ЛЕКЦИЯ 13
БОРТОВЫЕ СЕТИ И ПРОТОКОЛЫ ОБМЕНА ДАННЫМИ. CAN FD, FLEXRAY И AUTOMOTIVE ETHERNET. СКОРОСТЬ ПЕРЕДАЧИ, ЗАДЕРЖКИ И ПРИОРИТЕТНОСТЬ УПРАВЛЯЮЩИХ СИГНАЛОВ

Цель

Сформировать у обучающихся системное представление о бортовых сетях передачи данных как о фундаменте современных интеллектуальных систем управления автомобилями. Рассмотреть эволюцию автомобильных сетей от классического CAN до CAN FD, FlexRay и Automotive Ethernet, проанализировать их характеристики, области применения, механизмы обеспечения детерминизма и приоритизации, а также архитектурные принципы построения гибридных сетевых топологий.

Планируемые результаты

После изучения данной лекции обучающийся сможет:

- объяснять роль бортовых сетей в распределённых системах управления автомобилем;
- характеризовать протоколы CAN FD, FlexRay и Automotive Ethernet, их скоростные характеристики и области применения;
- описывать механизмы арбитража и приоритизации сообщений в различных сетевых протоколах;
- объяснять принципы обеспечения детерминированного поведения в FlexRay и Automotive Ethernet с TSN;
- анализировать архитектуру гибридных сетевых топологий современных автомобилей;
- оценивать применимость различных сетевых протоколов для конкретных задач управления.

Вопрос занятия. Современный автомобиль — это сеть на колёсах. Десятки электронных блоков управления обмениваются тысячами сообщений в секунду. Но как организовать этот обмен так, чтобы команда торможения не задержалась из-за того, что кто-то решил обновить карты навигации? Как гарантировать, что критическое сообщение дойдёт до адресата за микросекунды, даже когда сеть перегружена? И почему для решения этих задач одного протокола недостаточно — зачем автомобилю целая иерархия сетей?

1. Введение в бортовые сети автомобилей

1.1. Роль бортовых сетей в современных автомобилях

Современный автомобиль представляет собой распределённую киберфизическую систему, в которой десятки, а иногда и более ста электронных блоков управления (ECU) должны обмениваться информацией в реальном времени. Эти блоки управляют двигателем, трансмиссией, тормозной системой, рулевым управлением, системами комфорта, мультимедиа, навигацией, системами помощи водителю и многими другими функциями. Без надёжной и высокоскоростной сети передачи данных такая сложная система просто не могла бы функционировать.

Бортовые сети являются «нервной системой» автомобиля. Они обеспечивают:

- **Передачу управляющих сигналов** от датчиков к контроллерам и от контроллеров к исполнительным механизмам.
- **Обмен данными** между различными ECU для координации их работы.
- **Диагностику** — передачу информации о состоянии систем и неисправностях.
- **Обновление программного обеспечения** ECU.
- **Передачу данных от сенсоров** (камер, радаров, лидаров) для систем ADAS и автономного вождения.
- **Связь с внешним миром** — телематика, навигация, облачные сервисы.

Выбор сетевого протокола для каждой функции определяется требованиями к скорости, детерминизму, надёжности, стоимости и энергопотреблению. Именно поэтому в одном автомобиле сосуществуют несколько различных типов сетей.

1.2. Эволюция автомобильных сетей

Эволюция бортовых сетей отражает рост сложности автомобильных электронных систем.

Первое поколение — классический CAN (Controller Area Network). Разработанный компанией Bosch в 1980-х годах, CAN стал первым массовым стандартом для автомобильных сетей. Он обеспечивал скорость до 1 Мбит/с и использовался для большинства управляющих функций. CAN остаётся наиболее распространённым автомобильным протоколом и сегодня.

Второе поколение — специализированные сети. Появились LIN (Local Interconnect Network) для низкоскоростных вспомогательных устройств, FlexRay для критических по времени применений с требованием детерминизма, MOST (Media Oriented Systems Transport) для мультимедиа. Каждая сеть решала свои задачи, но такое разнообразие увеличивало сложность архитектуры.

Третье поколение — CAN FD и начало конвергенции. CAN FD (Flexible Data-rate) увеличил скорость передачи данных до 5-10 Мбит/с и размер полезной нагрузки до 64 байт, сохраняя совместимость с классическим

CAN. Это позволило использовать единый протокол для более широкого круга задач.

