ЛЕКЦИЯ 11
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ ТЕПЛОВОЙ МЕНЕДЖМЕНТ ТРАНСМИССИИ. УПРАВЛЕНИЕ ОХЛАЖДЕНИЕМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ, ИНВЕРТОРА, ТЯГОВОЙ БАТАРЕИ И ТРАНСМИССИОННОГО МАСЛА

Цель

Сформировать у обучающихся системное представление об интеллектуальном тепловом менеджменте как о критически важной подсистеме электромобилей и гибридных транспортных средств. Рассмотреть источники тепловыделения в силовых компонентах, принципы построения систем охлаждения, методы интеллектуального управления температурными режимами электродвигателя, инвертора, тяговой батареи и трансмиссионного масла, а также интеграцию теплового менеджмента с энергетическим управлением для повышения общей эффективности автомобиля.

Планируемые результаты

После изучения данной лекции обучающийся сможет:

- объяснять, почему тепловой менеджмент является критическим фактором для эффективности, надёжности и долговечности электромобилей;
- описывать источники тепловыделения и требования к температурным режимам основных компонентов силовой установки;
- характеризовать различные методы охлаждения (воздушное, жидкостное, масляное, с фазовым переходом) и их применение;
- объяснять принципы работы интеллектуальных систем управления тепловыми режимами на основе ИИ, машинного обучения и прогнозного управления;
- описывать интеграцию теплового и энергетического менеджмента как единой задачи оптимизации;
- анализировать практические примеры реализации интеллектуального теплового менеджмента в современных автомобилях.

Вопрос занятия. Электромобиль — это не только электродвигатель и батарея. Это сложная тепловая система, где каждый компонент выделяет тепло, а каждый градус температуры влияет на эффективность и срок службы. Перегрев электродвигателя снижает его КПД и может привести к разрушению изоляции. Перегрев инвертора — к отказу силовых ключей. Перегрев батареи — к ускоренной деградации и даже возгоранию. Но и переохлаждение тоже опасно: холодная батарея не принимает заряд, холодное масло не смазывает. Как найти идеальный температурный баланс для всех компонентов одновременно? И может ли искусственный интеллект управлять потоками охлаждающей жидкости и масла так, чтобы каждый компонент всегда работал в своей «золотой середине», независимо от нагрузки и температуры окружающей среды?

1. Введение в тепловой менеджмент электромобилей

1.1. Почему тепловой менеджмент критичен для электромобилей?

Эффективный тепловой менеджмент является одной из наиболее критических задач при проектировании и эксплуатации электромобилей и гибридных транспортных средств. В отличие от автомобилей с двигателем внутреннего сгорания, где основным источником тепла является сам ДВС и система выпуска отработавших газов, в электромобилях тепло выделяется в нескольких распределённых компонентах силовой установки, каждый из которых имеет свои температурные ограничения и требования к охлаждению.

Тепловой менеджмент влияет на три ключевых аспекта работы электромобиля:

Эффективность. Температура напрямую влияет на КПД всех компонентов. Сопротивление обмоток электродвигателя растёт с температурой, увеличивая потери. Проводимость полупроводниковых ключей инвертора также зависит от температуры. Химические процессы в батарее сильно зависят от температуры — слишком холодная батарея не может отдавать полную мощность, слишком горячая — деградирует.

Надёжность и долговечность. Перегрев является основной причиной преждевременного выхода из строя электронных компонентов и батарей. Каждые 10°C превышения допустимой температуры могут сократить срок службы батареи вдвое. Для силовых ключей инвертора перегрев может привести к катастрофическому отказу.

Безопасность. Термический разгон батареи (thermal runaway) — одна из наиболее опасных аварийных ситуаций в электромобилях, которая может привести к возгоранию. Предотвращение перегрева батареи является критической задачей системы теплового менеджмента.

В работе, опубликованной в 2025 году в журнале «Energy Technology», отмечается, что «эффективный тепловой менеджмент является критической проблемой в электромобилях, влияющей на эффективность, надёжность и срок службы ключевых компонентов, таких как электрические тяговые двигатели, инверторы и редукторы».

1.2. Энергопотребление системы теплового менеджмента

Система теплового менеджмента сама является значительным потребителем энергии. Насосы охлаждающей жидкости, вентиляторы радиаторов, электрические масляные насосы — все они потребляют электроэнергию, которая могла бы быть использована для движения. В условиях экстремальных температур (зимой — для обогрева, летом — для охлаждения) энергопотребление TMS может составлять значительную долю от общего энергопотребления автомобиля.

Исследования показывают, что при низких температурах запас хода электромобиля может сокращаться более чем на 30%, а в условиях сильных морозов — до 50%. Это связано в первую очередь с необходимостью обогрева салона и поддержания рабочей температуры батареи. Поэтому оптимизация

энергопотребления системы теплового менеджмента является не менее важной задачей, чем оптимизация работы самой силовой установки.

В работе, опубликованной в 2025 году в журнале «eTransportation», разработана стратегия прогнозного управления на основе машинного обучения для TMS, которая позволила сократить энергопотребление вспомогательных систем TMS на 10%, что соответствует увеличению запаса хода примерно на 0,6% в летних условиях эксплуатации.

