ЛЕКЦИЯ 2
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Цель

Сформировать у обучающихся системное представление о вычислительной архитектуре современных интеллектуальных транспортных средств, принципах организации электронных блоков управления, бортовых вычислительных платформах, методах обработки информации в реальном времени и требованиях к производительности, предъявляемых к системам управления автомобилями.

Планируемые результаты

После изучения данной лекции обучающийся сможет:

- объяснить эволюцию архитектуры электронных систем управления автомобилями;
- описать структуру и функции электронных блоков управления (ECU);
- охарактеризовать современные бортовые вычислительные платформы и их компоненты;
- объяснить принципы обработки информации в реальном времени в автомобильных системах;
- перечислить ключевые требования к производительности вычислительных систем;
- описать основные бортовые сети передачи данных и их характеристики;
- анализировать архитектурные решения применительно к конкретным задачам управления.

Проблемный вопрос

Вопрос занятия. Современный автомобиль содержит до ста и более электронных блоков управления, каждый из которых решает свою задачу. Но возможно ли эффективно управлять такой сложной распределённой системой, когда каждый блок работает автономно? Или будущее за централизацией — одним мощным компьютером, управляющим всеми функциями автомобиля? Как найти баланс между производительностью, надёжностью, стоимостью и безопасностью?

1. Введение в вычислительные технологии автомобилей

Современный автомобиль представляет собой распределённую киберфизическую систему, в которой механические компоненты управляются электроникой и программным обеспечением. Количество электронных блоков управления в премиальном автомобиле может достигать ста и более физических устройств. Эти блоки управляют двигателем, трансмиссией, тормозной

системой, рулевым управлением, системами комфорта, мультимедиа, навигацией, системами помощи водителю и многими другими функциями.

Вычислительные технологии являются фундаментом, на котором строятся все интеллектуальные системы управления. Без мощных и надёжных вычислительных платформ невозможно реализовать сложные алгоритмы искусственного интеллекта, обработку данных с многочисленных датчиков в реальном времени, обмен информацией между блоками и принятие решений в миллисекундном масштабе.

В данной лекции мы рассмотрим архитектуру электронных систем управления, эволюцию вычислительных платформ, методы обработки информации в реальном времени, требования к производительности и бортовые сети передачи данных. Понимание этих основ необходимо для дальнейшего изучения конкретных алгоритмов и методов интеллектуального управления.

2. Эволюция архитектуры электронных систем управления

Архитектура электронных и электрических систем (E/E Architecture) автомобиля прошла значительную эволюцию за последние десятилетия. Понимание этой эволюции позволяет осознать, почему современные системы устроены именно так, и куда они движутся.

2.1. Распределённая архитектура

Первое поколение электронных систем управления характеризовалось **распределённой архитектурой**. Каждая функция имела свой собственный электронный блок управления (ECU), который был подключён к соответствующим датчикам и исполнительным механизмам. Блоки обменивались информацией через шину CAN (Controller Area Network), но каждый из них работал автономно.

В такой архитектуре каждый ECU выполнял строго определённый набор функций. Например, блок управления двигателем отвечал только за двигатель, блок ABS — только за антиблокировочную систему тормозов, блок управления подушками безопасности — только за пассивную безопасность. Эти блоки разрабатывались разными поставщиками, имели разное программное обеспечение и слабо взаимодействовали друг с другом.

Такая распределённая архитектура, существующая до сих пор во многих автомобилях, признаётся неэффективной. Основные недостатки:

- **Избыточность аппаратных средств.** Каждый блок имеет свой микроконтроллер, память, источники питания, что увеличивает стоимость и вес.
- **Сложность обновлений.** Для изменения функциональности необходимо обновлять программное обеспечение в каждом блоке отдельно.
- **Ограниченная вычислительная мощность.** Каждый блок имеет ограниченные ресурсы, что не позволяет реализовать сложные алгоритмы.
- **Сложность интеграции.** Разные блоки от разных поставщиков трудно интегрировать в единую систему.

2.2. Доменно-ориентированная архитектура

Следующим шагом эволюции стала **доменно-ориентированная архитектура** (Domain-Oriented Architecture). Вместо множества отдельных ECU функции были сгруппированы по доменам: домен силовой установки, домен кузова, домен безопасности, домен мультимедиа и т.д. Каждый домен управлялся одним или несколькими мощными контроллерами, которые интегрировали функции нескольких ранее отдельных блоков.