Четвёртое поколение — Automotive Ethernet. С появлением систем ADAS и автономного вождения возникла потребность в передаче огромных объёмов данных — изображений с камер, облаков точек от лидаров, радарных данных. Традиционные автомобильные сети не могли обеспечить такую пропускную способность. Automotive Ethernet, адаптированный для автомобильных условий, обеспечивает скорость от 100 Мбит/с до 10 Гбит/с. В сочетании с Time-Sensitive Networking (TSN) он способен обеспечивать и детерминированное поведение, необходимое для критических систем.

Сегодня архитектура бортовых сетей становится **гибридной**: CAN и LIN остаются для недорогих и некритичных функций, FlexRay — для систем, где требуется высочайший детерминизм (хотя его применение сокращается), а Automotive Ethernet становится магистральной сетью для высокоскоростных приложений и централизованных вычислений.

2. CAN FD (Controller Area Network with Flexible Data-Rate)

2.1. От классического CAN к CAN FD

Классический CAN (CAN 2.0) был разработан в 1980-х годах и оставался неизменным на протяжении десятилетий. Он обеспечивал скорость до 1 Мбит/с и передавал до 8 байт данных в одном сообщении. Для управления двигателем, трансмиссией и кузовными системами этого было достаточно. Однако с ростом сложности систем и появлением новых функций (например, диагностика, калибровка, обновление ПО) пропускной способности CAN стало не хватать.

CAN FD (Flexible Data-rate) был представлен как эволюционное развитие классического CAN. Он сохранил все преимущества CAN — надёжность, помехоустойчивость, механизм арбитража с приоритетами — но существенно расширил его возможности:

- **Увеличение полезной нагрузки** с 8 до 64 байт.
- **Увеличение скорости** в фазе передачи данных до 5-8 Мбит/с (и выше).
- **Совместимость** с классическим CAN на физическом уровне.

Важно понимать, что CAN FD не является просто «более быстрым CAN». Это протокол с новой структурой кадра, который позволяет динамически переключать скорость внутри одного сообщения.

2.2. Структура кадра CAN FD и механизм переключения скорости

Ключевая инновация CAN FD — это возможность переключать скорость передачи внутри одного кадра. Кадр CAN FD разделён на две фазы:

Фаза арбитража (Arbitration Phase). В этой фазе передаётся идентификатор сообщения, и происходит арбитраж — разрешение конфликтов, когда несколько узлов пытаются передавать одновременно. Скорость в фазе арбитража остаётся такой же, как в классическом CAN (обычно 500 кбит/с или 1 Мбит/с). Это обеспечивает совместимость с классическими CAN-узлами,

которые могут распознавать CAN FD-кадры и корректно обрабатывать арбитраж.

Фаза данных (Data Phase). После успешного арбитража и установления приоритета передатчик переключается на повышенную скорость. В этой фазе передаётся поле данных (до 64 байт) и контрольная сумма. Скорость в фазе данных может достигать 5-8 Мбит/с и более. Переключение скорости происходит за счёт бита BRS (Bit Rate Switch) в заголовке кадра.

Такой подход — «медленный арбитраж, быстрые данные» — сочетает надёжность классического CAN с высокой пропускной способностью там, где она действительно нужна.

2.3. Механизм приоритетов в CAN FD

CAN FD унаследовал от классического CAN **механизм арбитража на основе приоритетов сообщений**. В CAN-сетях каждый узел перед началом передачи «слушает» шину. Если шина свободна, узел начинает передачу, одновременно контролируя, не начал ли передачу другой узел с более высоким приоритетом.

Приоритет сообщения определяется его **идентификатором** — чем меньше числовое значение идентификатора, тем выше приоритет. В процессе арбитража узлы передают идентификатор побитно. Если узел видит, что на шине появился доминирующий бит (логический 0) там, где он передал рецессивный (логический 1), он немедленно прекращает передачу и переходит в режим приёма. Побеждает узел с наименьшим идентификатором — т.е. с наивысшим приоритетом.

Этот механизм гарантирует, что **критические сообщения** (например, команды торможения или управления двигателем) всегда будут переданы раньше менее критичных (например, данных климат-контроля). В CAN FD этот механизм полностью сохранён, что делает его надёжным выбором для систем реального времени.