2. Источники тепловыделения и требования к температурным режимам

2.1. Электродвигатель

Электродвигатель является одним из основных источников тепла в силовой установке электромобиля. Тепло в двигателе генерируется за счёт нескольких механизмов:

Потери в обмотках (джоулево тепло). Протекание тока по обмоткам статора вызывает нагрев за счёт сопротивления меди. Эти потери пропорциональны квадрату тока (I^2R) и являются основным источником тепла при высоких нагрузках. С ростом температуры сопротивление меди увеличивается, что создаёт положительную обратную связь — нагрев усиливает потери, которые усиливают нагрев.

Потери в стали (гистерезис и вихревые токи). Перемагничивание сердечника статора и ротора вызывает потери, которые зависят от частоты вращения и амплитуды магнитного поля. Эти потери особенно значительны при высоких скоростях вращения.

Механические потери. Трение в подшипниках и вентиляционные потери также вносят вклад в тепловыделение.

Требования к температурному режиму электродвигателя:

- Максимальная температура обмоток обычно ограничена 150–180°C для изоляции класса H.
- Максимальная температура постоянных магнитов — около 150–180°C, выше которой возможна необратимая размагничивание.
- Оптимальная рабочая температура — 60–120°C в зависимости от конструкции и режима работы.

Перегрев электродвигателя приводит к снижению КПД, ограничению мощности и, в конечном счёте, к выходу из строя. Современные системы управления учитывают тепловое состояние двигателя при определении допустимого крутящего момента.

2.2. Инвертор

Инвертор — устройство, преобразующее постоянный ток батареи в переменный для питания электродвигателя — является источником значительных тепловыделений, особенно при высоких нагрузках.

Источники тепла в инверторе:

Потери при переключении. Каждое включение и выключение силового ключа (IGBT или SiC MOSFET) сопровождается потерями энергии из-за конечной скорости переключения. Эти потери растут с частотой ШИМ.

Потери проводимости. При протекании тока через открытый силовой ключ возникает падение напряжения, которое приводит к нагреву. Эти потери пропорциональны току.

Требования к температурному режиму инвертора:

- Максимальная температура кристалла (junction temperature) для IGBT обычно составляет 150–175°C, для SiC MOSFET — до 200°C и выше.
- Температура корпуса (case temperature) должна быть значительно ниже.
- Перегрев инвертора может привести к катастрофическому отказу силовых ключей.

Особенность инвертора — высокая чувствительность к температуре и необходимость очень эффективного отвода тепла от силовых ключей. Именно поэтому инверторы в современных электромобилях имеют жидкостное охлаждение, часто с использованием специальных охлаждающих пластин (cold plates).

2.3. Тяговая батарея

Тяговая батарея является, возможно, самым критичным с точки зрения теплового менеджмента компонентом. Литий-ионные батареи имеют узкий диапазон рабочих температур, за пределами которого их производительность и срок службы резко снижаются.

Источники тепла в батарее:

Джоулево тепло. Протекание тока через внутреннее сопротивление батареи вызывает нагрев. Это основной источник тепла при высоких токах заряда/разряда (быстрая зарядка, интенсивное ускорение).

Энтропийное тепло. Изменение энтропии при электрохимических реакциях также сопровождается тепловыделением или теплопоглощением в зависимости от направления тока.

Требования к температурному режиму батареи:

- Оптимальная рабочая температура: 20–40°C.
- Максимальная допустимая температура: обычно 55–60°C для большинства литий-ионных химий.
- Минимальная допустимая температура для заряда: около 0°C (заряд при отрицательных температурах приводит к литиевой плакировке и необратимой деградации).
- Минимальная допустимая температура для разряда: около -20°C (при более низких температурах сопротивление резко возрастает).

Особенно критична **температурная однородность** внутри батареи. Разница температур между отдельными ячейками не должна превышать 2–5°C, иначе ячейки будут деградировать с разной скоростью, что сократит общий срок службы батареи.

2.4. Трансмиссия и трансмиссионное масло

Трансмиссия электромобиля (редуктор, дифференциал, подшипники) также является источником тепла, хотя и менее значительным, чем электродвигатель или инвертор.

Источники тепла в трансмиссии:

Потери на трение. Трение в шестернях, подшипниках и уплотнениях приводит к нагреву.

Потери на перемешивание масла. Вращение шестерён в масле вызывает его перемешивание, что также сопровождается нагревом.

Тепло от соседних компонентов. Трансмиссия часто расположена в непосредственной близости от электродвигателя и инвертора, и получает тепло от них через корпус.

Требования к температурному режиму трансмиссионного масла:

- Оптимальная рабочая температура масла: 60–100°C.
- При низких температурах вязкость масла возрастает, увеличивая потери на трение и ухудшая смазку.
- При высоких температурах вязкость падает, ухудшается защита от износа, масло окисляется.

В работе, опубликованной в Scientific Reports в 2025 году, представлен новый метод смазки с самоадаптирующейся регулировкой масляного насоса. Показано, что «новый метод смазки снижает температуру коробки передач, что более благоприятно для продления её срока службы», а «насос с регулируемым потоком не только повышает энергоэффективность, но и поддерживает работу коробки передач в оптимальном температурном диапазоне, значительно увеличивая срок службы трансмиссии».