Доменно-ориентированная архитектура позволила сократить количество ECU, упростить обмен данными между функциями одного домена и повысить вычислительную мощность за счёт использования более производительных процессоров. Однако междоменное взаимодействие по-прежнему оставалось ограниченным.

2.3. Зональная архитектура

Современный этап развития — **зональная архитектура** (Zonal Architecture). В этой архитектуре автомобиль разделён на физические зоны (передняя, задняя, левая, правая), и в каждой зоне установлен зональный контроллер, который управляет всеми устройствами в этой зоне.

Зональные контроллеры подключаются к центральному автомобильному компьютеру (Vehicle Computer) или высокопроизводительному вычислителю (High-Performance Computer, HPC). Центральный компьютер выполняет все вычислительно-сложные задачи: обработка данных с камер и радаров, принятие решений для ADAS, управление мультимедиа, навигация. Зональные контроллеры отвечают за низкоуровневое управление датчиками и исполнительными механизмами в своей зоне.

Преимущества зональной архитектуры:

- **Сокращение количества ECU.** Современные решения позволяют объединить более 20 ECU в три централизованных блока.
- **Упрощение жгутов проводов.** Проводка прокладывается внутри зон, а не между всеми блоками по всему автомобилю.
- **Повышение вычислительной мощности.** Центральный компьютер может использовать самые современные процессоры.
- **Упрощение обновлений.** Программное обеспечение централизованно и может обновляться как единое целое.
- **Гибкость.** Функции могут быть перераспределены между блоками программно, без изменения аппаратуры.

2.4. Программно-определяемый автомобиль

Конечная цель эволюции — **программно-определяемый автомобиль** (Software-Defined Vehicle, SDV). В такой архитектуре аппаратное обеспечение становится абстракцией, а функциональность определяется исключительно программным обеспечением. Это позволяет:

- добавлять новые функции в течение всего жизненного цикла автомобиля через беспроводные обновления;

- персонализировать автомобиль под конкретного владельца;
- быстро исправлять ошибки и устранять уязвимости;
- создавать экосистему приложений для автомобиля.

Переход к программно-определяемому автомобилю требует кардинального пересмотра подходов к разработке: от аппаратно-ориентированных к программно-ориентированным, от жёстко заданных функций к гибким сервисам.

3. Электронные блоки управления (ECU)

3.1. Структура и функции ECU

Электронный блок управления (Electronic Control Unit, ECU) — это специализированное вычислительное устройство, предназначенное для управления конкретными функциями автомобиля. Типичный ECU состоит из следующих компонентов:

Микроконтроллер (MCU) — центральный процессорный элемент, выполняющий программу управления. Современные автомобильные микроконтроллеры могут иметь несколько ядер, работать на частотах до 800 МГц и более. Они строятся на базе архитектур Arm Cortex-R (для задач реального времени) и Cortex-M (для менее критичных задач).

Память. ECU содержит несколько типов памяти: flash-память для хранения программного обеспечения и калибровок, RAM для временных данных, EEPROM для долговременного хранения параметров. Современные микроконтроллеры начинают использовать MRAM (магниторезистивную память) вместо традиционной flash, что обеспечивает более высокую скорость и надёжность.

Входные/выходные интерфейсы. ECU подключается к датчикам (аналоговые и цифровые входы), исполнительным механизмам (выходы с ШИМ-модуляцией, релейные выходы), а также к бортовым сетям (CAN, LIN, FlexRay, Ethernet).

Источник питания. Обеспечивает стабильное питание всех компонентов ECU, защиту от перенапряжений и помех, характерных для автомобильной электросети.

Специализированные периферийные устройства. В зависимости от назначения ECU может содержать специализированные блоки: таймеры для управления впрыском, модули ШИМ для управления электродвигателями, аналого-цифровые преобразователи для считывания сигналов датчиков, интерфейсы для работы с датчиками Холла и т.д.

3.2. Классификация ECU

По функциональному назначению ECU можно классифицировать следующим образом:

ECU силовой установки. Управляют двигателем внутреннего сгорания, электродвигателем, гибридной силовой установкой. Обрабатывают

сигналы датчиков (положение коленвала, расход воздуха, температура, давление) и формируют управляющие сигналы (впрыск, зажигание, управление дроссельной заслонкой).