2.4. Применение CAN FD в автомобилях

CAN FD находит применение в системах, где требуется более высокая пропускная способность, чем может обеспечить классический CAN, но где стоимость и сложность Automotive Ethernet пока избыточны:

- **Диагностика и калибровка.** Передача больших объёмов калибровочных данных и результатов диагностики.
- **Обновление программного обеспечения** ECU по сети (OTA-обновления).
- **Системы управления трансмиссией и двигателем** — передача большего количества параметров с более высокой частотой.
- **Системы помощи водителю (ADAS)** начального уровня, где объём данных от сенсоров ещё не требует Ethernet.

Исследования показывают, что CAN FD является наиболее перспективным сетевым протоколом с точки зрения соотношения цена/производительность, особенно в условиях реальных скоростей 500 кбит/с и 2 Мбит/с.

3. FlexRay

3.1. Философия FlexRay: детерминизм превыше всего

FlexRay был разработан в начале 2000-х годов консорциумом ведущих автомобильных производителей для удовлетворения требований систем, где **детерминизм** — гарантированное время доставки сообщения — является критическим. В отличие от CAN, где время доставки сообщения зависит от загрузки сети (событийно-управляемый протокол), FlexRay является **время-управляемым (time-triggered)** протоколом.

Ключевая идея FlexRay заключается в том, что каждое сообщение передаётся в **заранее выделенный временной слот**. Независимо от того, насколько загружена сеть, критическое сообщение всегда будет передано в строго определённый момент времени. Это делает FlexRay идеальным для систем X-by-Wire — торможения, рулевого управления, управления подвеской, где задержка в несколько микросекунд может иметь катастрофические последствия.

3.2. TDMA и структура цикла FlexRay

FlexRay использует **TDMA (Time Division Multiple Access)** — множественный доступ с разделением по времени. Временная шкала сети разделена на повторяющиеся **циклы** (communication cycles). Каждый цикл состоит из:

Статического сегмента (Static Segment). Это основа детерминизма FlexRay. В статическом сегменте каждому узлу сети выделяется фиксированный временной слот (slot) фиксированной длины. В своём слоте узел может передать одно сообщение. Слоты повторяются в каждом цикле, и время передачи каждого сообщения абсолютно предсказуемо. Статический сегмент используется для критических, периодических сообщений.

Динамического сегмента (Dynamic Segment). В этом сегменте работает событийно-управляемый механизм, похожий на CAN. Узлы могут передавать сообщения по мере необходимости, но только в свободные мини-слоты. Динамический сегмент используется для менее критичных, спорадических сообщений.

Символьного окна (Symbol Window) и окна NIT (Network Idle Time). Используются для сетевой синхронизации и диагностики.

TDMA гарантирует, что каждое критическое сообщение получит свой «поезд» в строго определённое время. Это обеспечивает **нулевой джиттер** — вариация времени доставки отсутствует.

3.3. Двухканальная архитектура и отказоустойчивость

FlexRay обычно реализуется с **двумя физическими каналами** (Channel A и Channel B). Эти каналы могут работать в двух режимах:

Режим удвоения пропускной способности. Оба канала используются для передачи разных данных, что удваивает эффективную пропускную способность до 20 Мбит/с.

Режим резервирования. Оба канала передают одинаковые данные. Если один канал выходит из строя (обрыв, короткое замыкание), данные продолжают передаваться по второму каналу без потери информации.

Это резервирование делает FlexRay исключительно надёжным для систем, где отказ недопустим — например, для steer-by-wire или brake-by-wire.

3.4. Скорость и области применения FlexRay

FlexRay обеспечивает скорость передачи до 10 Мбит/с на канал. Это значительно выше классического CAN, но ниже, чем Automotive Ethernet.

Основные области применения FlexRay:

- **X-by-Wire системы.** Торможение (brake-by-wire), рулевое управление (steer-by-wire), управление подвеской.
- **Системы управления двигателем и трансмиссией** с высокими требованиями к синхронизации.
- **Системы активной безопасности** — ESP, системы стабилизации.

Однако, несмотря на свои преимущества, FlexRay не получил широкого распространения. Причины — высокая сложность проектирования и настройки сети (необходимость точного планирования временных слотов), более высокая стоимость компонентов, а также появление Automotive Ethernet, который с TSN может обеспечить сравнимый детерминизм при значительно большей пропускной способности. FlexRay остаётся нишевым решением для наиболее критических систем.

