ЛЕКЦИЯ 10
ПРОГНОЗНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ПОТОКАМИ. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАВИГАЦИОННЫХ, ДОРОЖНЫХ И МАРШРУТНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ И ТРАНСМИССИИ

Цель

Сформировать у обучающихся системное представление о прогнозном управлении энергетическими потоками (Predictive Energy Management, PEM) как о ключевой технологии повышения эффективности гибридных и электрических транспортных средств. Рассмотреть принципы использования навигационных, дорожных и маршрутных данных для оптимизации работы силовой установки и трансмиссии, иерархические стратегии управления, методы прогнозирования скорости и состояния дороги, а также практические аспекты реализации в современных автомобилях.

Планируемые результаты

После изучения данной лекции обучающийся сможет:

- дать определение прогнозного управления энергетическими потоками и объяснить его преимущества перед традиционными стратегиями;
- классифицировать источники прогнозной информации и описывать их роль в управлении;
- объяснять принципы работы иерархических стратегий PEM с разделением на долгосрочное планирование и краткосрочное управление;
- характеризовать методы прогнозирования скорости на основе навигационных данных и машинного обучения;
- описывать применение динамического программирования, принципа минимума Понтрягина и ECMS в прогнозном управлении;
- анализировать практические примеры реализации PEM в современных автомобилях.

Вопрос занятия. Традиционная стратегия управления энергией гибридного автомобиля «не видит» будущего. Она реагирует на текущие условия, но не знает, что впереди подъём, спуск, пробка или зона с нулевыми выбросами. А что если система будет «заглядывать» вперёд на десятки километров, используя навигационные данные, и планировать использование батареи так, чтобы минимизировать расход топлива на всём маршруте? Насколько эффективным может быть такое прогнозное управление и какие алгоритмы позволяют превратить карту маршрута в оптимальную стратегию энергопотребления?

1. Введение в прогнозное управление энергетическими потоками

1.1. Что такое прогнозное управление энергетическими потоками?

Прогнозное управление энергетическими потоками (Predictive Energy Management, PEM) — это класс стратегий управления энергией гибридных и электрических транспортных средств, которые используют информацию о предстоящем маршруте, дорожных условиях и трафике для оптимизации работы силовой установки и трансмиссии на всём маршруте движения.

В отличие от традиционных стратегий, которые принимают решения на основе текущих измерений (скорость, нагрузка, SOC батареи) и заранее заданных правил, PEM «заглядывает в будущее». Система знает, что впереди подъём, спуск, ограничение скорости, светофор или пробка, и планирует использование энергии так, чтобы минимизировать общий расход топлива или электроэнергии.

Ключевая идея PEM заключается в том, что **информация о будущем** позволяет системе принимать решения, которые были бы невозможны при реактивном управлении. Например, если система знает, что впереди длинный спуск, она может использовать энергию батареи более интенсивно перед подъёмом, зная, что затем сможет зарядить батарею за счёт рекуперации. Если система знает о предстоящей пробке, она может сохранить заряд батареи для движения в электрическом режиме в зоне с ограничением выбросов.

1.2. Почему прогнозное управление необходимо?

Современные гибридные и электрические автомобили обладают значительным потенциалом энергосбережения, но реализация этого потенциала требует интеллектуального управления. Традиционные стратегии на основе правил (rule-based) разрабатываются для работы в широком диапазоне условий, но этот универсальный подход неизбежно приводит к компромиссам, которые снижают топливную экономичность.

В работе, опубликованной в SAE Technical Paper в 2024 году, отмечается, что «производительность этих транспортных средств тесно связана со стратегией управления энергией (EMS), используемой для обеспечения минимального расхода топлива и максимизации запаса хода в электрическом режиме. В то время как традиционные концепции EMS разработаны для работы в широком диапазоне сценариев, этот подход может потенциально снизить выгоду от расхода топлива из-за отсутствия информации о маршруте и трафике».

