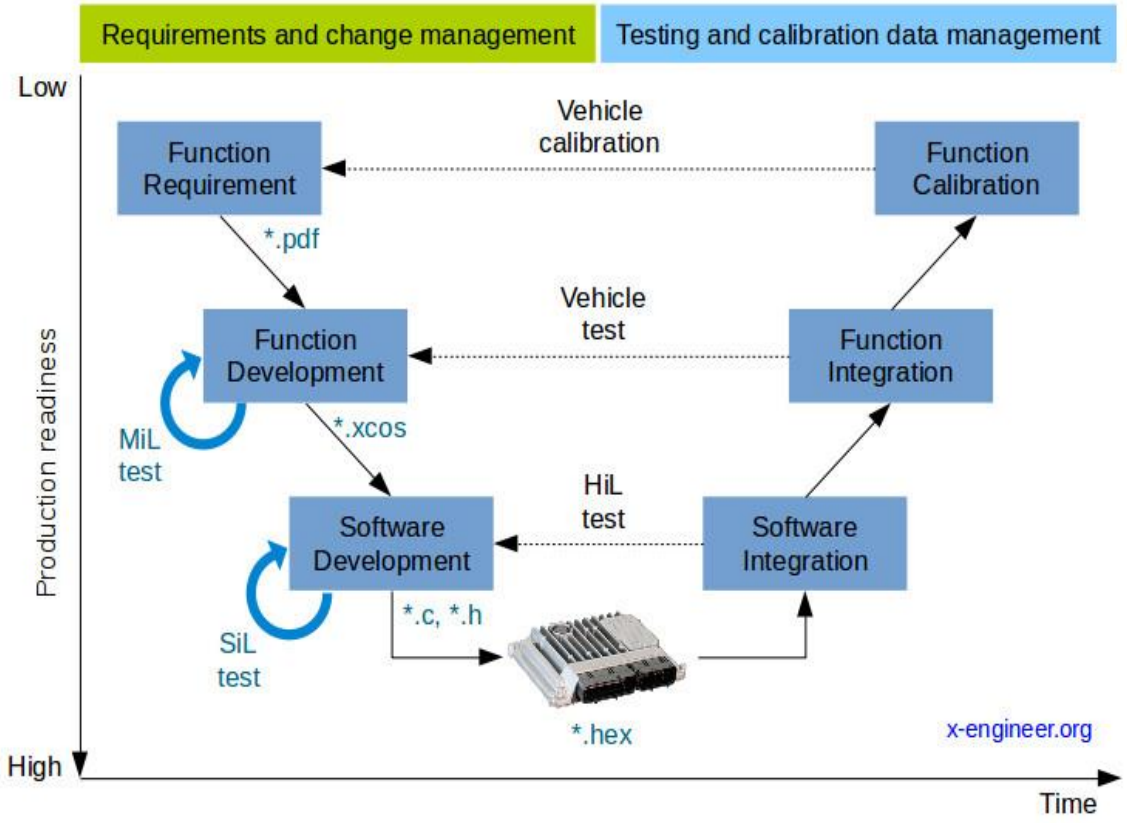
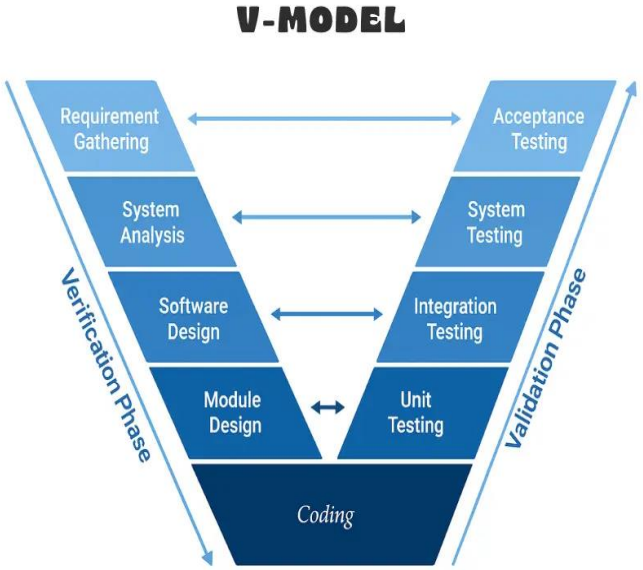
Тестирование, валидация и верификация ADAS (MiL, SiL, HiL, ViL, полигонные испытания) (Методы, инструменты, примеры Euro NCAP и NHTSA).