3. Архитектура системы теплового менеджмента

3.1. Компоненты системы теплового менеджмента

Современная система теплового менеджмента электромобиля представляет собой сложную интегрированную систему, включающую несколько контуров охлаждения и множество управляемых компонентов.

Основные контуры охлаждения:

Контур охлаждения батареи. Обычно жидкостной (этиленгликоль-вода), с отдельным радиатором или интегрированный в общий контур. Может включать чиллер (холодильную машину) для активного охлаждения при высоких температурах.

Контур охлаждения силовой электроники (инвертор, DC/DC-преобразователь). Жидкостной, часто интегрированный с контуром охлаждения электродвигателя.

Контур охлаждения электродвигателя. Может быть жидкостным (рубашка охлаждения корпуса) или масляным (непосредственное охлаждение обмоток и магнитов маслом).

Контур смазки и охлаждения трансмиссии. Масляный, с электрическим масляным насосом и масляным радиатором (маслоохладителем).

Контур климатической установки (HVAC). Обеспечивает комфорт в салоне и может быть интегрирован с тепловым менеджментом батареи через чиллер.

В работе, посвящённой машинному обучению для многодоменной кооптимизации электрифицированных тяжёлых автомобилей, система структурирована в три отдельных жидкостных контура: два масляных контура — по одному для каждого электроприводного узла (EDU) для кондиционирования синхронных машин с постоянными магнитами (PMSM) и смазки трансмиссии, и один контур этиленгликоль-вода (EGW).

Исполнительные механизмы системы TMS:

- **Электрические насосы охлаждающей жидкости.** Обеспечивают циркуляцию жидкости в контурах.
- **Электрические масляные насосы.** Обеспечивают циркуляцию масла для смазки и охлаждения.
- **Вентиляторы радиаторов.** Обеспечивают принудительный обдув радиаторов.
- **Термостаты и клапаны.** Регулируют потоки жидкости между контурами.
- **Активные жалюзи радиатора (Active Grille Shutters).** Регулируют поток воздуха через радиатор.
- **Чиллеры и тепловые насосы.** Обеспечивают активное охлаждение или нагрев.

Чиллер — это устройство для охлаждения или нагрева жидкости (обычно воды) с целью поддержания определённой температуры в помещениях или охлаждения промышленного оборудования. 4

Принцип работы чиллера основан на выделении и поглощении тепловой энергии в результате изменения агрегатного состояния теплоносителя — он переходит из газообразного в жидкое состояние и наоборот.

3.2. Интеграция теплового и энергетического менеджмента

В современных электромобилях тепловой и энергетический менеджмент всё чаще рассматриваются как единая интегрированная задача. Это связано с тем, что эти две системы сильно связаны:

- Управление энергией (распределение крутящего момента между двигателями, выбор режима работы) определяет тепловыделение в компонентах.
- Тепловое состояние компонентов влияет на их КПД, а значит, на оптимальное распределение энергии.
- Система теплового менеджмента потребляет энергию, которая могла бы быть использована для движения.

В работе, опубликованной в журнале «Energy» в 2025 году, исследована нелинейная связь между стратегиями управления энергией и стратегиями теплового менеджмента в полноприводных электромобилях с распределённым приводом. Предложена **интегрированная стратегия теплового и**

энергетического менеджмента (ITEMS) на основе улучшенного алгоритма мягкого актёр-критик (SAC) с эволюционной стратегией.

Результаты показывают, что по сравнению с ITEMS на основе модельного прогнозирующего управления, предложенный подход снижает энергопотребление на 5,52% для задач энергетического менеджмента и на 15,94% для задач теплового менеджмента. При этом достигается более точный контроль температуры двигателей, батареи и салона.

В работе также отмечается, что при высокотемпературных условиях эксплуатации независимые стратегии управления энергией без учёта тепловых факторов приводят к увеличению общих затрат на движение на 12–16% и ускорению деградации критических компонентов на 15–52%.

3.3. Традиционные стратегии управления TMS

Традиционные стратегии управления системой теплового менеджмента основаны на жёстких правилах (rule-based). Например:

- Включение вентилятора радиатора при превышении температуры охлаждающей жидкости 90°C.
- Включение масляного насоса при превышении температуры масла 80°C.
- Ограничение мощности при превышении температуры батареи 50°C.

Эти стратегии просты и надёжны, но они неоптимальны. Они не учитывают прогноз изменения нагрузки, не координируют работу различных контуров охлаждения, не оптимизируют энергопотребление системы TMS. Именно поэтому всё большее распространение получают интеллектуальные стратегии управления TMS.

4. Интеллектуальные подходы к управлению тепловыми режимами

4.1. Стратегии на основе искусственного интеллекта

Современные исследования показывают, что искусственный интеллект может кардинально улучшить эффективность систем теплового менеджмента. В обзорной работе, опубликованной в 2025 году, отмечается «трансформационный потенциал систем на основе ИИ в оптимизации эффективности охлаждения, прогнозировании тепловых нагрузок и обнаружении неисправностей в реальном времени».

Прогнозирование тепловых нагрузок. Нейронные сети могут прогнозировать будущие тепловые нагрузки на основе данных о маршруте, стиле вождения, температуре окружающей среды. Это позволяет системе упреждающе включать охлаждение, а не реагировать на уже возникший перегрев.

