления курсовой устойчивостью и поворачиваемостью. В отличие от ESP, которая реагирует на уже возникшую потерю устойчивости, Torque Vectoring работает проактивно, активно формируя желаемое поведение автомобиля.
2. **Прямой курсовой момент (Direct Yaw Moment, DYM)** — вращающий момент вокруг вертикальной оси автомобиля, создаваемый разностью продольных сил на левых и правых колёсах.
3. **Верхний уровень** — управление курсовой устойчивостью (расчёт требуемого прямого курсового момента). **Нижний уровень** — распределение крутящего момента между колёсами с учётом ограничений.
4. В системах Torque Vectoring применяются **модельное прогнозирующее управление (MPC)** , **скользящий режим управления (SMC)** , **нечёткая логика**, **обучение с подкреплением** и **нейронные сети**.
5. В Alpine A390 один электродвигатель установлен на передней оси и два на задней. Система Active Torque Vectoring может распределять от 0 до 100% крутящего момента между двумя задними колёсами.

8.3. Итоговые положения

Torque Vectoring — это технология активного распределения крутящего момента между колёсами для управления курсовой устойчивостью и поворачиваемостью. В отличие от ESP, она работает проактивно.

Физическая основа Torque Vectoring — создание прямого курсового момента (DYM) за счёт разности продольных сил на левых и правых колёсах.

Архитектура системы строится по иерархическому принципу: верхний уровень рассчитывает требуемый курсовой момент, нижний — распределяет его между колёсами.

Алгоритмы распределения могут быть основаны на правилах (rule-based), оптимизационных методах или иерархическом подходе с распределением между осями и колёсами.

Интеллектуальные методы включают модельное прогнозирующее управление (MPC), скользящий режим (SMC), нечёткую логику, обучение с подкреплением и нейронные сети.

Практические примеры демонстрируют эффективность Torque Vectoring в автомобилях с различной архитектурой: трёхмоторные конфигурации (Alpine A390), электрические Torque Vectoring привод-мосты (ETVD), координация с активным рулевым управлением.

Перспективы развития связаны с интеграцией в системы автономного вождения, улучшением энергоэффективности, адаптивными алгоритмами и развитием многомоторных архитектур.

Задание после лекции

Выберите один из аспектов технологии Torque Vectoring (алгоритм распределения момента, метод интеллектуального управления, конкретная реализация на автомобиле) и подготовьте аналитический обзор (2–3 страницы), в котором:

1. Опишите выбранный аспект и его роль в системе Torque Vectoring.
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 Torque Vectoring. В чём его отличие от ESP?
2. Каковы основные преимущества Torque Vectoring?
3. Что такое прямой курсовой момент (DYM) и как он создаётся?
4. Опишите модель велосипеда для анализа курсовой устойчивости.
5. Что такое недостаточная и избыточная поворачиваемость?
6. Как Torque Vectoring влияет на баланс поворачиваемости?
7. Опишите иерархическую архитектуру системы управления Torque Vectoring.
8. Какие датчики используются в системе Torque Vectoring?
9. Какие исполнительные механизмы могут использоваться для реализации Torque Vectoring?
10. В чём отличие индивидуальных электродвигателей на каждом колесе от активного дифференциала?
11. Что такое эллипс сцепления и как он учитывается при распределении момента?
12. Какие подходы к распределению крутящего момента существуют?

13. Что такое модельное прогнозирующее управление (MPC) и как оно применяется в Torque Vectoring?

14. Как скользящий режим управления (SMC) используется в Torque Vectoring?

15. Как нечёткая логика применяется в системах Torque Vectoring?

16. Что такое обучение с подкреплением и как оно может быть использовано для управления Torque Vectoring?

17. В чём заключается многомодовая стратегия управления Torque Vectoring?

18. Опишите архитектуру Torque Vectoring в Alpine A390.

19. Что такое электрический Torque Vectoring привод-мост (ETVD)?

20. Как осуществляется координация Torque Vectoring с активным рулевым управлением?

21. Каковы основные вызовы при разработке систем Torque Vectoring?

22. Как Torque Vectoring может использоваться для управления дрифтом?

23. Каковы перспективы развития технологии Torque Vectoring?

24. Как Torque Vectoring влияет на энергоэффективность электромобиля?

25. Как Torque Vectoring интегрируется с системами автономного вождения?

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. Lenzo B., Naets F., eds. Vehicle Dynamics, Control and Design. — Cham: Springer, 2026. — 296 p. — ISBN 978-3-031-97269-0.

5.

Дополнительная литература

5. Zheng Z., Cao W., Kubota Y., Nakano Y., Gao S., Suzuki T. Robust and Energy-Efficient Torque Vectoring for a Four in-Wheel Motor Electric Vehicle Based on Sliding Mode and Model Predictive Control // Unmanned Systems. — 2025. — Vol. 13, No. 6. — P. 1699–1712. — DOI: 10.1142/s2301385025430022.

6. Nonlinear Model Predictive Yaw Moment Control Through Electric Axle and Friction Brake Torque Distribution // IEEE Access. — 2025. — Vol. 13. — P. 106540–106560.
7. A novel torque vectoring control framework based on maneuverable safety region for distributed drive electric vehicles // ScienceDirect. — 2026.
8. Dynamic Drift Tracking Control of Rear Wheel Drive Vehicle with Torque Vectoring // IEEE Xplore. — 2026.
9. Active Front Steering and Four-Wheel Torque Vectoring for Improved Driving and Braking Performance of Distributed Drive Electric Vehicles // IEEE Xplore. — 2025.
10. An adaptive coordination controller for ARS and TVC integration via energy phase plane and Lyapunov's second method // ScienceDirect. — 2025.
11. Torque Vectoring based on Wheel Slip Control using Reference Offset Accumulation for Electric Vehicles: A Single Motor on Each Axle // IEEE Xplore. — 2026.
12. Hierarchical torque control for range extension in electric vehicle // Taylor & Francis Online. — 2025. — P. 687–700.
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.