ECU трансмиссии. Управляют автоматической коробкой передач, трансмиссией электромобиля, системами Torque Vectoring. Определяют момент переключения передач, управляют фрикционными муфтами, распределяют крутящий момент.

ECU систем безопасности. Управляют ABS, ESP, подушками безопасности, системами предупреждения столкновений. Требуют самого высокого уровня надёжности и быстродействия.

ECU кузовных систем. Управляют освещением, стеклоподъёмниками, центральным замком, климат-контролем, сиденьями.

ECU мультимедиа и связи. Обеспечивают работу информационно-развлекательной системы, навигации, телематики, связи с внешним миром.

ECU систем помощи водителю (ADAS). Обрабатывают данные с камер, радаров, лидаров, принимают решения о необходимости вмешательства в управление.

3.3. Тенденции развития ECU

Современные тенденции в развитии ECU направлены на:

Консолидацию функций. Вместо множества специализированных ECU всё больше функций выполняется на мощных центральных процессорах. Это снижает стоимость, упрощает обновления и позволяет реализовать сложные межфункциональные алгоритмы.

Повышение производительности. Автомобильные микроконтроллеры переходят на более тонкие технологические нормы (16 нм и менее), работают на более высоких частотах, используют многоядерные архитектуры.

Интеграцию аппаратного ускорения. Для задач искусственного интеллекта и обработки изображений ECU оснащаются специализированными нейронными процессорами (NPU), графическими процессорами (GPU), цифровыми сигнальными процессорами (DSP).

Повышение уровня безопасности. ECU для критически важных функций должны соответствовать требованиям ISO 26262 на уровень ASIL-D — самый высокий уровень функциональной безопасности.

4. Бортовые вычислительные платформы

4.1. Высокопроизводительные автомобильные компьютеры

С развитием систем автономного вождения и интеллектуальных функций возникла потребность в вычислительных платформах, значительно превосходящих по производительности традиционные ECU. Эти платформы, называемые высокопроизводительными автомобильными компьютерами (High-Performance Vehicle Computers, HPVC) или просто автомобильными

компьютерами, представляют собой сложные системы на кристалле (SoC), объединяющие различные типы процессорных ядер.

Современный автомобильный SoC (System-on-Chip) включает:

- **Ядра общего назначения (CPU).** Для выполнения операционной системы, управления потоками данных, выполнения некритичных по времени задач. Используются архитектуры Arm Cortex-A с производительностью до тысяч DMIPS (Dhrystone MIPS).
- **Ядра реального времени (CPU-RT).** Для задач с жёсткими временными ограничениями, например, управление исполнительными механизмами. Используются архитектуры Arm Cortex-R, работающие в lockstep-режиме для повышения надёжности.
- **Графические процессоры (GPU).** Для обработки изображений, рендеринга интерфейса, компьютерного зрения. Производительность измеряется в GFLOPS (миллиардах операций с плавающей запятой в секунду).
- **Нейронные процессоры (NPU).** Для выполнения операций нейронных сетей — умножения матриц, свёрток, активаций. Производительность измеряется в TOPS (триллионах операций в секунду).
- **Цифровые сигнальные процессоры (DSP).** Для обработки сигналов с радаров, аудиообработки, цифровой фильтрации.
- **Контроллеры памяти.** Для управления высокоскоростной памятью типа LPDDR с шириной шины до 512 бит.
- **Высокоскоростные интерфейсы.** Для подключения камер (MIPI CSI), дисплеев (MIPI DSI, HDMI), сетевых интерфейсов (Automotive Ethernet).

4.2. Основные игроки на рынке автомобильных SoC

Рынок автомобильных вычислительных платформ активно развивается, и на нём представлены несколько крупных игроков:

NVIDIA. Лидер в области платформ для автономного вождения. Платформа NVIDIA DRIVE включает SoC Orin (производительность 254 TOPS на одном кристалле, до 1000 TOPS в многокристальной конфигурации) и Thor — следующее поколение, производительность которого в 20 раз превышает Orin. NVIDIA предлагает сквозное решение «от облака до автомобиля»: обучение нейронных сетей на суперкомпьютерах DGX, симуляция в Omniverse, выполнение на бортовом компьютере DRIVE.

Qualcomm. Активно развивает платформу Snapdragon Ride для ADAS и автономного вождения, а также решения для цифровой приборной панели и мультимедиа. Qualcomm предлагает интеграцию функций информационно-развлекательной системы и ADAS на одном SoC.