Оптимизация работы насосов и вентиляторов. ИИ может определять оптимальную скорость насосов и вентиляторов для поддержания заданных температур с минимальным энергопотреблением.

Обнаружение неисправностей. Нейронные сети могут выявлять аномалии в тепловом поведении компонентов, указывающие на развивающиеся неисправности.

Адаптация к условиям. ИИ-системы могут адаптировать стратегии охлаждения к изменяющимся условиям — температуре окружающей среды, нагрузке, состоянию компонентов.

Одним из ярких примеров является система **ZF TempAI** — инструмент теплового менеджмента на основе ИИ от компании ZF. Эта система повышает точность прогнозирования более чем на 15% и обеспечивает увеличение пиковой мощности электроприводов до 6%, напрямую улучшая запас хода и отзывчивость электромобиля.

В работе, опубликованной в 2025 году в журнале «Energy Technology», представлен всесторонний обзор передовых технологий охлаждения для силовых установок электромобилей с акцентом на интеграцию инновационных материалов (нанофлюидов и материалов с фазовым переходом) и применение искусственного интеллекта для динамической тепловой оптимизации.

4.2. Машинное обучение для прогнозного управления TMS

Методы машинного обучения активно применяются для создания прогнозных систем управления тепловым менеджментом.

NARX-нейронные сети. В работе, опубликованной в 2025 году в журнале «eTransportation», разработана стратегия прогнозного управления на основе машинного обучения с использованием нелинейной авторегрессионной модели с экзогенными входами (NARX). Модель прогнозирует ключевые тепловые параметры: температуру салона, температуру батареи и потребляемую мощность компрессора кондиционера как для процессов нагрева, так и охлаждения.

В отличие от более ресурсоёмких моделей, таких как LSTM, NARX-модель предлагает решение с низкой вычислительной сложностью, совместимое с работой в реальном времени, что делает её особенно подходящей для встраиваемых автомобильных контроллеров.

Результаты показывают, что ML-управление позволило достичь 18% снижения энергопотребления компрессора и 10% экономии общей нагрузки вспомогательных систем TMS. В летних условиях эксплуатации это соответствует примерно 0,6% увеличению запаса хода.

Гибридные модели CNN-LSTM. В работе, опубликованной в 2026 году в IEEE Xplore, разработана и валидирована высокоточная модель интегрированной системы теплового менеджмента на основе гибридной архитектуры CNN-LSTM, обученная на реальных данных автомобиля.

Physics-Informed Transformer. В работе, опубликованной в 2026 году в журнале «International Journal of Heat and Mass Transfer», предложен подход на основе **физически-информированного Transformer (Physics-Informed Transformer)** для сквозного прогнозирования энергопотребления системы теплового менеджмента в условиях экстремальных температур.

Модель использует PatchTST (Patch-based Time-Series Transformer) для захвата долгосрочных зависимостей в операционных последовательностях и интегрирует физически-информированные нейросетевые (PINN) ограничения в процессе обучения для обеспечения физической достоверности прогнозов.

Модель оценена на реальном наборе данных, содержащем более 3,2 миллиона выборок из тестов электромобиля с тепловым насосом в экстремальных температурных условиях (зима/лето). Результаты показывают, что предложенная модель превосходит базовые модели, особенно в долгосрочном прогнозировании, что обеспечивает надёжную основу для прогнозного теплового менеджмента и оптимизации энергопотребления.

4.3. Обучение с подкреплением (Reinforcement Learning)

Обучение с подкреплением является одним из наиболее перспективных подходов к управлению тепловыми режимами, особенно в сочетании с управлением энергией.

В работе, опубликованной в 2025 году в журнале «Energy», предложен **эволюционный интегрированный подход к тепловому и энергетическому менеджменту (ITEMS)** на основе обучения с подкреплением для полноприводных электромобилей с распределённым приводом.

Ключевые особенности подхода:

1. Задача управления формулируется как **марковский процесс принятия решений (MDP)** , объединяющий распределение крутящего момента и термодинамическую регуляцию.
2. Используется улучшенный алгоритм **мягкого актёр-критик (SAC)** с эволюционной стратегией (ES).
3. Реализуется совместная оптимизация распределения мощности и термодинамической регуляции.

Результаты показывают значительное превосходство предложенного подхода по сравнению с ITEMS на основе модельного прогнозирующего управления (MPC):

- Снижение энергопотребления на 5,52% для задач энергетического менеджмента.
- Снижение энергопотребления на 15,94% для задач теплового менеджмента.
- Более точный контроль температуры двигателей, батареи и салона.
- Встроенная эволюционная стратегия снижает энергопотребление вспомогательных систем TMS, повышая эффективность двигателей.

В другой работе, опубликованной в 2025 году в IEEE Xplore, исследуется **интегрированный подход к энергетическому и тепловому менеджменту (IETM)** для электромобилей с учётом старения батареи и комфорта в салоне.

4.4. Нечёткая логика и эволюционные алгоритмы

Нечёткая логика и эволюционные алгоритмы также находят применение в управлении тепловыми режимами.

В работе, опубликованной в 2026 году в IEEE Xplore, предложена **система IoT-интегрированного теплового менеджмента батареи (BTMS)** с **нечётким логическим контроллером, оптимизированным алгоритмом серого волка (GWO-FLC)**.