4. Automotive Ethernet

4.1. Почему автомобилю нужен Ethernet?

Традиционные автомобильные сети (CAN, LIN, FlexRay) были разработаны для передачи относительно небольших объёмов управляющей информации. Однако современные системы ADAS и автономного вождения генерируют огромные объёмы данных. Одна камера высокого разрешения может генерировать поток данных более 1 Гбит/с. Добавьте к этому лидары, радары, ультразвуковые датчики, и станет понятно, что пропускная способность даже самых быстрых традиционных сетей (FlexRay — 10 Мбит/с) совершенно недостаточна.

Automotive Ethernet — это адаптация стандартного Ethernet для автомобильных условий. Он обеспечивает пропускную способность от 100 Мбит/с до 10 Гбит/с, что делает его единственным практическим решением для высокоскоростных приложений.

4.2. Физический уровень: 100BASE-T1 и 1000BASE-T1

Ключевое отличие Automotive Ethernet от стандартного Ethernet — **физический уровень**. Стандартный Ethernet (например, 100BASE-TX) использует для 100 Мбит/с две витые пары. Automotive Ethernet (100BASE-T1) использует **одну неэкранированную витую пару** (Single Twisted Pair) для

полнодуплексной связи на той же скорости. Это значительно уменьшает вес и стоимость кабельной проводки — важный фактор для автомобилестроения.

Основные стандарты Automotive Ethernet:

- **100BASE-T1 (IEEE 802.3bw).** 100 Мбит/с по одной витой паре. Использует кодирование PAM3. Применяется для камер, навигации, диагностики.
- **1000BASE-T1 (IEEE 802.3bp).** 1 Гбит/с по одной витой паре. Применяется для магистральных соединений между доменными контроллерами, для передачи данных от нескольких камер и радаров.
- **Multi-Gig (2.5, 5, 10 Гбит/с).** Более высокие скорости для будущих приложений, включая полностью автономное вождение.

4.3. Time-Sensitive Networking (TSN) — обеспечение детерминизма

Стандартный Ethernet является сетью с **коммутацией пакетов и наилучшим усилием (best-effort)** — время доставки пакета не гарантировано. Для автомобильных систем, где критичные сообщения должны доставляться с гарантированной задержкой, это неприемлемо.

Решение — **Time-Sensitive Networking (TSN)** — набор стандартов IEEE 802.1, который добавляет Ethernet детерминированные свойства.

Ключевые стандарты TSN для автомобилей:

- **IEEE 802.1AS (gPTP — generalized Precision Time Protocol).** Обеспечивает высокоточную синхронизацию времени между всеми узлами сети (точность до микросекунд).
- **IEEE 802.1Qbv (Time-Aware Shaper).** Вводит «временные ворота» — в определённые временные интервалы разрешается передача только определённых типов трафика. Это гарантирует, что критичные сообщения не будут задержаны менее приоритетным трафиком.
- **IEEE 802.1Qbu / 802.3br (Frame Preemption).** Позволяет прерывать передачу длинного низкоприоритетного кадра для немедленной отправки высокоприоритетного.
- **IEEE 802.1CB (FRER — Frame Replication and Elimination for Reliability).** Дублирование кадров по разным путям для повышения надёжности.
- **IEEE 802.1Qci (Ingress Policing).** Фильтрация трафика на входе для предотвращения перегрузок.

В 2025 году был принят стандарт **IEEE 802.1DG** — профиль TSN для автомобильных Ethernet-сетей, который определяет, как именно применять TSN-стандарты в автомобильной среде. Это стало важным шагом к унификации и массовому внедрению Automotive Ethernet для критических систем.

4.4. Приоритеты и качество обслуживания (QoS) в Ethernet

В отличие от CAN, где приоритет определяется идентификатором сообщения, в Ethernet приоритеты реализуются через **механизмы QoS (Quality of Service)**.

VLAN-теги и PCP (Priority Code Point). В Ethernet-кадре может быть VLAN-тег с 3-битным полем приоритета (PCP), которое определяет 8 уровней

приоритета (0 — низший, 7 — высший). Коммутаторы и сетевые адаптеры используют эти приоритеты для управления очередями.