Intel (Mobileye). Специализируется на решениях для систем помощи водителю и автономного вождения, используя собственную архитектуру EyeQ.

Huawei. Предлагает комплексные решения для интеллектуальных автомобилей, включая собственные SoC.

NXP. Крупный поставщик автомобильных микроконтроллеров и процессоров. Линейка S32 включает процессоры для зональных архитектур

(S32E2, позволяющий объединить более 20 ECU в три централизованных блока) и микроконтроллеры S32K5 на 16-нм технологии с MRAM-памятью.

Texas Instruments. Предлагает процессоры TDA4 для ADAS с несколькими ядрами Arm Cortex-A, Cortex-R и нейронными процессорами.

4.3. Требования к производительности

Современные автомобильные вычислительные системы должны удовлетворять комплексу требований, которые значительно отличаются от требований к обычным компьютерным системам:

Вычислительная мощность для ИИ (TOPS). Для задач автономного вождения требуются десятки и сотни TOPS. Обработка изображений с нескольких камер, работа с лидарными данными, распознавание объектов, планирование траектории — всё это требует огромных вычислительных ресурсов.

Производительность общего назначения (DMIPS). Операционная система, управление потоками данных, выполнение некритичных алгоритмов требуют высокой производительности процессоров общего назначения.

Графическая производительность (GFLOPS). Визуализация интерфейса, обработка изображений с камер, работа с 3D-картами требуют мощных GPU.

Пропускная способность памяти. Большие объёмы данных от датчиков (камеры, радары, лидары) требуют высокой пропускной способности памяти и низкой задержки.

Определённость во времени (детерминизм). В отличие от обычных компьютеров, где важна средняя производительность, в автомобильных системах критически важна предсказуемость времени выполнения операций. Недопустимы ситуации, когда задача выполняется дольше ожидаемого из-за загрузки системы.

Надёжность и отказоустойчивость. Автомобильные системы должны работать без сбоев в течение всего срока службы автомобиля (10-15 лет) в широком диапазоне температур (-40°C до +85°C) и при вибрациях.

Энергоэффективность. Автомобильный компьютер потребляет энергию от бортовой сети, и его энергопотребление должно быть ограничено, особенно для электромобилей.

Соответствие стандартам безопасности. Для систем, влияющих на безопасность, требуется соответствие ISO 26262 на уровень ASIL-D. Это означает, что система должна иметь резервирование, механизмы самодиагностики, защиту от отказов.

5. Обработка информации в реальном времени

5.1. Понятие реального времени в автомобильных системах

Обработка информации в реальном времени (Real-Time Processing) — это способность системы обрабатывать данные и формировать управляющие воздействия с гарантированным временем задержки. В автомобильных

системах это время измеряется миллисекундами, а для некоторых критических функций — микросекундами.

Различают два типа систем реального времени:

Жёсткие системы реального времени (Hard Real-Time). Нарушение временных ограничений приводит к катастрофическим последствиям. Примеры: управление тормозной системой, управление подушками безопасности, управление двигателем. В этих системах время отклика гарантируется аппаратно и программно.

Мягкие системы реального времени (Soft Real-Time). Нарушение временных ограничений не приводит к катастрофе, но снижает качество работы. Примеры: мультимедиа, навигация, системы комфорта.

В современных интеллектуальных автомобилях присутствуют оба типа систем, и они должны работать совместно на одной вычислительной платформе.

5.2. Источники данных и их характеристики

Интеллектуальная система управления получает данные из множества источников, каждый из которых имеет свои характеристики по объёму, частоте и критичности:

Датчики автомобиля. Данные о скорости, ускорении, температуре, давлении, уровне заряда батареи поступают с частотой от десятков герц до килогерц. Объём данных невелик, но критичность высокая.

Камеры. Изображения с разрешением до 8 Мп и более поступают с частотой 30-60 кадров в секунду. Объём данных — сотни мегабайт в секунду. Требуют мощной обработки для распознавания объектов.

Радары и лидары. Данные о расстоянии до объектов, их скорости, угле. Объём данных может достигать десятков мегабайт в секунду.

Навигационные системы. Данные GPS/ГЛОНАСС, карты, информация о дорожной ситуации. Объём умеренный, критичность средняя.

Бортовые сети. Данные от других ECU по CAN, FlexRay, Ethernet. Объём и критичность зависят от конкретных сообщений.