Именно эта «слепота» традиционных стратегий создаёт потребность в прогнозном управлении. Использование навигационных данных, информации о дорожном движении и профиле маршрута позволяет EMS «видеть» будущее и принимать более обоснованные решения.

1.3. Потенциал энергосбережения

Исследования показывают, что прогнозное управление энергетическими потоками может обеспечить значительное снижение расхода топлива и энергопотребления.

В работе по навигационному MPC для последовательно-параллельного PHEV показано, что предложенный метод позволяет снизить энергопотребление на **8,07%**.

В исследовании, опубликованном в Journal of Power Sources в 2025 году, предлагается метод LSTMRT-APMP, который обеспечивает улучшение топливной экономичности **не менее чем на 8,77%** по сравнению с современными методами.

В работе, опубликованной в IEEE Xplore в 2026 году, представлен метод ML-PES (Machine Learning Based Predictive Energy Scheduling), который демонстрирует улучшение топливной экономичности **до 12,5%**.

Эти результаты демонстрируют, что прогнозное управление является не просто академическим концептом, а практически значимой технологией, способной существенно повысить эффективность гибридных и электрических автомобилей.

2. Источники прогнозной информации

Для реализации прогнозного управления энергетическими потоками система должна получать информацию о предстоящем маршруте и дорожных условиях. Источники этой информации можно разделить на несколько категорий.

2.1. Навигационные данные

Навигационные данные являются основой прогнозного управления. Они включают:

Маршрут и расстояние. Информация о предстоящем маршруте, включая общую протяжённость, повороты, развязки. Это позволяет системе планировать использование энергии на всём маршруте.

Профиль высот (элевация). Данные о высоте над уровнем моря вдоль маршрута позволяют системе предвидеть подъёмы и спуски. Это критически важно для планирования рекуперации и использования энергии.

Кривизна дороги. Информация о кривизне дороги позволяет системе прогнозировать необходимость замедления перед поворотами.

Ограничения скорости. Данные о разрешённой скорости на различных участках маршрута.

Данные о перекрёстках. Информация о расположении перекрёстков, светофоров и других дорожных объектов.

В работе, опубликованной в Automotive and Engine Technology в 2026 году, перечисляются ключевые данные для стратегии вождения: «широта и

долгота, высота, кривизна кривой, ограничение скорости, скорость трафика и так называемый intersection bit».

Источники навигационных данных:

- **GPS/ГЛОНАСС.** Определение текущего местоположения и построение маршрута.
- **Цифровые карты.** Содержат информацию о дорожной сети, ограничениях скорости, профиле высот.
- **Спецификация интерфейса ADAS (ADASIS).** Стандарт для передачи информации от навигационной системы к другим электронным блокам автомобиля.
- **E-Horizon (электронный горизонт).** Технология, которая предоставляет информацию о дороге впереди на основе данных цифровых карт и навигации.

В работе, опубликованной в SAE Technical Paper в 2024 году, описывается применение РЕМ с использованием «бортовой навигации и данных E-horizon на основе Спецификации интерфейса систем помощи водителю (ADASIS)».

2.2. Данные о дорожном движении (Traffic Data)

Информация о дорожном движении позволяет системе учитывать задержки, вызванные пробками, и планировать использование энергии соответствующим образом.

Типы данных о трафике:

- **Скорость трафика.** Текущая средняя скорость на участках маршрута.
- **Плотность трафика.** Информация о загруженности дороги.
- **Прогноз трафика.** Прогнозируемая ситуация на маршруте с учётом времени прибытия.
- **Данные о ДТП и перекрытиях.** Информация о событиях, которые могут повлиять на движение.

В работе, опубликованной в 2024 году, описывается применение РЕМ с использованием «такой информации, как данные о трафике в реальном времени, для снижения расхода топлива».

2.3. Данные V2X (Vehicle-to-Everything)

V2X (Vehicle-to-Everything) — это технологии связи автомобиля с окружающей средой, которые предоставляют дополнительную прогнозную информацию.