TSN-механизмы (Time-Aware Shaper, Frame Preemption) обеспечивают ещё более строгую приоритизацию на основе временных окон. Критические сообщения получают гарантированное «окно» для передачи, независимо от загрузки сети.

В зональных архитектурах Ethernet позволяет реализовать гибкую приоритизацию: трафик от систем безопасности (тормоза, руль) получает наивысший приоритет, трафик ADAS — следующий, мультимедиа и телематика — низший.

4.5. Безопасность в Automotive Ethernet

С ростом использования Ethernet и IP-протоколов в автомобилях возрастают и риски кибератак. Automotive Ethernet включает механизмы безопасности:

MACsec (IEEE 802.1AE). Обеспечивает шифрование, аутентификацию и защиту целостности кадров на уровне канала данных. Современные PHY-трансиверы интегрируют аппаратную поддержку MACsec.

Сегментация сети. Использование VLAN для логического разделения критичного и некритичного трафика.

Межсетевые экраны (firewalls). На сетевых шлюзах реализуется фильтрация трафика между различными сетями (например, между мультимедийной сетью и сетью управления).

5. Сравнительный анализ и выбор протокола

5.1. Сводная таблица характеристик

Характеристика	CAN FD	FlexRay	Automotive Ethernet
Скорость	до 8-10 Мбит/с (в фазе данных)	до 10 Мбит/с (на канал)	100 Мбит/с - 10 Гбит/с
Полезная нагрузка	до 64 байт	до 254 байт	до 1500 байт (и выше)
Детерминизм	частичный (приоритетный арбитраж)	полный (TDMA)	обеспечивается TSN
Отказоустойчивость	средняя	высокая (двухканальная)	высокая (TSN FRER, резервирование)
Топология	шина	шина, звезда, гибрид	звезда, дерево
Стоимость	низкая	высокая	средняя/высокая
Сложность	низкая	высокая	средняя
Основное применение	диагностика, калибровка, управляющие системы	X-by-Wire, критические системы	ADAS, мультимедиа, магистраль

5.2. Критерии выбора

Выбор сетевого протокола для конкретной функции определяется несколькими факторами:

Требования к пропускной способности. Для передачи изображений с камер и данных лидаров необходим Automotive Ethernet. Для диагностики и калибровки достаточно CAN FD. Для критических управляющих сигналов — CAN FD или FlexRay.

Требования к детерминизму. Для X-by-Wire систем, где задержка недопустима, необходим FlexRay или Ethernet с TSN. Для большинства управляющих систем достаточно детерминизма CAN.

Требования к надёжности. Для критических систем необходимо резервирование — двухканальный FlexRay или Ethernet с FRER.

Стоимость и сложность. CAN FD — наиболее дешёвый и простой вариант. FlexRay — дорогой и сложный в проектировании. Ethernet — умеренной сложности, но требует более дорогих компонентов.

Экосистема. CAN FD имеет огромную базу наработанных решений и инструментов. FlexRay — более нишевый. Ethernet — быстрорастущая экосистема с поддержкой стандартных IP-протоколов.

5.3. Гибридные архитектуры: совместное использование протоколов

В реальных автомобилях используется не один протокол, а их **гибридная комбинация**:

- **Магистральная сеть** — Automotive Ethernet (1000BASE-T1 или Multi-Gig) соединяет центральные компьютеры, доменные контроллеры и высокопроизводительные ECU.
- **Сети управления** — CAN FD и (в некоторых случаях) FlexRay используются для передачи управляющих сигналов в реальном времени между ECU, датчиками и исполнительными механизмами.
- **Вспомогательные сети** — LIN для низкоскоростных устройств (стеклоподъёмники, зеркала, сиденья).
- **Шлюзы** — обеспечивают маршрутизацию сообщений между сетями с разными протоколами и скоростями. Шлюзы также выполняют функции фильтрации и безопасности, предотвращая проникновение атак из менее защищённых сетей в критичные.

Такая гибридная архитектура позволяет сочетать преимущества каждого протокола: высокую скорость Ethernet для больших данных, детерминизм FlexRay или CAN для критических сигналов, низкую стоимость LIN для простых устройств.