Внешние источники. Данные из облака, информация о погоде, трафике, обновления ПО. Объём может быть большим, критичность низкая или средняя.

5.3. Этапы обработки данных

Обработка данных в интеллектуальной системе управления проходит несколько этапов:

Сбор данных. Данные с датчиков и сетевых интерфейсов собираются и буферизируются. Важно обеспечить синхронизацию данных из разных источников по времени.

Предварительная обработка. Данные фильтруются от шумов, калибруются, преобразуются к единому формату. Для изображений может выполняться нормализация, изменение размера.

Анализ и принятие решений. На этом этапе применяются алгоритмы искусственного интеллекта: нейронные сети для распознавания объектов, нечёткая логика для принятия решений, оптимизационные алгоритмы для выбора управляющих воздействий.

Формирование управляющих сигналов. Решения преобразуются в конкретные управляющие сигналы для исполнительных механизмов: ШИМ-сигналы для электродвигателей, команды для CAN-сети, сигналы на дисплеи и индикаторы.

Обратная связь и адаптация. Результаты управления анализируются, и при необходимости параметры алгоритмов корректируются.

5.4. Вызовы обработки в реальном времени

Обработка информации в реальном времени в автомобиле сталкивается с рядом вызовов:

Детерминизм. Время выполнения задач должно быть предсказуемым. Для жёстких систем реального времени необходимо анализировать наихудшее время выполнения (Worst-Case Execution Time, WCET). Это требует специальных методов проектирования и тестирования.

Приоритизация. Разные задачи имеют разную критичность. Система должна гарантировать, что наиболее критичные задачи всегда получают необходимые ресурсы. Используются механизмы приоритетного планирования, прерывания, временные квоты.

Синхронизация. Данные от разных датчиков должны быть синхронизированы по времени. Например, для слияния данных с камеры и радара необходимо знать, что данные относятся к одному моменту времени.

Обработка отказов. Система должна корректно обрабатывать ситуации, когда данные от одного или нескольких датчиков недоступны или некорректны. Используются методы резервирования, диагностики, перехода в безопасный режим.

Обновления программного обеспечения. В программно-определяемых автомобилях ПО может обновляться в течение всего срока службы. Обновления должны выполняться без нарушения работы критических функций.

6. Бортовые сети передачи данных

Бортовые сети являются «нервной системой» автомобиля, обеспечивающей обмен информацией между ECU и другими устройствами. В современных автомобилях используются несколько типов сетей, различающихся по скорости, надёжности, стоимости и областям применения.

6.1. CAN (Controller Area Network)

CAN — самая распространённая автомобильная сеть, разработанная компанией Bosch в 1980-х годах. Она используется для большинства функций управления: двигатель, трансмиссия, тормозная система, кузовные системы.

Характеристики CAN:

- Скорость передачи: до 1 Мбит/с (CAN 2.0)
- Тип: дифференциальная двухпроводная линия
- Протокол: много ведущих (multi-master), сообщения с приоритетами
- Надёжность: высокая, устойчивость к помехам
- Применение: управляющие системы, датчики, исполнительные механизмы

CAN FD (Flexible Data-rate) — развитие CAN, позволяющее увеличить скорость передачи данных до 5-10 Мбит/с и размер полезной нагрузки до 64 байт. CAN FD сохраняет совместимость с классическим CAN на физическом уровне и используется в современных автомобилях для передачи больших объёмов данных.

6.2. LIN (Local Interconnect Network)

LIN — низкоскоростная сеть для вспомогательных устройств, не требующих высокой скорости и надёжности.

Характеристики LIN:

- Скорость передачи: до 20 кбит/с
- Тип: однопроводная линия
- Протокол: ведущий-ведомый (master-slave)
- Стоимость: очень низкая
- Применение: стеклоподъёмники, зеркала, сиденья, освещение

LIN используется как подчинённая сеть, подключаемая к CAN через шлюз.

6.3. FlexRay

FlexRay — высокоскоростная сеть с детерминированным поведением, разработанная специально для критических по времени применений.

Характеристики FlexRay:

- Скорость передачи: до 10 Мбит/с
- Тип: дифференциальная двухпроводная линия, топология «звезда» или «шина»
- Протокол: гибридный — сочетание временного (TDMA) и событийного доступа
- Особенность: детерминированное поведение, гарантированная задержка
- Применение: управление двигателем, трансмиссией, тормозной системой (by-wire системы)

FlexRay обеспечивает детерминированное поведение, что критично для систем управления с жёсткими временными ограничениями.