ADAS напрямую спасает жизни: по данным Euro NCAP и NHTSA, AEB снижает количество rear-end аварий на 40-50 %. Но ошибки в этих системах могут привести к катастрофе. Поэтому разработка следует V-модели (V-Model): левая сторона - разработка требований → дизайн → реализация; правая сторона - верификация (соответствует ли спецификациям?) и валидация (решает ли реальные задачи безопасности?)





Верификация проверяет: «Построено ли правильно?» (MIL/SIL/HiL). Валидация проверяет: «Построено ли то, что нужно?» (ViL + полигон + реальные дороги). Стандарты: ISO 26262 (функциональная безопасность), SOTIF (ISO 21448 для отсутствия известных опасных сценариев).

1. MiL (Model-in-the-Loop) - Модель в контуре

Описание: Полностью виртуальное моделирование. Контроллер (алгоритм ADAS) и объект (vehicle dynamics, sensors, среда) - всё в моделях.

Методы: Симуляция тысяч сценариев за минуты, параметрический sweep (варьирование скоростей, погодных условий, освещения).

Инструменты: MATLAB/Simulink + Simcenter Amesim/Prescan (Siemens), IPG CarMaker, DYNA4.

Преимущества: Дёшево, быстро, раннее обнаружение ошибок логики.

Пример: Тестирование алгоритма AEB на модели - проверка, тормозит ли система при появлении пешехода на 5 км/ч.

2. SiL (Software-in-the-Loop) - Программное обеспечение в контуре

Описание: Генерируем реальный код (C/C++) из модели и запускаем его в симуляторе (без hardware).

Методы: Тестирование сгенерированного кода на тех же сценариях, что и в MiL.

Инструменты: Simulink Coder, Vector CANoe, AV Simulation SCANeR™.

Преимущества: Проверяем компиляцию и поведение кода до заливки в ECU.