В другой работе, опубликованной в 2026 году, предлагается **нечёткий логический контроллер для оптимального теплового менеджмента батарей электромобилей**.

В работе, опубликованной в 2026 году в IEEE Xplore, предлагается подход к оптимизации теплового менеджмента батареи на основе **модельного прогнозирующего управления (MPC) с интеграцией метода роя частиц (PSO)** .

5. Методы охлаждения компонентов

5.1. Охлаждение электродвигателя

Для охлаждения электродвигателей в электромобилях применяются различные методы:

Воздушное охлаждение. Простейший метод, используемый в маломощных двигателях. Вентилятор, установленный на валу двигателя или отдельный электрический вентилятор, обеспечивает поток воздуха через корпус двигателя и рёбра охлаждения. Недостаток — ограниченная эффективность при высоких нагрузках.

Жидкостное охлаждение (водяная рубашка). Охлаждающая жидкость (этиленгликоль-вода) циркулирует по каналам в корпусе двигателя, отводя тепло от статора. Это наиболее распространённый метод для мощных тяговых двигателей. Эффективность высокая, но тепло отводится в основном от статора; ротор и магниты охлаждаются хуже.

Масляное охлаждение. Масло непосредственно подаётся на нагревающиеся участки — обмотки статора, магниты ротора, подшипники. Масляное охлаждение обеспечивает более эффективный отвод тепла от всех частей двигателя, включая ротор. В проектах типа FITGEN используется уникальная масляная структура охлаждения — двустороннее масляное охлаждение (2Way-масляный цикл), позволяющее подавать охлаждающее масло непосредственно на нагревающиеся участки.

Гибридное охлаждение (oil-water hybrid). Сочетание жидкостного охлаждения корпуса и масляного охлаждения внутренних компонентов. Исследования показывают, что гибридное охлаждение позволяет ограничить температурный диапазон двигателя и редуктора в пределах ±3°C и повысить эффективность теплопередачи на 25%.

В работе, посвящённой стратегии выбора передачи для двух синхронных машин с постоянными магнитами, отмечается, что «электродвигатели, особенно PMSM, демонстрируют изменения эффективности и производительности в зависимости от их внутренней температуры. Такие факторы, как сопротивление меди, магнитное насыщение и потери в стали, меняются по мере нагрева машины». Поэтому в стратегии переключения передач предлагается пересчитывать оптимальное состояние передачи при каждом изменении температуры двигателя на 5°C.

5.2. Охлаждение инвертора

Инвертор требует наиболее интенсивного охлаждения из-за высокой плотности теплового потока от силовых ключей.

Охлаждающие пластины (cold plates). Силовые ключи устанавливаются на охлаждающую пластину с каналами для охлаждающей жидкости. Жидкость отводит тепло непосредственно от основания ключей. Это наиболее распространённый метод.

Микроканальное охлаждение. Использование микроканалов в основании охлаждающей пластины для увеличения площади теплообмена. Недорогие штампованные микроканальные охладители показали высокую эффективность.

Непосредственное жидкостное охлаждение. В некоторых конструкциях охлаждающая жидкость непосредственно контактирует с силовыми ключами (например, при использовании изолированных металлических оснований). Обеспечивает максимальную эффективность, но требует сложной герметизации.

В работе по охлаждению силовой электроники отмечается необходимость комплексного подхода к проектированию систем охлаждения инверторов с учётом тепловых режимов.

5.3. Охлаждение тяговой батареи

Тепловой менеджмент батареи (Battery Thermal Management System, BTMS) является одной из наиболее критических подсистем электромобиля.

Воздушное охлаждение. Используется в некоторых моделях с принудительной циркуляцией воздуха через батарейный блок. Простой и дешёвый метод, но недостаточно эффективный для мощных батарей с высокой плотностью энергии.

Жидкостное охлаждение. Охлаждающая жидкость циркулирует по каналам между ячейками батареи, отводя тепло. Это наиболее распространённый и эффективный метод. Может использоваться как для охлаждения, так и для нагрева батареи в холодную погоду.

Охлаждение с фазовым переходом (Phase Change Materials, PCM). Материалы с фазовым переходом (например, парафины) поглощают тепло при плавлении, обеспечивая пассивное охлаждение. Могут использоваться как дополнение к жидкостному охлаждению для сглаживания пиковых нагрузок.

Тепловые насосы и чиллеры. Для активного охлаждения батареи при высоких температурах окружающей среды или при быстрой зарядке используются чиллеры (холодильные машины), которые могут работать от компрессора климатической установки.

5.4. Охлаждение трансмиссионного масла

Трансмиссионное масло выполняет две функции: смазку и охлаждение. В современных e-Axle используется масляное охлаждение с принудительной циркуляцией.

Электрический масляный насос (EOP). Обеспечивает циркуляцию масла для смазки и охлаждения. Управление EOP позволяет регулировать поток масла в зависимости от тепловой нагрузки.

Масляный радиатор (маслоохладитель). Для отвода тепла от масла используется масляный радиатор, который может быть интегрирован с основным радиатором системы охлаждения или иметь собственный.

Самоадаптирующаяся регулировка. В работе, опубликованной в Scientific Reports в 2025 году, представлен новый метод смазки с самоадаптирующейся регулировкой масляного насоса. Переменный поток масла не только повышает энергоэффективность, но и поддерживает работу коробки передач в оптимальном температурном диапазоне, значительно увеличивая срок службы трансмиссии.