6. Временные параметры: скорость, задержки и приоритеты

6.1. Скорость передачи данных

Скорость передачи данных в бортовых сетях варьируется в широких пределах:

- **LIN:** до 20 кбит/с.
- **CAN:** до 1 Мбит/с.
- **CAN FD:** до 5-10 Мбит/с в фазе данных.
- **FlexRay:** до 10 Мбит/с на канал.
- **Automotive Ethernet:** 100 Мбит/с, 1 Гбит/с, 2.5, 5, 10 Гбит/с.

Выбор скорости — это всегда компромисс. Более высокая скорость требует более дорогих компонентов, более строгих требований к физической среде передачи и, как правило, более высокого энергопотребления. Для управляющих сигналов (скорость, положение педали, температура) 1-2 Мбит/с вполне достаточно. Для видео с камер — необходимы гигабитные скорости.

6.2. Задержки (Latency) и джиттер (Jitter)

Задержка (latency) — это время от момента отправки сообщения до его получения адресатом. В автомобильных системах задержка критична:

- Для команд торможения — задержка должна составлять единицы миллисекунд.
- Для управления двигателем — десятки миллисекунд.
- Для мультимедиа — сотни миллисекунд допустимы.

Джиттер (jitter) — это вариация задержки. Для систем, где важна синхронизация (например, управление электродвигателем), джиттер не менее критичен, чем сама задержка.

Разные протоколы обеспечивают разные характеристики задержки и джиттера:

- **CAN/CAN FD.** Задержка зависит от загрузки сети и приоритета сообщения. В хорошо спроектированной сети задержка для высокоприоритетных сообщений может быть гарантирована в пределах нескольких миллисекунд. Джиттер присутствует.
- **FlexRay.** В статическом сегменте задержка и джиттер равны нулю — сообщение всегда передаётся в строго определённый момент. В динамическом сегменте задержка может варьироваться.
- **Automotive Ethernet с TSN.** TSN-механизмы (Time-Aware Shaper, Frame Preemption) позволяют ограничить задержку для критического трафика и минимизировать джиттер. Исследования показывают, что Ethernet с TSN обеспечивает лучшие показатели задержки, чем FlexRay, для некоторых сценариев.

6.3. Приоритетность управляющих сигналов

Приоритетность сообщений — это механизм, гарантирующий, что критические сообщения будут переданы раньше менее критичных даже в условиях перегрузки сети.

В **CAN и CAN FD** приоритет определяется идентификатором сообщения — чем меньше числовое значение, тем выше приоритет. Это простой и надёжный механизм, но он статичен — приоритет сообщения фиксирован на этапе проектирования.

В **FlexRay** приоритет в статическом сегменте определяется положением временного слота — первые слоты имеют более высокий приоритет. В динамическом сегменте используется механизм, аналогичный CAN.

В **Automotive Ethernet** приоритет реализуется через QoS (VLAN-теги с PCP) и TSN-механизмы. Это более гибкий подход, позволяющий динамически изменять приоритеты в зависимости от ситуации.

Пример иерархии приоритетов в автомобильной сети:

1. **Наивысший приоритет:** команды экстренного торможения, управление подушками безопасности.
2. **Высокий приоритет:** управление двигателем, трансмиссией, рулевым управлением.
3. **Средний приоритет:** данные ADAS (камеры, радары), навигация.
4. **Низкий приоритет:** мультимедиа, телематика, диагностика.
5. **Низший приоритет:** обновления программного обеспечения.

7. Архитектура будущего: программно-определяемый автомобиль и роль сетей

Эволюция архитектуры E/E (электрических и электронных систем) автомобиля напрямую связана с эволюцией бортовых сетей.

Распределённая архитектура (сегодня). Множество ECU, каждый со своей функцией, соединённые CAN, LIN, FlexRay. Сети относительно просты, но обновление ПО и добавление новых функций затруднены.

Доменно-ориентированная архитектура (переходный этап). Функции сгруппированы по доменам (двигатель, кузов, мультимедиа, ADAS). Внутри домена — высокоскоростная сеть (Ethernet), между доменами — магистральный Ethernet. CAN и LIN остаются для периферии.

Зональная архитектура (будущее). Автомобиль разделён на физические зоны (передняя, задняя, левая, правая). В каждой зоне — зональный контроллер, подключённый к центральному компьютеру через магистральный Ethernet. Зональные контроллеры подключают датчики и исполнительные механизмы через CAN, LIN или (всё чаще) Ethernet. Такая архитектура сокращает длину проводки, упрощает обновления и позволяет реализовать программно-определяемый автомобиль.