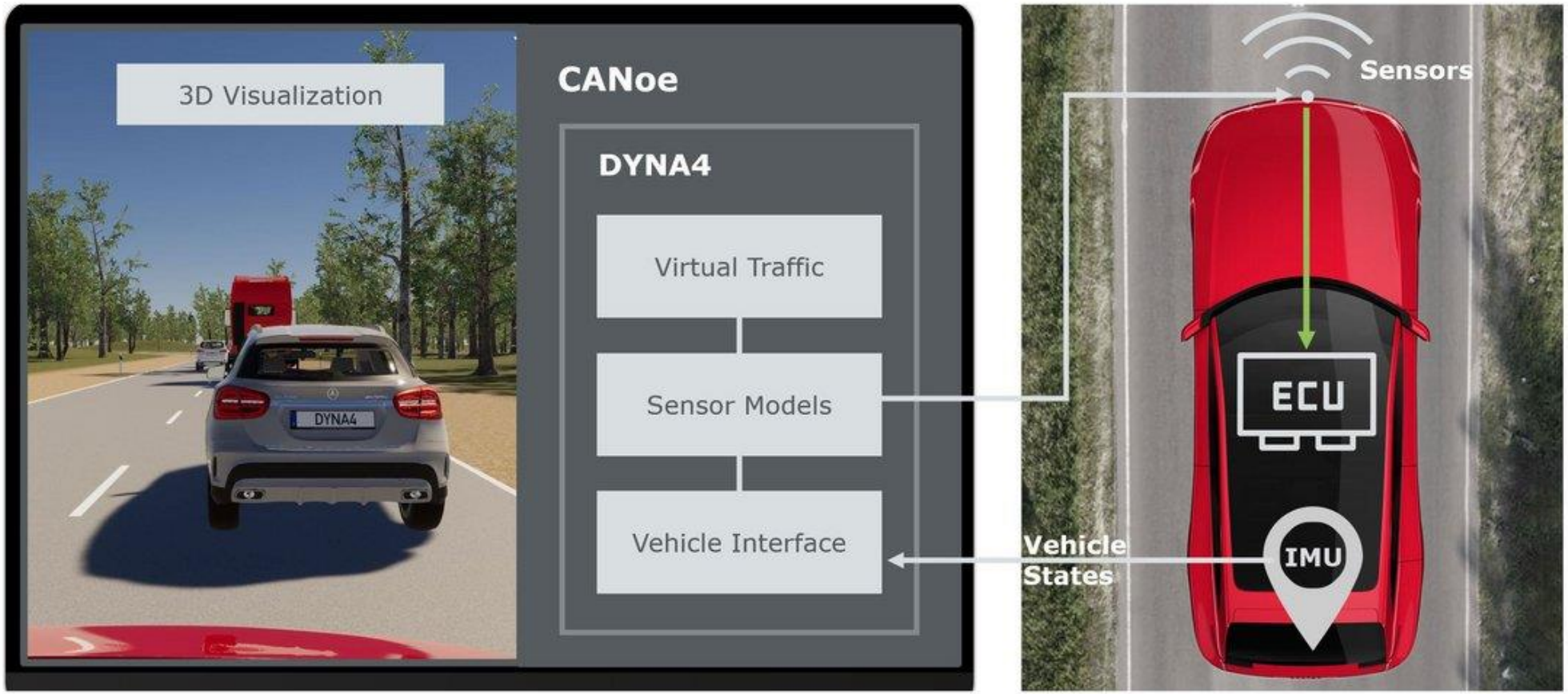
Пример: Код LKAS проверяется на виртуальной трассе с разметкой разных типов.