V2I (Vehicle-to-Infrastructure). Связь с дорожной инфраструктурой — светофорами, дорожными знаками, системами управления трафиком. Позволяет получать информацию о фазах светофоров (Signal Phase and Timing, SPAT).

V2V (Vehicle-to-Vehicle). Связь с другими автомобилями. Позволяет получать информацию о скорости и траектории движения окружающих транспортных средств.

V2N (Vehicle-to-Network). Связь с облачными сервисами и сетями. Позволяет получать информацию о погоде, дорожных условиях, обновлениях.

В работе по иерархическому управлению для подключённых HEV в городских условиях используется информация о светофорах через V2I-связь.

2.4. Данные о стиле вождения

Информация о стиле вождения позволяет системе адаптировать прогнозное управление под индивидуальные предпочтения водителя.

Источники данных о стиле вождения:

- История нажатий педали акселератора и тормоза.
- История скорости и ускорений.
- Данные о выборе маршрута.

В работе, опубликованной в Journal of Power Sources в 2025 году, используется **передача обучения (transfer learning)** для адаптации модели прогнозирования скорости к различным водителям, что повышает точность прогнозирования для новых водителей на 44,83%.

3. Иерархические стратегии прогнозного управления

Прогнозное управление энергетическими потоками обычно реализуется с использованием **иерархической архитектуры**, которая разделяет задачу на несколько уровней с различными горизонтами прогнозирования.

3.1. Общая структура иерархического PEM

Верхний уровень — долгосрочное планирование (Long Horizon). На этом уровне система планирует использование энергии на всём маршруте (горизонт до десятков километров). Определяется целевая траектория SOC батареи, которая обеспечивает минимальный расход топлива на всём маршруте.

Средний уровень — среднесрочное управление (Medium Horizon). На этом уровне система определяет эквивалентный фактор (Equivalence Factor), который задаёт «цену» электрической энергии относительно топлива. Горизонт — от нескольких сотен метров до нескольких километров.

Нижний уровень — краткосрочное управление (Short Horizon). На этом уровне система выполняет распределение крутящего момента между источниками мощности в реальном времени. Горизонт — от нескольких секунд до десятков секунд.

3.2. Пример: трёхуровневая стратегия PEM

В работе, опубликованной в SAE Technical Paper в 2024 году, представлена **многоуровневая оптимизационная стратегия** PEM для PHEV с конфигурацией P1/P3:

Долгосрочный горизонт. Динамическое программирование (Dynamic Programming, DP) рассчитывает оптимальную траекторию SOC батареи для

всего маршрута. Поисковое пространство и дискретизация DP оптимизируются для обеспечения работы в реальном времени.

Среднесрочный горизонт. На основе целевой траектории SOC, принцип минимума Понтрягина (Pontryagin's Minimum Principle, PMP) используется для расчёта эквивалентного фактора (EF), который определяет оптимальное распределение между топливной и электрической энергией.

Краткосрочный горизонт. Для нижнего уровня EMS используется стратегия эквивалентной минимизации расхода (Equivalent Consumption Minimum Strategy, ECMS), которая вычисляет распределение крутящего момента, передаточное число и решение о включении/выключении ДВС на основе EF от PMP.

Такая иерархическая структура позволяет сочетать **глобальную оптимальность** (долгосрочное планирование) с **быстродействием** (краткосрочное управление).

3.3. Двухуровневая стратегия PEM для коммерческих автомобилей

В работе, опубликованной в SAE Technical Paper в 2023 году, предлагается **двухуровневая стратегия прогнозного управления энергией (PEM)** для гибридных коммерческих автомобилей на основе ADAS-карт.

Верхний уровень. Вводится алгоритм прогнозного круиз-контроля с учётом массы автомобиля и уклона дороги, который планирует будущую скорость автомобиля при движении на дальние расстояния.