6. Интеграция теплового и энергетического менеджмента

6.1. Нелинейная связь между тепловыми и энергетическими процессами

Тепловые и энергетические процессы в электромобиле тесно связаны и нелинейны:

Температура → КПД. Повышение температуры электродвигателя увеличивает сопротивление обмоток, снижая КПД. Повышение температуры инвертора увеличивает потери проводимости. Температура батареи влияет на её внутреннее сопротивление и доступную мощность.

КПД → Тепловыделение. Снижение КПД означает, что большая часть энергии преобразуется в тепло, а не в механическую работу. Это создаёт положительную обратную связь: нагрев снижает КПД, снижение КПД усиливает нагрев.

Управление энергией → Тепловыделение. Распределение крутящего момента между двигателями определяет, какие компоненты нагреваются больше. Выбор режима работы (EV/Hybrid) определяет, какие источники тепла активны.

Тепловое управление → Энергопотребление. Насосы, вентиляторы и компрессоры TMS потребляют энергию, которая могла бы быть использована для движения.

В работе, опубликованной в 2025 году, отмечается, что «высокочастотная динамическая координация множества двигателей приводит к проблемам в энергетическом и тепловом менеджменте. Традиционные стратегии управления энергией и тепловым менеджментом оптимизировались независимо, пренебрегая сложной связью между ними».

6.2. Интегрированные стратегии управления

Интегрированные стратегии теплового и энергетического менеджмента рассматривают управление энергией и управление теплом как единую задачу оптимизации.

Преимущества интегрированного подхода:

1. **Глобальная оптимальность.** Учёт тепловых ограничений при распределении энергии позволяет избежать ситуаций, когда энергетически оптимальное решение приводит к перегреву компонентов и последующему ограничению мощности.
2. **Снижение энергопотребления TMS.** Оптимизация работы насосов и вентиляторов с учётом прогноза тепловых нагрузок позволяет снизить энергопотребление системы охлаждения.
3. **Повышение эффективности.** Поддержание компонентов в оптимальном температурном диапазоне обеспечивает их максимальный КПД.
4. **Увеличение срока службы.** Предотвращение перегрева и поддержание оптимальных температур замедляет деградацию компонентов.

Интегрированная стратегия теплового и энергетического менеджмента (ITEMS) на основе обучения с подкреплением, предложенная в работе 2025 года, демонстрирует значительное улучшение по сравнению с традиционными подходами:

- Снижение энергопотребления на 5,52% для задач энергетического менеджмента.
- Снижение энергопотребления на 15,94% для задач теплового менеджмента.
- Более точный контроль температуры всех компонентов.

6.3. Температурно-зависимое управление энергопотоками

Современные стратегии управления энергией всё чаще учитывают тепловое состояние компонентов при принятии решений.

Ограничение мощности при перегреве. При достижении температурных пределов система ограничивает мощность, чтобы предотвратить повреждение компонентов. Интеллектуальные системы делают это плавно, а не скачкообразно.

Перераспределение нагрузки. В автомобилях с несколькими электродвигателями (например, полноприводные с отдельными двигателями на осях) система может перераспределять нагрузку между двигателями, чтобы избежать перегрева одного из них.

Упреждающее охлаждение. Система может включать охлаждение до того, как компонент достигнет критической температуры, на основе прогноза будущей нагрузки.

Термально-информированное управление. В работе, посвящённой стратегии выбора передачи для двух синхронных машин с постоянными магнитами, предлагается пересчёт оптимального состояния передачи при каждом изменении температуры двигателя на 5°C. Это позволяет учитывать тепловое состояние двигателя при выборе передачи.

7. Практические примеры и результаты

7.1. ZF TempAI

Система **TempAI** от ZF является одним из наиболее ярких примеров применения искусственного интеллекта для теплового менеджмента.

Характеристики:

- Повышение точности прогнозирования более чем на 15%.
- Увеличение пиковой мощности электроприводов до 6%.
- Непосредственное улучшение запаса хода и отзывчивости электромобиля.

Система использует данные от множества датчиков и алгоритмы машинного обучения для прогнозирования тепловых нагрузок и оптимизации работы системы охлаждения. Это позволяет более эффективно использовать доступную мощность электродвигателя, не опасаясь перегрева.

7.2. Интегрированный тепловой и энергетический менеджмент на основе SAC

В работе, опубликованной в 2025 году в журнале «Energy», представлена **эволюционная интегрированная стратегия теплового и энергетического менеджмента (ITEMS)** на основе обучения с подкреплением для полноприводных электромобилей с распределённым приводом.

Результаты:

- снижение энергопотребления на 5,52% для энергетического менеджмента.
- снижение энергопотребления на 15,94% для теплового менеджмента.
- более точный контроль температуры двигателей, батареи и салона.
- снижение энергопотребления вспомогательных систем tms и повышение эффективности двигателей.

7.3. ML-прогнозное управление TMS (NARX)

В работе, опубликованной в 2025 году в журнале «eTransportation», разработана стратегия прогнозного управления на основе машинного обучения.

Результаты:

- 18% снижение энергопотребления компрессора кондиционера.
- 10% экономия общей нагрузки вспомогательных систем TMS.
- 0,6% увеличение запаса хода в летних условиях.

