

Транспорт умного города: некоторые научные задачи

Борисевич Алексей, к.т.н.,
Sr. Staff Firmware Engineer, Tesla Inc.

План

- Кое-что об электромобилях в умном городе
- Управление трафиком умного города
- Беспилотные автомобили в умном городе

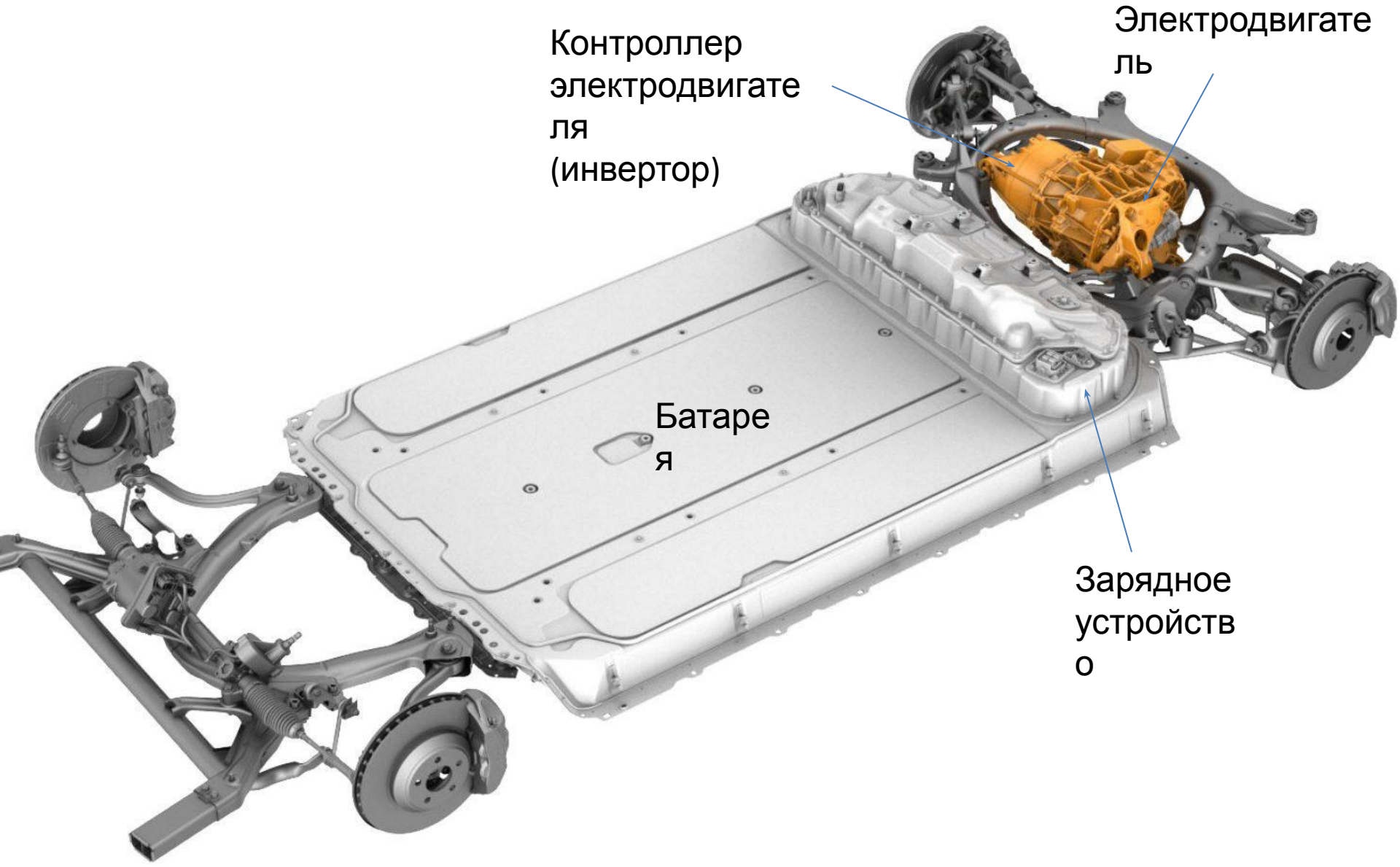
Чем хорош электромобиль в городе

- Не загрязняет воздух
- Регенерирует энергию торможения
- Эффективнее на скоростях движения
- Тише
- Проще и дешевле в обслуживании