Нижний уровень. На основе результатов планирования скорости рассчитывается будущий спрос на мощность, и используется метод динамического программирования для определения глобально оптимальных правил распределения мощности для текущих дорожных и эксплуатационных условий с целью минимизации расхода топлива ДВС.

Результаты моделирования и испытаний показывают, что «в различных условиях движения по трассе с небольшими изменениями скорости и уклона дороги стратегия прогнозного управления энергией обеспечивает значительное улучшение экономии топлива по сравнению со стратегией управления на основе правил».

4. Методы прогнозирования скорости

Прогнозирование будущей скорости автомобиля является ключевым элементом PEM. От точности прогноза скорости зависит качество планирования использования энергии.

4.1. Прогнозирование на основе навигационных данных

Наиболее прямой подход к прогнозированию скорости — использование навигационных данных и информации о дорожном движении.

Принцип работы:

1. На основе маршрута и карты определяется профиль дороги (уклоны, повороты, ограничения скорости).

2. На основе данных о трафике оценивается средняя скорость на каждом участке.

3. Строится прогноз скорости на всём маршруте.

В работе, опубликованной в Automotive and Engine Technology в 2026 году, описывается процесс предварительной обработки данных для прогнозирования скорости. Ключевые данные включают «широту и долготу, высоту, кривизну кривой, ограничение скорости, скорость трафика и intersection bit». Данные интерполируются до 5-метровых интервалов для обеспечения достаточного разрешения.

Корректировка ошибок прогнозирования. В работе по навигационному MPC для последовательно-параллельного PHEV отмечается, что для коррекции ошибок в прогнозируемой навигацией скорости строятся карты соответствия между прогнозируемой и реальной скоростью.

4.2. Прогнозирование с использованием машинного обучения

Методы машинного обучения, особенно нейронные сети, позволяют значительно повысить точность прогнозирования скорости.

LSTM (Long Short-Term Memory). LSTM — это тип рекуррентной нейронной сети, способный запоминать долгосрочные зависимости в временных рядах. Используется для прогнозирования будущей скорости на основе исторических данных.

В работе, опубликованной в Journal of Power Sources в 2025 году, предлагается модель прогнозирования скорости на основе **LSTM и данных о трафике в реальном времени (LSTMRT)** . Модель интегрирует три ключевых элемента: состояние самого автомобиля, состояния сигналов светофора и динамику окружающих транспортных средств.

Результаты: LSTMRT улучшает точность прогнозирования **как минимум на 68%** в различных ездовых циклах по сравнению с современными моделями прогнозирования.

Передача обучения (Transfer Learning). В той же работе используется передача обучения для решения проблемы переобучения модели из-за различий водителей. После передачи обучения точность прогнозирования для новых водителей может быть дополнительно увеличена **на 44,83%**.

4.3. Прогнозирование на основе V2X

V2X-информация позволяет повысить точность прогнозирования, особенно в городских условиях.

Информация о светофорах (SPAT). Данные о фазах светофоров позволяют системе прогнозировать, когда автомобиль сможет проехать перекрёсток без остановки, и планировать скорость соответствующим образом.

Информация от других автомобилей (V2V). Данные о скорости и траектории впереди идущих автомобилей позволяют прогнозировать заторы и резкие замедления.

5. Методы оптимизации распределения энергии в PEM

5.1. Динамическое программирование (Dynamic Programming, DP)

Динамическое программирование (DP) является классическим методом глобальной оптимизации для задач управления с дискретным временем. В контексте PEM DP используется для расчёта оптимальной траектории SOC батареи на всём маршруте.

Принцип работы DP:

1. Задача разбивается на этапы (например, каждый метр маршрута).
2. Для каждого этапа вычисляются возможные состояния (значения SOC) и стоимость перехода (расход топлива).
3. Используя принцип Беллмана, вычисляется оптимальная траектория с минимальной общей стоимостью.

Ограничения DP:

- Высокая вычислительная сложность (проклятие размерности).
- Требует знания всего маршрута заранее.
- Не подходит для работы в реальном времени без оптимизации.