7.4. Physics-Informed Transformer для прогнозирования TMS

В работе, опубликованной в 2026 году, предложен **физически-информированный Transformer** для прогнозирования энергопотребления TMS.

Результаты:

- Модель обучена на >3,2 млн реальных выборок.
- Превосходит базовые модели в долгосрочном прогнозировании.
- Обеспечивает надёжную основу для прогнозного теплового менеджмента.

7.5. Самоадаптирующаяся система смазки трансмиссии

В работе, опубликованной в Scientific Reports в 2025 году, представлен новый метод смазки с **самоадаптирующейся регулировкой масляного насоса**.

Результаты:

- Снижение температуры коробки передач.
- Повышение энергоэффективности.
- Поддержание работы в оптимальном температурном диапазоне.
- Значительное увеличение срока службы трансмиссии.

8. Вызовы и перспективы развития

8.1. Основные вызовы

Сложность системы. Интегрированная система теплового менеджмента включает множество контуров, исполнительных механизмов и датчиков, что делает её сложной для проектирования и управления.

Неопределённость. Тепловые процессы зависят от многих факторов: температуры окружающей среды, стиля вождения, состояния компонентов, которые трудно точно предсказать.

Компромисс между охлаждением и энергопотреблением. Активное охлаждение требует энергии. Слишком интенсивное охлаждение может снизить общую эффективность автомобиля.

Работа в экстремальных условиях. Система должна эффективно работать в широком диапазоне температур окружающей среды — от -40°C до +50°C.

Старение компонентов. Тепловые характеристики компонентов меняются с течением времени (изменение теплового сопротивления, деградация материалов), что требует адаптации стратегий управления.

Интеграция с автономным вождением. В автономных автомобилях управление энергией и теплом должно быть интегрировано с планированием траектории для совместной оптимизации.

8.2. Перспективы развития

Более глубокая интеграция TMS и EMS. Разработка единых архитектур управления, в которых тепловые и энергетические решения принимаются совместно на основе единой модели.

Использование облачных вычислений. Перенос части вычислительных задач по тепловому моделированию и оптимизации в облако для использования больших данных.

Предиктивное тепловое управление. Использование данных о маршруте, погоде и трафике для упреждающего управления тепловыми режимами.

Самообучающиеся системы. Разработка систем, которые адаптируются к индивидуальному стилю вождения и условиям эксплуатации на основе непрерывного обучения.

Новые материалы. Использование нанофлюидов в охлаждающих жидкостях, материалов с фазовым переходом для пассивного охлаждения, новых теплоотводящих материалов.

Интеграция с тепловыми насосами. Более широкое использование тепловых насосов для одновременного обогрева салона и охлаждения батареи, повышая общую энергоэффективность.

9. Закрепление и завершение

9.1. Мини-тест

1. Почему тепловой менеджмент является критической проблемой для электромобилей?
2. Каковы основные источники тепла в электродвигателе?
3. Какие методы охлаждения применяются для батареи электромобиля?
4. В чём преимущества интегрированного управления тепловым и энергетическим менеджментом?
5. Какие методы искусственного интеллекта применяются для управления тепловыми режимами?

9.2. Эталонные краткие ответы

1. **Тепловой менеджмент критичен** для электромобилей, потому что температура напрямую влияет на эффективность (КПД падает с нагревом), надёжность и долговечность (перегрев сокращает срок службы) и безопасность (термический разгон батареи). Кроме того, система охлаждения сама потребляет энергию, снижая запас хода.
2. **Основные источники тепла в электродвигателе:** джоулево тепло в обмотках (I^2R), потери в стали (гистерезис и вихревые токи), механические потери (трение в подшипниках).
3. **Методы охлаждения батареи:** воздушное охлаждение (простое, но малоэффективное), жидкостное охлаждение (наиболее распространённое и эффективное), охлаждение с фазовым переходом (PCM для пассивного охлаждения), охлаждение с использованием тепловых насосов и чиллеров для активного охлаждения.
4. **Преимущества интегрированного управления:** глобальная оптимальность (учёт тепловых ограничений при распределении энергии), снижение энергопотребления TMS (оптимизация работы насосов и вентиляторов), повышение эффективности (поддержание оптимальных температур), увеличение срока службы компонентов.
5. **Методы ИИ:** нейронные сети (NARX, LSTM, CNN-LSTM) для прогнозирования тепловых параметров, физически-информированные модели (Physics-Informed Transformer), обучение с подкреплением (SAC, IETM), нечёткая логика, эволюционные алгоритмы (PSO, GWO).

9.3. Итоговые положения

Тепловой менеджмент является критической задачей для электромобилей, влияющей на эффективность, надёжность и безопасность. Система TMS может потреблять значительную часть энергии автомобиля, особенно в экстремальных условиях.

Основные компоненты, требующие теплового управления: электродвигатель (потери в обмотках и стали), инвертор (потери переключения и проводимости), тяговая батарея (джоулево и энтропийное тепло), трансмиссия и трансмиссионное масло (трение и перемешивание).

Система TMS включает несколько контуров охлаждения (жидкостной, масляный, HVAC) и исполнительные механизмы (насосы, вентиляторы, клапаны, активные жалюзи).