В этой архитектуре **Automotive Ethernet становится магистральной сетью**, а CAN FD и LIN остаются для подключения периферийных устройств. FlexRay, скорее всего, будет вытеснен Ethernet с TSN, который обеспечивает сравнимый детерминизм при значительно большей пропускной способности и гибкости.

8. Закрепление и завершение

8.1. Мини-тест

1. В чём ключевое отличие CAN FD от классического CAN?
2. Как FlexRay обеспечивает детерминированное поведение?
3. Почему Automotive Ethernet использует одну витую пару вместо двух?
4. Что такое Time-Sensitive Networking (TSN) и для чего он нужен?
5. Какие сети используются в гибридной архитектуре современного автомобиля?

8.2. Эталонные краткие ответы

1. **CAN FD** отличается от классического CAN увеличенной полезной нагрузкой (до 64 байт вместо 8) и возможностью переключения на более высокую скорость (до 5-10 Мбит/с) в фазе передачи данных при сохранении стандартной скорости в фазе арбитража.
2. **FlexRay** обеспечивает детерминизм за счёт **TDMA (Time Division Multiple Access)** — каждый узел имеет заранее выделенный временной слот в статическом сегменте цикла, и сообщение всегда передаётся в строго определённый момент времени.
3. **Automotive Ethernet** использует одну витую пару (Single Twisted Pair) для снижения веса, стоимости и занимаемого пространства кабельной проводки по сравнению с двумя парами стандартного Ethernet.
4. **Time-Sensitive Networking (TSN)** — это набор стандартов IEEE 802.1, добавляющих Ethernet детерминированные свойства: синхронизацию времени, временные окна для критического трафика, возможность прерывания низкоприоритетных кадров и резервирование.
5. В **гибридной архитектуре** современного автомобиля используются: **Automotive Ethernet** для магистрали и высокоскоростных приложений (ADAS, мультимедиа); **CAN FD** для управляющих систем и диагностики; **LIN** для низкоскоростных вспомогательных устройств; в некоторых случаях — **FlexRay** для критических X-by-Wire систем.

8.3. Итоговые положения

Бортовые сети являются фундаментом современных интеллектуальных систем управления, обеспечивая обмен данными между ECU, датчиками и исполнительными механизмами.

CAN FD — эволюционное развитие классического CAN с увеличенной полезной нагрузкой (до 64 байт) и повышенной скоростью в фазе данных (до 5-10 Мбит/с). Сохраняет механизм приоритетного арбитража и совместимость с классическим CAN.

FlexRay — время-управляемый протокол с TDMA, обеспечивающий абсолютный детерминизм (нулевой джиттер) для критических систем. Использует двухканальную архитектуру для резервирования. Скорость — до 10 Мбит/с на канал.

Automotive Ethernet — адаптация Ethernet для автомобильных условий с использованием одной витой пары. Обеспечивает скорость от 100 Мбит/с до 10 Гбит/с. TSN добавляет детерминированные свойства, необходимые для критических систем.

Приоритетность в CAN/CAN FD определяется идентификатором сообщения; в Ethernet — через QoS (VLAN-теги) и TSN-механизмы.

Гибридные архитектуры используют комбинацию протоколов: Ethernet для магистрали и высокоскоростных приложений, CAN FD для управления, LIN для периферии.

Будущее — за программно-определяемыми автомобилями с зональными архитектурами, где Ethernet становится основной магистральной сетью.

Задание после лекции

Выберите один из протоколов бортовых сетей (CAN FD, FlexRay или Automotive Ethernet) и подготовьте аналитический обзор (2–3 страницы), в котором:

1. Опишите историю создания и эволюцию протокола.
2. Объясните его архитектуру и ключевые механизмы (арбитраж, детерминизм, приоритеты).
3. Проанализируйте скоростные характеристики, задержки и области применения.
4. Оцените преимущества и ограничения протокола.
5. Сформулируйте рекомендации по применению в современных автомобильных системах.