Что такое электромобиль



Tesla Model 3



Контроллер
электродвигате
ля
(инвертор)

Электродвигате
ль

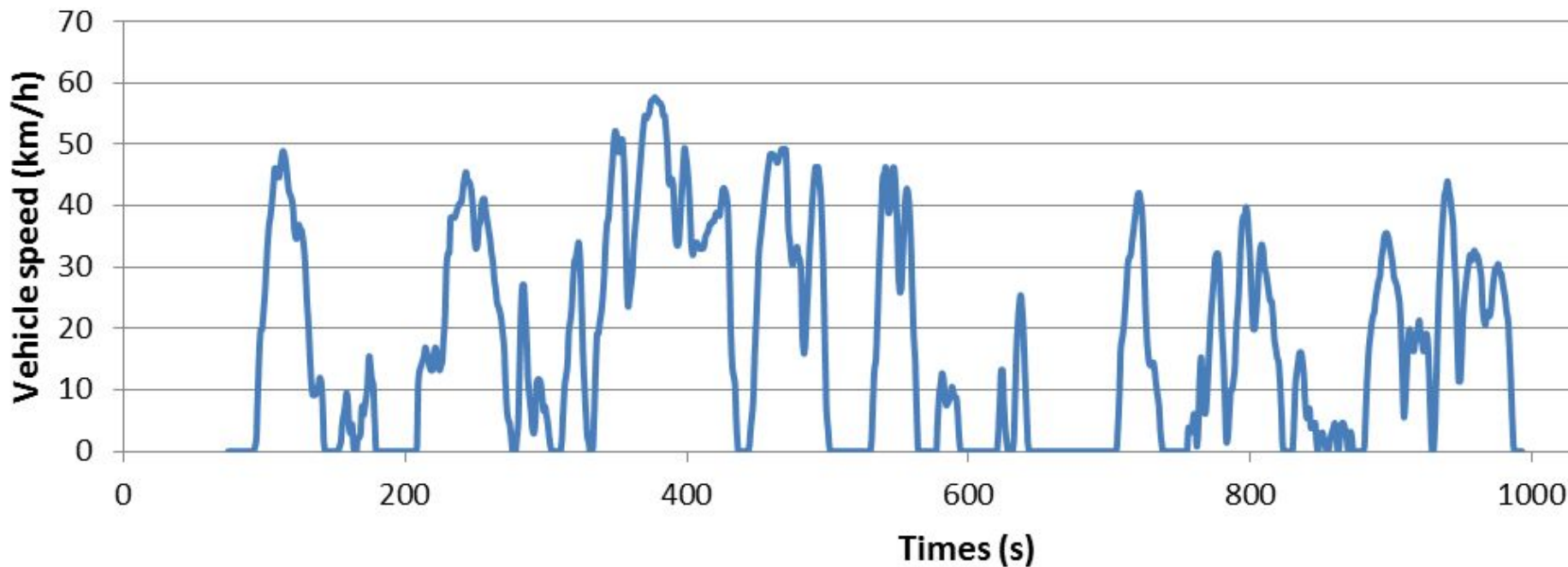
Батаре
я