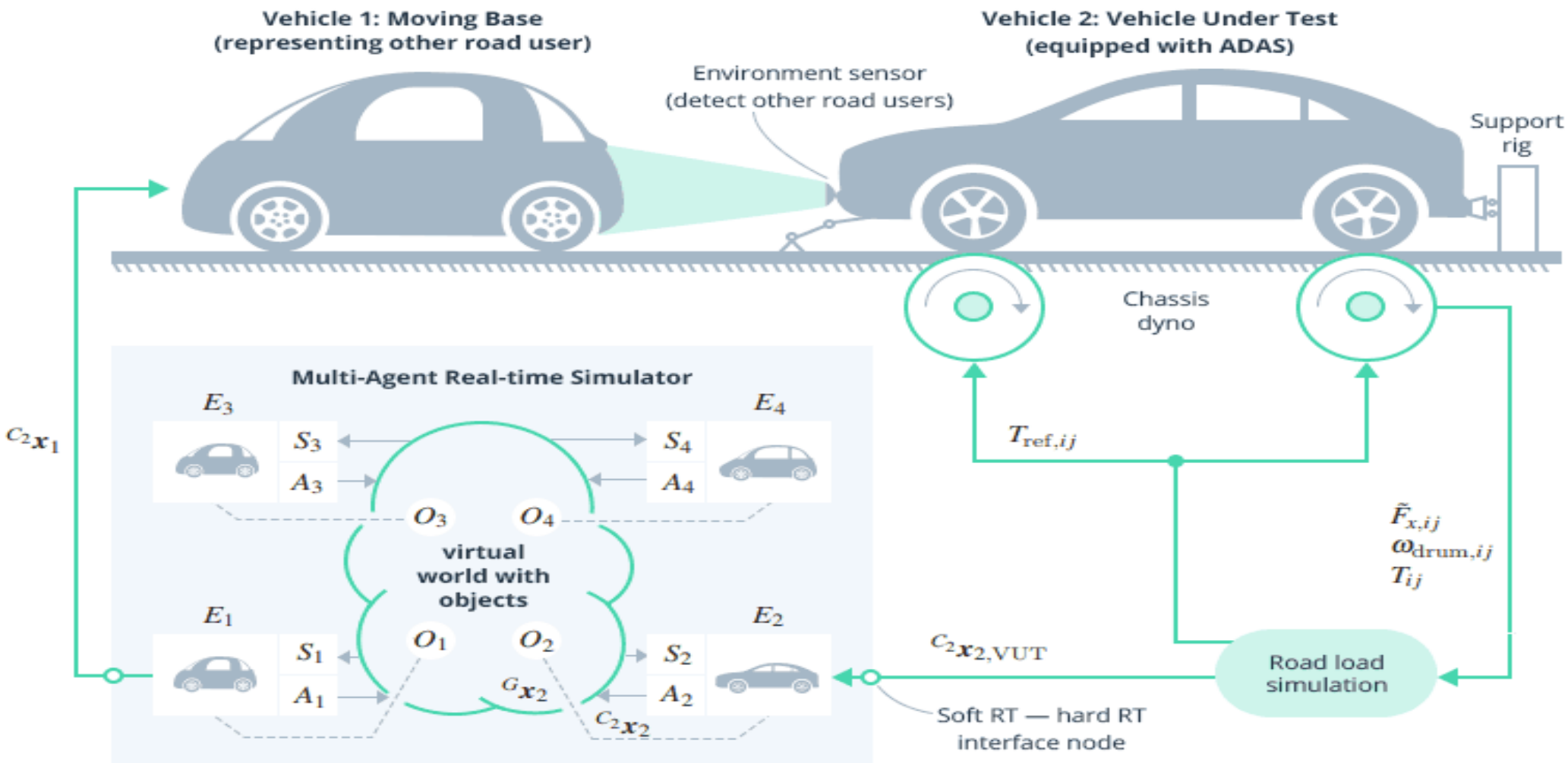
3. HiL (Hardware-in-the-Loop) - Аппаратное обеспечение в контуре
Описание: Реальный ECU (или несколько) подключён к реальному времени симулятору. Сенсоры (камера, радар, лидар) эмулируются сигналами.
Методы: Реал-тайм симуляция (1 мс шаг), fault injection (ввод ошибок сенсоров).
Инструменты: dSPACE SCALEXIO, National Instruments VeriStand, Vector DYNA4 + CANoe, Speedgoat.
Преимущества: Проверяем интерфейсы, timing, реальное поведение ECU.
Пример: ECU AEB получает синтетические сигналы радара о приближающемся автомобиле - проверяем задержку торможения.
4. ViL (Vehicle-in-the-Loop) - Автомобиль в контуре
Описание: Реальный автомобиль на полигоне, но сенсоры отключены и получают **синтетические данные** из симулятора в реальном времени.
Методы: Смешанная реальность - физический автомобиль + виртуальные участники движения.
Инструменты: Vector DYNA4 + CANoe, Siemens Simcenter Prescan + HEEDS, AVL DrivingCube.
Преимущества: Самая близкая к реальности проверка перед полным физическим тестом.
Пример: Автомобиль едет по пустому полигону, но ECU «видит» виртуального пешехода или велосипедиста.