Контрольные вопросы

1. Какова роль бортовых сетей в современных автомобилях?
2. Опишите эволюцию автомобильных сетей от CAN до Automotive Ethernet.
3. В чём отличие CAN FD от классического CAN?
4. Как работает механизм переключения скорости в CAN FD?
5. Как в CAN FD определяется приоритет сообщения?
6. Каковы основные области применения CAN FD?
7. Что такое детерминизм в сетях передачи данных?
8. Как FlexRay обеспечивает детерминированное поведение?
9. Что такое TDMA и как он используется в FlexRay?
10. Что такое статический и динамический сегменты в цикле FlexRay?
11. Как работает двухканальная архитектура FlexRay?
12. Каковы основные области применения FlexRay?
13. Почему FlexRay не получил широкого распространения?
14. Почему для автомобилей потребовалась адаптация Ethernet?
15. В чём отличие 100BASE-T1 от 100BASE-TX?
16. Какие скорости поддерживает Automotive Ethernet?

17. Что такое Time-Sensitive Networking (TSN)?
18. Какие основные стандарты TSN используются в автомобилях?
19. Как TSN обеспечивает детерминизм в Ethernet?
20. Как в Ethernet реализуется приоритизация трафика?
21. Что такое MACsec и для чего он нужен в Automotive Ethernet?
22. Каковы основные критерии выбора сетевого протокола для автомобильной системы?
23. Опишите гибридную архитектуру бортовых сетей современного автомобиля.
24. Каковы требования к задержке для управляющих сигналов в автомобиле?
25. Каковы перспективы развития бортовых сетей в программно-определяемых автомобилях?

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. Matheus K., Königseder T. Automotive Ethernet. 3rd ed. — Cambridge: Cambridge University Press, 2021. — ISBN 978-1-108-84195-5.
3. ISO 11898-1:2024. Road vehicles — Controller area network (CAN) — Part 1: Data link layer and physical signalling. — Geneva: International Organization for Standardization, 2024.
4. ISO 17458-1:2013. Road vehicles — FlexRay communications system — Part 1: General information and use case definition. — Geneva: International Organization for Standardization, 2013.
5. IEEE 802.3bw-2015. IEEE Standard for Ethernet — Amendment 1: Physical Layer Specifications and Management Parameters for 100 Mb/s Operation over a Single Balanced Twisted Pair Cable (100BASE-T1). — IEEE, 2015.
6. IEEE 802.3bp-2016. IEEE Standard for Ethernet — Amendment 4: Physical Layer Specifications and Management Parameters for 1 Gb/s Operation over a Single Balanced Twisted Pair Cable (1000BASE-T1). — IEEE, 2016.

Дополнительная литература

7. IEEE 802.1DG-2025. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks — Time-Sensitive Networking Profile for Automotive In-Vehicle Ethernet Communications. — IEEE, 2025.
8. Sandhu R., Channi H. K., Giri N. C., Kumar P., Elaskily M. A., Hebaishy M. A. Driving connectivity: a thorough review of networking protocols in electric mobility // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer

Science (IJEECS). — 2026. — Vol. 41, No. 2. — P. 764–772. — DOI: 10.11591/ijeecs.v41.i2.pp764-772.

9. A Study on Automotive Diagnostic System using CAN, CAN FD, FlexRay // Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering. — 2026.

10. Automotive Ethernet vs CAN vs LIN vs FlexRay: Summary Comparison [Электронный ресурс]. — Excelfore, 2026. — Режим доступа: https://excelfore.com/blog/automotive-ethernet-vs-can-vs-lin-vs-flexray[reference:88].

11. What is automotive Ethernet? [Электронный ресурс]. — EV Engineering Online, 2026. — Режим доступа: https://www.evengineeringonline.com/what-is-automotive-ethernet[reference:89].

12. FlexRay vs CAN FD vs Automotive Ethernet：如何为你的汽车电子项目选择最佳通信协议 [Электронный ресурс]. — CSDN, 2026.

13. CAN FD — The Foundation for Next-Generation In-Vehicle Networks [Электронный ресурс]. — CAN in Automation (CiA). — Режим доступа: https://www.can-cia.org[reference:91].

Электронные ресурсы

14. SAE International. SAE Technical Papers Database. — Режим доступа: https://www.sae.org/publications/technical-papers.

15. IEEE Xplore. Scientific and Technical Publications Database. — Режим доступа: https://ieeexplore.ieee.org.

16. ISO. International Standards Catalogue. — Режим доступа: https://www.iso.org.