Оптимизация DP для реального времени. В работе, опубликованной в SAE Technical Paper в 2024 году, поисковое пространство и дискретизация DP оптимизируются для обеспечения работы в реальном времени.

5.2. Принцип минимума Понтрягина (Pontryagin's Minimum Principle, PMP)

Принцип минимума Понтрягина (PMP) — это метод вариационного исчисления для решения задач оптимального управления с непрерывным временем. В контексте PEM PMP используется для расчёта эквивалентного фактора, который определяет оптимальное распределение между топливной и электрической энергией.

Принцип работы PMP:

1. Вводится сопряжённая переменная (costate), которая играет роль «цены» электрической энергии.
2. Условие оптимальности заключается в минимизации гамильтониана в каждый момент времени.
3. Оптимальное управление находится путём решения краевой задачи.

Преимущества PMP: Вычислительная эффективность по сравнению с DP.

Недостатки PMP: Требует определения оптимального начального значения costate.

В работе, опубликованной в Journal of Power Sources в 2025 году, предлагается **адаптивный PMP (APMP)**, который использует прогнозирование скорости на основе LSTMRT для адаптации costate в реальном времени. Результаты показывают улучшение топливной экономичности **не менее чем на 8,77%**. Максимальное время вычислений составляет всего **4,67 мс**, что подтверждает возможность работы в реальном времени.

5.3. Эквивалентная стратегия минимизации расхода (ECMS)

Эквивалентная стратегия минимизации расхода (Equivalent Consumption Minimization Strategy, ECMS) — это метод локальной оптимизации, который сводит задачу управления гибридным автомобилем к минимизации эквивалентного расхода топлива в каждый момент времени.

Принцип работы ECMS:

1. Расход топлива ДВС пересчитывается в «эквивалентный» расход с учётом использования электрической энергии.
2. Вводится **эквивалентный фактор (EF)**, который определяет «цену» электрической энергии относительно топлива.
3. Задача управления сводится к минимизации эквивалентного расхода в каждый момент времени.

Прогнозная ECMS (Predictive ECMS). В работе, опубликованной в World Electric Vehicle Journal в 2023 году, демонстрируется, как прогнозная онлайн-ECMS может достичь дополнительной экономии топлива по сравнению с непрогнозной онлайн-ECMS путём прогнозирования событий рекуперации с использованием картографических данных.

5.4. Модельное прогнозирующее управление (MPC)

Модельное прогнозирующее управление (Model Predictive Control, MPC) — это метод, который использует модель системы для прогнозирования будущего поведения и выбора оптимальных управляющих воздействий на конечном горизонте.

PEM на основе MPC:

1. Модель системы (например, нейронная сеть) прогнозирует будущее состояние системы на горизонте прогнозирования.
2. Оптимизатор решает задачу оптимизации, выбирая управляющие воздействия, минимизирующие целевую функцию (расход топлива) при соблюдении ограничений.
3. Первое управляющее воздействие применяется к системе.
4. На следующем шаге процесс повторяется (скользящий горизонт).

Преимущества MPC: Учёт ограничений в явном виде, прогнозирующий характер, возможность оптимизации по нескольким критериям.

Недостатки MPC: Высокая вычислительная сложность, требует точной модели системы.

В работе по навигационному MPC для последовательно-параллельного PHEV показано снижение энергопотребления **на 8,07%**.

6. Интеграция прогнозного управления с V2X и облачными сервисами

Современные тенденции в развитии PEM направлены на интеграцию с V2X-технологиями и облачными сервисами, что позволяет использовать информацию не только о маршруте, но и о других участниках движения и дорожной инфраструктуре.

6.1. Управление с учётом светофоров (Traffic Light Awareness)

Использование информации о фазах светофоров (Signal Phase and Timing, SPAT) позволяет системе оптимизировать скорость и использование энергии для проезда перекрёстков без остановки.