Example Setup 1 – Direct Stimulation of Sensor

Virtual Test Setup

Real Vehicle in Real Environment




Vehicle 1: Moving Base
(representing other road user)
Vehicle 2: Vehicle Under Test
(equipped with ADAS)
Environment sensor
(detect other road users)
Support
rig
Chassis
dyno
Multi-Agent Real-time Simulator
E_3
E_4
S_3
A_3
S_4
A_4
O_3
O_4
virtual
world with
objects
E_1
E_2
O_1
O_2
S_1
A_1
S_2
A_2
${}^{G}\boldsymbol{x}_2$
${}^{C_2}\boldsymbol{x}_2$
${}^{C_2}\boldsymbol{x}_1$
$T_{\mathrm{ref},ij}$
$\tilde{F}_{x,ij}$
$\omega_{\mathrm{drum},ij}$
T_{ij}
${}^{C_2}\boldsymbol{x}_{2,\mathrm{VUT}}$
Road load
simulation
Soft RT — hard RT
interface node

5. Полигонные (proving ground) испытания

Описание: Полностью физические тесты на специальном треке с мягкими/жёсткими мишенями (Global Vehicle Target - GVT от AB Dynamics, манекены пешеходов/велосипедистов). Используются роботы-водители для repeatability. **Методы**: Сценарии по протоколам (скорости, перекрытия, освещение). **Инструменты**: AB Dynamics robot systems, Humanetics/4active манекены, GST платформы. **Преимущества**: Реальная физика, подтверждение виртуальных результатов. **Недостатки**: Дорого, медленно, ограниченное количество сценариев (сотни вместо миллионов в симуляции).

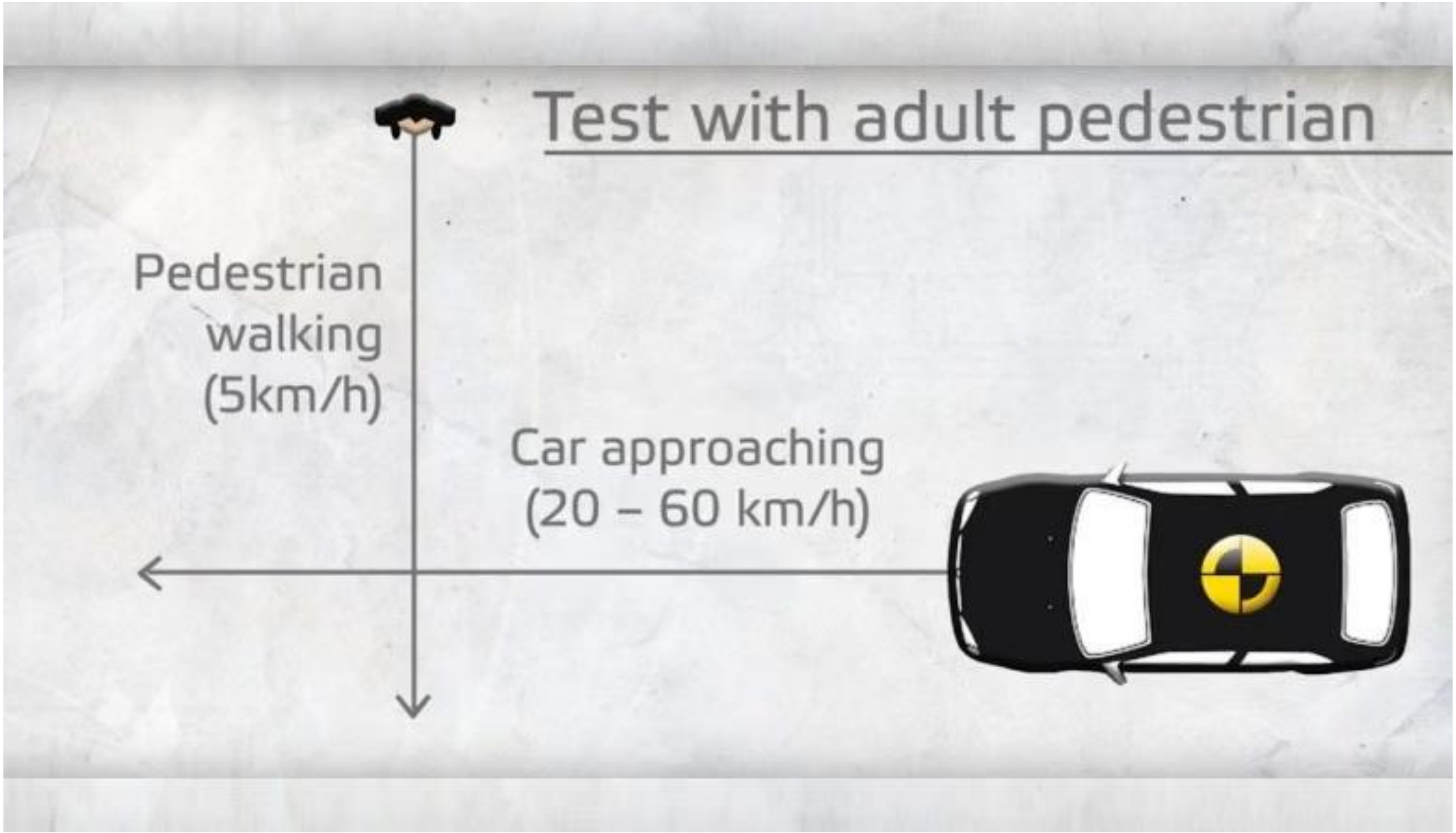
Примеры из Euro NCAP и NHTSA (2024–2026)