6.4. Automotive Ethernet

Automotive Ethernet — наиболее быстро развивающаяся автомобильная сеть, основанная на стандартах Ethernet с адаптацией для автомобильных условий.

Характеристики Automotive Ethernet:

- Скорость передачи: 100 Мбит/с (100BASE-T1), 1000 Мбит/с (1000BASE-T1) и выше
- Тип: однопарный кабель (в отличие от традиционного Ethernet)
- Протокол: стандартный Ethernet с расширениями для автомобильных применений
- Особенность: высокая скорость, поддержка IP-протоколов, возможность использования стандартного ПО
- Применение: ADAS (камеры, радары), мультимедиа, диагностика, высокоскоростной обмен между центральными компьютерами

Automotive Ethernet становится стандартом для высокоскоростных приложений. Он позволяет передавать большие объёмы данных от камер и радаров, поддерживает протоколы Time-Sensitive Networking (TSN) для обеспечения детерминированного поведения.

6.5. Сравнительная характеристика сетей

Характеристика	CAN	CAN FD	LIN	FlexRay	Automotive Ethernet
Скорость	до 1 Мбит/с	до 10 Мбит/с	до 20 кбит/с	до 10 Мбит/с	100-1000 Мбит/с
Детерминизм	частичный	частичный	нет	полный	с TSN
Надёжность	высокая	высокая	средняя	высокая	высокая
Стоимость	низкая	средняя	очень низкая	высокая	средняя/высокая
Применение	управление	управление, большие данные	вспомогательные	критические системы	ADAS, мультимедиа

6.6. Архитектура сетей в современных автомобилях

В современных автомобилях используется гибридная сетевая архитектура:

- **Магистральная сеть** — Automotive Ethernet (1000BASE-T1) соединяет центральные компьютеры и высокопроизводительные ECU.
- **Сети управления** — CAN FD и FlexRay используются для передачи управляющих сигналов в реальном времени.
- **Вспомогательные сети** — LIN для низкоскоростных устройств.
- **Шлюзы** — обеспечивают маршрутизацию сообщений между сетями с разными протоколами и скоростями.

Шлюзы выполняют важную функцию фильтрации и безопасности: они могут блокировать сообщения, поступающие из менее защищённых сетей (например, мультимедиа) в критичные сети управления.

7. Требования к надёжности и безопасности

7.1. Функциональная безопасность (ISO 26262)

Стандарт ISO 26262 «Road vehicles — Functional safety» определяет требования к функциональной безопасности электронных и электрических систем автомобилей. Он устанавливает уровни целостности безопасности (Automotive Safety Integrity Level, ASIL) от A до D, где D — самый высокий уровень.

Для систем с высоким уровнем ASIL (C и D) требуются:

- **Резервирование.** Дублирование критических компонентов для обеспечения работы при отказе.
- **Lockstep-архитектура.** Два процессорных ядра выполняют одинаковые вычисления и сравнивают результаты; при расхождении фиксируется ошибка.
- **Механизмы самодиагностики.** Постоянная проверка корректности работы.
- **Защита памяти.** Предотвращение несанкционированного доступа и повреждения данных.
- **Детерминированное поведение.** Гарантированное время выполнения критических задач.

7.2. Кибербезопасность

С подключением автомобилей к интернету и внешним сервисам кибербезопасность становится критически важной. Стандарт ISO/SAE 21434 определяет требования к кибербезопасности автомобильных систем.

Ключевые аспекты:

- **Защита от несанкционированного доступа.** Аутентификация устройств и пользователей, шифрование данных.
- **Безопасная загрузка.** Проверка подлинности и целостности программного обеспечения при запуске.
- **Сегментация сетей.** Разделение критичных и некритичных сетей, фильтрация трафика на шлюзах.
- **Обнаружение вторжений.** Мониторинг сетевого трафика и выявление аномалий.
- **Безопасные обновления.** Подписанные и зашифрованные обновления ПО, защита от отката к уязвимым версиям.