Eco-Approach and Departure (Eco-AND). Алгоритм Eco-AND, разработанный для PHEV, оптимизирует экономию энергии за счёт использования информации о маршруте от навигационных систем, GPS и V2I-связи.

6.2. Управление группой автомобилей (Platooning)

В работе, опубликованной в IEEE Xplore в 2026 году, рассматривается **многоагентная оптимизация энергии в колонне подключённых HEV** с использованием MPC и обучения с подкреплением.

Принцип: Автомобили в колонне обмениваются информацией о скорости, ускорении и состоянии батареи, что позволяет оптимизировать использование энергии для всей группы.

6.3. Интеграция с облачными сервисами

Облачные сервисы позволяют использовать большие объёмы данных для улучшения прогнозирования.

Пример: В работе, опубликованной на GitHub в 2026 году, описывается агентская среда для управления энергией гибридных автомобилей, которая объединяет «навигацию, трафик, погоду, V2X, водителя и телеметрию силовой установки в единую картину с упреждением».

7. Практические примеры и результаты

7.1. PEM на основе навигации и E-Horizon (SAE 2024)

В работе, опубликованной в SAE Technical Paper в 2024 году, представлена многоуровневая стратегия PEM для PHEV с конфигурацией P1/P3.

Архитектура:

- **Долгосрочный горизонт:** DP для оптимальной траектории SOC.
- **Среднесрочный горизонт:** PMP для эквивалентного фактора.
- **Краткосрочный горизонт:** ECMS для распределения крутящего момента.

Результаты: Сравнение с традиционной rule-based EMS для различных реальных сценариев использования показывает значительную экономию топлива.

7.2. Навигационный MPC для последовательно-параллельного PHEV (2025)

В работе, опубликованной в International Journal of Green Energy в 2025 году, предлагается метод навигационного MPC для последовательно-параллельного PHEV.

Особенности:

- Навигационная технология используется для прогнозирования скорости.
- Для коррекции ошибок прогнозирования строятся карты соответствия между прогнозируемой и реальной скоростью.
- Гибридный генетический алгоритм с преимуществами оптимизации китов используется для поиска наилучшей стратегии управления.

Результаты: Снижение энергопотребления **на 8,07%**.

7.3. LSTMRT-APMP для PHEV (Journal of Power Sources, 2025)

В работе, опубликованной в Journal of Power Sources в 2025 году, предлагается метод LSTMRT-APMP.

Особенности:

- LSTMRT (LSTM с данными о трафике в реальном времени) для прогнозирования скорости.
- Передача обучения для адаптации к различным водителям.
- Адаптивный PMP для распределения мощности.

Результаты:

- Точность прогнозирования улучшена **как минимум на 68%**.
- Точность прогнозирования для новых водителей увеличена **на 44,83%** после передачи обучения.
- Улучшение топливной экономичности **не менее чем на 8,77%**.
- Максимальное время вычислений **4,67 мс** для работы в реальном времени.

7.4. Иерархический PEM для коммерческих автомобилей (SAE 2023)

В работе, опубликованной в SAE Technical Paper в 2023 году, представлена иерархическая стратегия PEM для гибридных коммерческих автомобилей на основе ADAS-карт.

Особенности:

- Верхний уровень: прогнозный круиз-контроль с учётом массы и уклона.
- Нижний уровень: DP для глобально оптимального распределения мощности.

Результаты: Значительное улучшение экономии топлива по сравнению с rule-based EMS в условиях движения по трассе.

8. Вызовы и перспективы развития

8.1. Основные вызовы

Точность прогнозирования. Качество РЕМ напрямую зависит от точности прогнозирования скорости и дорожных условий. Ошибки прогнозирования могут привести к неоптимальным решениям.

Вычислительная сложность. Методы глобальной оптимизации (DP) требуют значительных вычислительных ресурсов. Необходимы компромиссы между оптимальностью и быстродействием.