Традиционные стратегии управления TMS основаны на правилах и неоптимальны.

Интеллектуальные подходы включают нейронные сети (NARX, LSTM, CNN-LSTM, Physics-Informed Transformer) для прогнозирования, обучение с подкреплением (SAC, IETM) для совместной оптимизации, нечёткую логику и эволюционные алгоритмы.

Интеграция теплового и энергетического менеджмента позволяет достичь глобальной оптимальности и снизить общее энергопотребление на 5–16%.

Практические примеры (ZF TempAI, ITEMS на основе SAC, ML-прогнозное управление, Physics-Informed Transformer, самоадаптирующаяся смазка) демонстрируют значительный потенциал интеллектуального теплового менеджмента.

Перспективы развития связаны с более глубокой интеграцией, использованием облачных вычислений, предиктивным управлением на основе данных о маршруте, самообучающимися системами и новыми материалами.

Задание после лекции

Выберите один из аспектов интеллектуального теплового менеджмента (метод охлаждения конкретного компонента, стратегия интеллектуального управления, интегрированный подход TMS/EMS, практическая реализация) и подготовьте аналитический обзор (2–3 страницы), в котором:

1. Опишите выбранный аспект и его роль в системе теплового менеджмента.
2. Объясните физические принципы и технические решения.
3. Проанализируйте преимущества и ограничения.
4. Приведите примеры из научных исследований или промышленности.
5. Оцените перспективы развития выбранного аспекта.

Контрольные вопросы

1. Почему тепловой менеджмент является критической проблемой для электромобилей?
2. Как температура влияет на эффективность электродвигателя?
3. Каковы основные источники тепла в электродвигателе?
4. Каковы требования к температурному режиму инвертора?
5. Почему температурная однородность внутри батареи критична для её срока службы?
6. Каковы оптимальные температуры для тяговой батареи?
7. Какие проблемы возникают при работе батареи при низких температурах?
8. Каковы источники тепла в трансмиссии?
9. Какие методы охлаждения применяются для электродвигателя?
10. В чём отличие воздушного, жидкостного и масляного охлаждения электродвигателя?
11. Какие методы охлаждения применяются для инвертора?
12. Что такое охлаждающая пластина (cold plate) и как она работает?
13. Какие методы охлаждения применяются для тяговой батареи?
14. Что такое материалы с фазовым переходом (PCM) и как они применяются для охлаждения батареи?
15. Какие методы охлаждения применяются для трансмиссионного масла?
16. Каковы основные контуры охлаждения в системе TMS электромобиля?
17. Как интегрированы тепловой и энергетический менеджмент в современных электромобилях?
18. Каковы преимущества интегрированного управления TMS и EMS?
19. Как нелинейная связь между тепловыми и энергетическими процессами влияет на управление?
20. Как нейронные сети применяются для прогнозирования тепловых параметров?
21. Что такое NARX-модель и как она применяется в TMS?
22. Что такое Physics-Informed Transformer и в чём его преимущество?
23. Как обучение с подкреплением применяется для управления TMS?
24. Что такое ITEMS и какие результаты она показывает?
25. Как нечёткая логика применяется для управления тепловыми режимами?
26. Что такое ZF TempAI и какие результаты она обеспечивает?
27. Как температура влияет на выбор передачи в трансмиссии?
28. Каковы основные вызовы при разработке систем интеллектуального теплового менеджмента?
29. Как самоадаптирующаяся система смазки трансмиссии улучшает её работу?

30. Каковы перспективы развития интеллектуального теплового менеджмента?

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. Ahmad H., Dhamodharan P., Kim S. C. Advances in Cooling Technologies for Electric Vehicle Drive Motors, Reducers, and Inverters: A Comprehensive Review // Energy Technology. — 2025. — DOI: 10.1002/ente.202401691.
6. Evolutionary integrated thermal and energy management strategy based on reinforcement learning for distributed four-wheel drive electric vehicles // Energy. — 2025. — Vol. 335. — Art. 138036.
7. Machine learning-based predictive control of thermal management system in battery electric vehicles // eTransportation. — 2025.
8. Physics-informed Transformer for end-to-end energy prediction of integrated electric vehicle thermal management under extreme ambient temperature conditions // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2026.
9. A novel lubricating method of oil pump with self-adaptive adjustment function for transmission // Scientific Reports. — 2025.
10. Li X., Wang R. Towards integrated thermal management systems in battery electric vehicles: A review // eTransportation. — 2025. — Vol. 24. — Art. 100396.
11. Review on Enhancing Electric Vehicle Performance and Sustainability through Advanced Motor Technology and Thermal Management // IEEE Xplore. — 2025.
12. Optimization of Battery Thermal Management in Electric Vehicles: a Model Predictive Control Approach Integrated With Particle Swarm Optimization // IEEE Xplore. — 2026.

13. IoT-Enabled Battery Thermal Management in EVs Using Grey Wolf Optimized Fuzzy Control // IEEE Xplore. — 2025.
14. ISO 26262:2018. Road Vehicles — Functional Safety. Parts 1–10. — Geneva: International Organization for Standardization, 2018.
15. ISO/SAE 21434:2021. Road Vehicles — Cybersecurity Engineering. — Geneva: International Organization for Standardization, 2021.

Электронные ресурсы

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