7.3. Надёжность в условиях эксплуатации

Автомобильные электронные системы должны работать в тяжёлых условиях:

- **Температурный диапазон.** От -40°C до +85°C для компонентов в салоне, до +125°C для компонентов в моторном отсеке.
- **Вибрации и удары.** Постоянные вибрации от двигателя и дороги, удары при движении по неровностям.
- **Электромагнитные помехи.** Высокий уровень помех от систем зажигания, электродвигателей, радиопередатчиков.
- **Влажность и химическое воздействие.** Воздействие влаги, соли, дорожных реагентов.

Для обеспечения надёжности используются специальные компоненты (automotive grade), усиленная защита корпусов, герметизация, тепловое управление.

8. Практические примеры вычислительных платформ

8.1. NVIDIA DRIVE Thor

NVIDIA DRIVE Thor — флагманская платформа для автономного вождения, представленная в 2025 году. Ключевые характеристики:

- Производительность в 20 раз выше предыдущего поколения Orin
- Поддержка всех функций: ADAS, автономное вождение, цифровая приборная панель, мультимедиа
- Единая архитектура «от облака до автомобиля»: обучение на DGX, симуляция в Omniverse, выполнение на борту
- Поддержка самых требовательных моделей искусственного интеллекта

8.2. Qualcomm Snapdragon Ride

Qualcomm Snapdragon Ride — платформа для ADAS и автономного вождения:

- Интеграция функций информационно-развлекательной системы и ADAS на одном SoC
- Поддержка уровней автоматизации от L2+ до L4
- Масштабируемость: от систем помощи водителю до полностью автономного вождения

8.3. NXP S32E2 и S32K5

NXP предлагает процессоры для зональных архитектур:

S32E2 — высокопроизводительный процессор для центральных компьютеров, позволяющий объединить более 20 ECU в три централизованных блока.

S32K5 — первый автомобильный микроконтроллер на 16-нм технологии с MRAM-памятью, ядрами Arm Cortex-R52 и Cortex-M7 с частотой до 800 МГц.

9. Закрепление и завершение

9.1. Мини-тест

1. Каковы основные недостатки распределённой архитектуры E/E систем?
2. В чём отличие зональной архитектуры от доменно-ориентированной?
3. Какие типы процессорных ядер входят в состав современного автомобильного SoC?
4. Что такое детерминизм в системах реального времени и почему он важен?
5. Какие сети передачи данных используются в современных автомобилях и для каких целей?

9.2. Эталонные краткие ответы

1. **Основные недостатки распределённой архитектуры:** избыточность аппаратных средств (каждый ECU имеет свой микроконтроллер и память), сложность обновлений ПО (каждый блок требует отдельного обновления), ограниченная вычислительная мощность каждого отдельного блока, сложность интеграции функций от разных поставщиков.
2. В **доменно-ориентированной архитектуре** функции группируются по логическим доменам (двигатель, кузов, мультимедиа), каждый домен управляется одним или несколькими контроллерами. В **зональной архитектуре** автомобиль разделён на физические зоны, в каждой зоне установлен зональный контроллер, управляющий всеми устройствами в этой зоне, а центральный компьютер выполняет вычислительно-сложные задачи.
3. Современный автомобильный SoC включает **ядра общего назначения (CPU)** для ОС и управления потоками, **ядра реального времени (CPU-RT)** для задач с жёсткими временными ограничениями, **графические процессоры (GPU)** для обработки изображений, **нейронные процессоры (NPU)** для выполнения операций нейронных сетей, **цифровые сигнальные процессоры (DSP)** для обработки сигналов.
4. **Детерминизм** — это свойство системы, при котором время выполнения операций предсказуемо и гарантированно. В автомобильных системах это критично, потому что задержка в обработке сигнала от датчика или формировании управляющего воздействия может привести к аварии. Для жёстких систем реального времени необходимо знать наихудшее время выполнения каждой задачи.
5. В современных автомобилях используются: **CAN** (до 1 Мбит/с) для основных управляющих функций, **CAN FD** (до 10 Мбит/с) для передачи больших объёмов данных в управляющих системах, **LIN** (до 20 кбит/с) для вспомогательных низкоскоростных устройств, **FlexRay** (до 10 Мбит/с, детерминированный) для критических по времени систем, **Automotive Ethernet** (100-1000 Мбит/с) для ADAS, мультимедиа и высокоскоростного обмена.