Доступность данных. Для работы РЕМ необходимы навигационные данные и информация о трафике. В некоторых регионах эти данные могут быть недоступны или неточны.

Интеграция с другими системами. РЕМ должна быть согласована с другими системами управления: Torque Vectoring, Brake-by-Wire, ADAS.

Адаптация к стилю вождения. Разные водители имеют разные стили вождения, что влияет на эффективность РЕМ.

8.2. Перспективы развития

Интеграция с облачными сервисами и большими данными. Использование облачных вычислений и больших данных для улучшения прогнозирования и оптимизации.

Федеративное обучение. Обучение моделей на распределённых данных без их централизации, что повышает приватность и снижает требования к передаче данных.

Интеграция с автономным вождением. В полностью автономных автомобилях РЕМ может быть интегрирована с планированием траектории для одновременной оптимизации маршрута и использования энергии.

Адаптация к стилю вождения в реальном времени. Использование методов передачи обучения и онлайн-адаптации для персонализации РЕМ.

Улучшение алгоритмов прогнозирования. Разработка более точных и робастных методов прогнозирования скорости на основе глубокого обучения и V2X-данных.

9. Закрепление и завершение

9.1. Мини-тест

1. Что такое прогнозное управление энергетическими потоками (РЕМ) и в чём его отличие от традиционных стратегий?
2. Какие источники прогнозной информации используются в РЕМ?
3. Какие три горизонта прогнозирования выделяют в иерархических стратегиях РЕМ?
4. Какие методы оптимизации используются в РЕМ для распределения энергии?
5. Каков потенциал энергосбережения при использовании РЕМ?

9.2. Эталонные краткие ответы

1. **Прогнозное управление энергетическими потоками (PEM)** — это класс стратегий, которые используют информацию о предстоящем маршруте, дорожных условиях и трафике для оптимизации работы силовой установки. В отличие от традиционных стратегий, которые реагируют только на текущие условия, PEM «заглядывает в будущее» и планирует использование энергии на всём маршруте.
2. **Источники прогнозной информации:** навигационные данные (маршрут, высота, кривизна, ограничения скорости), данные о дорожном движении (скорость трафика, пробки), данные V2X (информация о светофорах, других автомобилях), данные о стиле вождения.
3. **Три горизонта прогнозирования:** долгосрочный (планирование SOC на всём маршруте, DP), среднесрочный (расчёт эквивалентного фактора, PMP) и краткосрочный (распределение крутящего момента, ECMS).
4. **Методы оптимизации:** динамическое программирование (DP) для глобальной оптимизации, принцип минимума Понтрягина (PMP) для расчёта эквивалентного фактора, ECMS для распределения крутящего момента, MPC для прогнозирующего управления.
5. **Потенциал энергосбережения:** исследования показывают снижение энергопотребления на 8,07%, улучшение топливной экономичности не менее чем на 8,77% и до 12,5%.

9.3. Итоговые положения

- **Прогнозное управление энергетическими потоками (PEM)** — это стратегия, использующая информацию о будущем маршруте для оптимизации работы силовой установки и трансмиссии.
- **Источники прогнозной информации** включают навигационные данные (ADASIS, E-Horizon), данные о трафике, V2X-информацию и данные о стиле вождения.
- **Иерархические стратегии PEM** разделяют задачу на долгосрочное планирование (DP), среднесрочное управление (PMP) и краткосрочное управление (ECMS).
- **Методы прогнозирования скорости** включают навигационные данные, LSTM-нейронные сети с данными о трафике (LSTMRT) и передачу обучения для адаптации к различным водителям.
- **Методы оптимизации** включают DP, PMP, ECMS и MPC.
- **Интеграция с V2X** позволяет использовать информацию о светофорах и других автомобилях для улучшения PEM.
- **Потенциал энергосбережения** составляет от 8% до 12,5% в зависимости от метода и условий.
- **Основные вызовы** включают точность прогнозирования, вычислительную сложность, доступность данных и адаптацию к стилю вождения.
- **Перспективы развития** связаны с интеграцией облачных сервисов, федеративным обучением, автономным вождением и улучшением алгоритмов прогнозирования.