Euro NCAP (Европа) - лидер в активной безопасности. Протоколы: Crash Avoidance (AEB Car-to-Car, VRU - пешеходы/велосипедисты), Lane Support Systems, Assisted Driving (Highway Assist). С 2026 года официально **принимают виртуальные тесты** (MiL/SiL/HiL/ViL) как часть оценки - с обязательной spot-check верификацией на полигоне и «mega grid» (расширенная матрица сценариев, +186 % сценариев). **Конкретные сценарии**:

- AEB пешеход: взрослый/ребёнок переходит дорогу (5 км/ч), скорость автомобиля 20–60 км/ч, день/ночь.
- Car-to-Car: ведущий автомобиль тормозит (0,3–0,6 g), LVS/LVM/LVD.
- Lane Departure: выезд из полосы при отвлечении водителя.


EURO NCAP

Test with adult pedestrian



NHTSA NCAP (США) - фокус на потребительской информации. С модельного года 2026 добавлены BSW, BSI, LKA, PAEB. Только **физические тесты** на треке (нет виртуальных в официальной оценке). Используют тот же GVT Revision G.

Конкретные сценарии:

- CIB/DBS: LVS (стоп), LVM (20 км/ч), LVD (торможение 0,3/0,5 g) при 40–100 км/ч.
- PAEB: S1 (пересечение) и S4 (в пути) с манекенами взрослый/ребёнок, день/ночь, скорости до 60 км/ч.
- BSI: смена полосы на виртуальную мишень.



Гармонизация: NHTSA активно ссылается на протоколы Euro NCAP (AEB Car-to-Car v4.3), используют одинаковые мишени и критерии «no contact».

Интеграция методов (рекомендуемый pipeline)

MiL/SiL (миллионы сценариев) → HiL (ECU) → ViL (реальный автомобиль + виртуальная среда) → Полигон (корреляция) → Реальные дороги (field operational test). Siemens, AVL, AB Dynamics предлагают единую платформу, где сценарии OpenSCENARIO переиспользуются на всех уровнях.

Полная уверенность в безопасности ADAS достигается только комбинацией виртуального и физического тестирования. С 2026 Euro NCAP активно переходит на hybrid-валидацию, что ускоряет разработку и снижает затраты. Ключевые навыки для вас как инженеров: работа с Simulink/Prescan, знание протоколов Euro NCAP/NHTSA, понимание XIL-цепочки.