9.3. Итоговые положения

- **Архитектура электронных систем** автомобиля эволюционирует от распределённой к зональной и, в перспективе, к программно-определяемому автомобилю с централизованными вычислениями.
- **Электронные блоки управления (ECU)** — это специализированные вычислительные устройства, объединяющие микроконтроллер, память, входы/выходы и источники питания. Их количество сокращается, а производительность растёт.
- **Бортовые вычислительные платформы** (SoC) объединяют CPU, GPU, NPU, DSP и другие компоненты, обеспечивая производительность в сотни TOPS для задач искусственного интеллекта.
- **Обработка в реальном времени** требует детерминизма, приоритизации задач, синхронизации данных и обработки отказов.
- **Бортовые сети** (CAN, CAN FD, LIN, FlexRay, Automotive Ethernet) обеспечивают обмен данными между ECU с разными требованиями к скорости, надёжности и стоимости.
- **Требования к надёжности и безопасности** включают функциональную безопасность (ISO 26262, уровни ASIL), кибербезопасность (ISO/SAE 21434) и устойчивость к тяжёлым условиям эксплуатации.

Задание после лекции

Выберите один из компонентов вычислительной системы современного автомобиля (ECU управления двигателем, центральный компьютер ADAS, зональный контроллер, сетевой шлюз) и подготовьте краткий аналитический обзор (1–2 страницы), в котором:

1. Опишите назначение и основные функции выбранного компонента.
2. Охарактеризуйте его аппаратную архитектуру (тип процессора, память, интерфейсы).
3. Объясните, какие требования к производительности и надёжности предъявляются к этому компоненту.
4. Опишите, с какими другими компонентами и через какие сети он взаимодействует.
5. Приведите пример конкретного устройства от известного производителя с его характеристиками.

Контрольные вопросы

1. Опишите эволюцию архитектуры электронных систем управления автомобилями.
2. Каковы преимущества зональной архитектуры перед распределённой?

3. Что такое программно-определяемый автомобиль и какие изменения он приносит?

4. Из каких основных компонентов состоит электронный блок управления (ECU)?

5. Какие типы ECU существуют по функциональному назначению?

6. Что такое SoC (System-on-Chip) и какие компоненты он включает?

7. Назовите основных производителей автомобильных вычислительных платформ и их продукты.

8. В каких единицах измеряется производительность нейронных процессоров?

9. Что такое ASIL и какие уровни ASIL существуют?

10. В чём отличие жёстких систем реального времени от мягких?

11. Каковы основные этапы обработки данных в интеллектуальной системе управления?

12. Что такое детерминизм и почему он важен для автомобильных систем?

13. Охарактеризуйте основные типы бортовых сетей: CAN, CAN FD, LIN, FlexRay, Automotive Ethernet.

14. Для каких применений используется Automotive Ethernet?

15. Почему FlexRay применяется в критических системах?

16. Какие требования к надёжности предъявляются к автомобильным электронным системам?

17. Что такое ISO 26262 и какие требования он устанавливает?

18. Какие механизмы используются для обеспечения функциональной безопасности?

19. В чём заключаются требования к кибербезопасности автомобильных систем?

20. Как архитектура вычислительных систем влияет на возможность реализации интеллектуальных алгоритмов управления?

Список использованных и рекомендуемых источников

1. Рабочая учебная программа дисциплины ISUA3300 «Интеллектуальные системы управления автомобилей». ВКТУ им. Д. Серикбаева, 2026.

2. Robert Bosch GmbH. Automotive Handbook. 11th ed. Wiley, 2022.

3. NXP Semiconductors. NXP and Rimac Technology Co-Develop Centralized Vehicle Architecture for Advanced Domain and Zonal Control, 2025.

4. NXP Semiconductors. NXP Rolls Out Automotive MCU for Zonal SDVs, Leveraging MRAM, 2025.

5. Qualcomm. Qualcomm and Bosch Showcase New Central Vehicle Computer for Digital Cockpit and Driver Assistance Functions at CES 2024.

6. NVIDIA. NVIDIA DRIVE Thor Platform. CES 2025.

7. ISO 26262:2018. Road Vehicles — Functional Safety.

8. ISO/SAE 21434:2021. Road Vehicles — Cybersecurity Engineering.

9. Matheus K., Königseder T. Automotive Ethernet. 3rd ed. Cambridge University Press, 2021.
10. IEEE. Research on Performance Testing Technology of Automotive AI Computing Chips, 2026.
11. ETAS. Vehicle-centralized, zone-oriented E/E architecture with vehicle computers, 2024.