Задание после лекции

Выберите один из аспектов прогнозного управления энергетическими потоками (источники прогнозной информации, метод прогнозирования скорости, метод оптимизации, интеграция с V2X) и подготовьте аналитический обзор (2–3 страницы), в котором:

1. Опишите выбранный аспект и его роль в PEM.
2. Объясните принципы работы и математические основы.
3. Проанализируйте преимущества и ограничения.
4. Приведите примеры из научных исследований или промышленности.
5. Оцените перспективы развития выбранного аспекта.

Контрольные вопросы

1. Что такое прогнозное управление энергетическими потоками (PEM)?
2. В чём отличие PEM от традиционных стратегий управления энергией?
3. Каковы основные преимущества PEM?
4. Какие источники прогнозной информации используются в PEM?
5. Что такое ADASIS и E-Horizon?
6. Какие данные о дорожном движении используются в PEM?
7. Что такое V2X и какие типы V2X-связи существуют?
8. Как информация о светофорах (SPAT) используется в PEM?
9. Почему прогнозирование скорости является ключевым элементом PEM?
10. Какие методы используются для прогнозирования скорости?
11. Что такое LSTM и как она применяется для прогнозирования скорости?
12. Что такое передача обучения (transfer learning) и как она применяется в PEM?
13. Опишите иерархическую структуру PEM.
14. Какие горизонты прогнозирования выделяют в PEM?
15. Что такое динамическое программирование (DP) и как оно применяется в PEM?
16. Что такое принцип минимума Понтрягина (PMP) и как он применяется в PEM?
17. Что такое ECMS и как она применяется в PEM?
18. Как MPC применяется в PEM?
19. Каков потенциал энергосбережения при использовании PEM?
20. Каковы основные вызовы при внедрении PEM?
21. Как ошибки прогнозирования скорости влияют на эффективность PEM?
22. Как PEM адаптируется к различным стилям вождения?

23. Как V2X-информация улучшает РЕМ?

24. Как РЕМ интегрируется с другими системами управления автомобиля?

25. Каковы перспективы развития РЕМ?

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

4. 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

5. Real-time Multi-Layer Predictive Energy Management for a Plug-in Hybrid Vehicle based on Horizon and Navigation Data // SAE Technical Paper. — 2024. — No. 2024-01-2773.

6. Li X., Wang Y., Li X. Hierarchical Control Strategy of Predictive Energy Management for Hybrid Commercial Vehicle Based on ADAS Map // SAE Technical Paper. — 2023. — No. 2023-01-0543.

7. Zhu F., Zhang B., Wu J., Han B., Louis A. Y. Navigation-based model predictive control of energy management for a serials-parallel plug-in hybrid electric vehicle // International Journal of Green Energy. — 2025. — Vol. 22, No. 1. — P. 202–215. — DOI: 10.1080/15435075.2024.2409952.

8. An adaptive energy management method based on Pontryagin's minimum principle with real-time traffic information for plug-in hybrid electric vehicles // Journal of Power Sources. — 2025. — Vol. 655. — Art. 237976.

9. Potential analysis of a predictive energy management strategy designed to increase the efficiency of the powertrain in a hybrid vehicle with use of online available route information // Automotive and Engine Technology. — 2026. — DOI: 10.1007/s41104-025-00166-6.

10. Machine Learning-based Predictive Energy Scheduling for Intelligent Hybrid Electric Vehicles // IEEE Xplore. — 2026.

11. A Novel Approach for a Predictive Online ECMS Applied in Electrified Vehicles Using Real Driving Data // World Electric Vehicle Journal. — 2023. — Vol. 14, No. 12.

12. Hierarchical control strategies for energy management of connected hybrid electric vehicles in urban roads // ScienceDirect. — 2016.

Электронные ресурсы

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