Зарядное
устройств
о

Тестовые маршруты Artemis

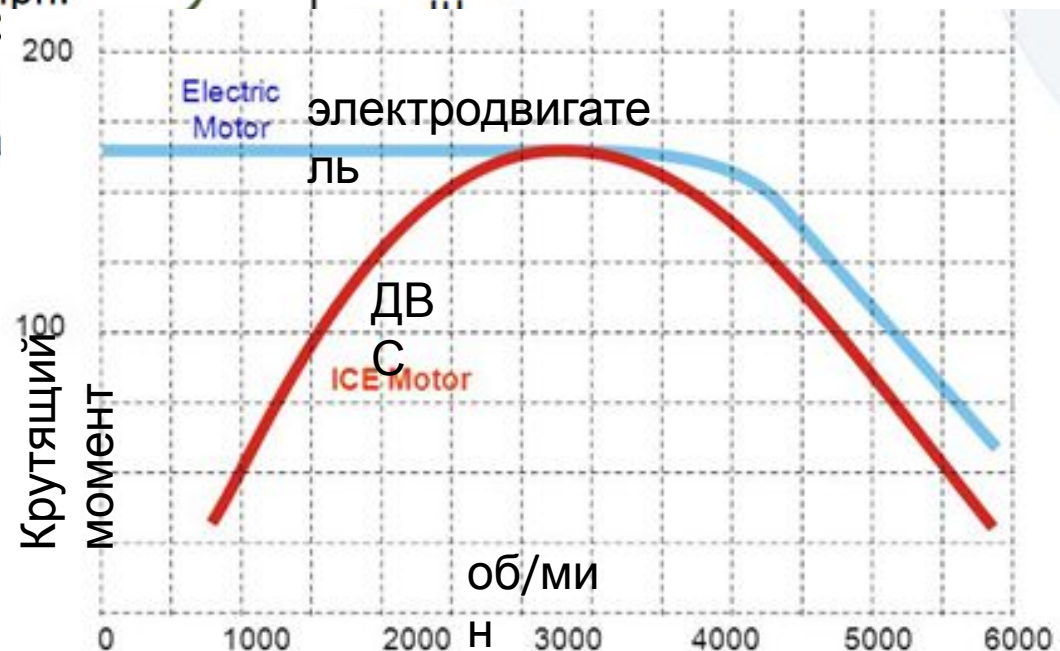
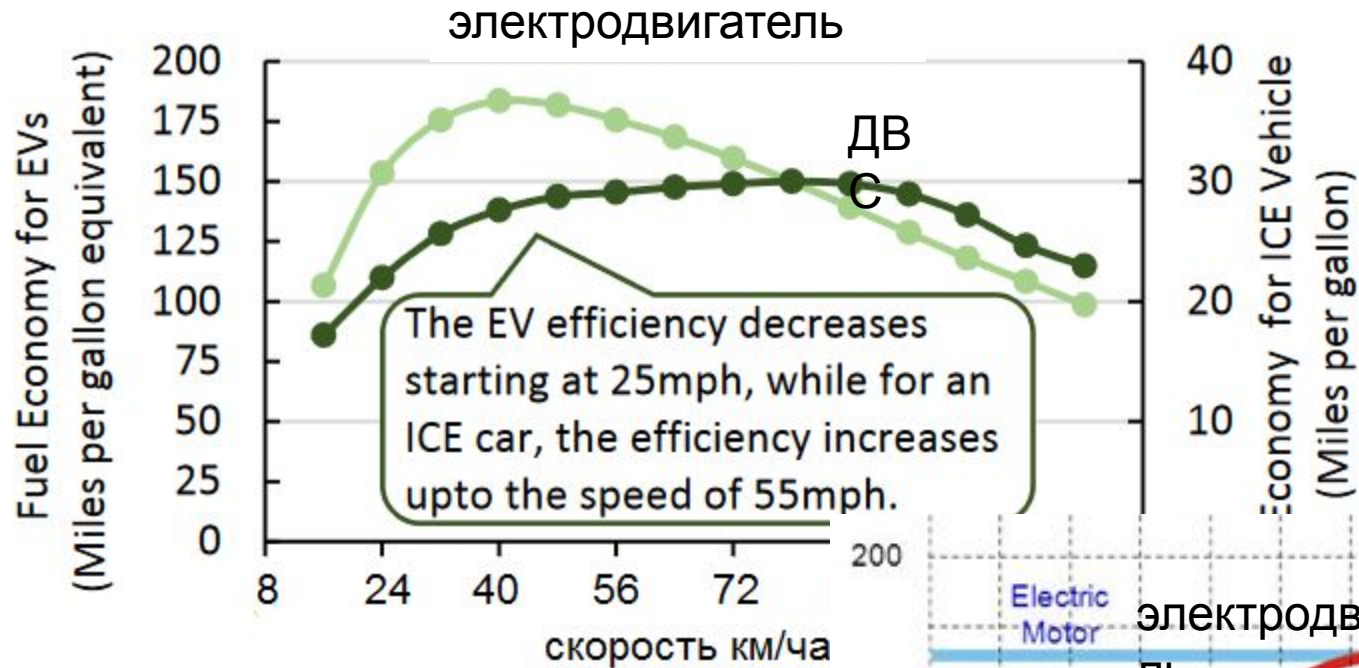
(Г П Т)

Urban Artemis cycle

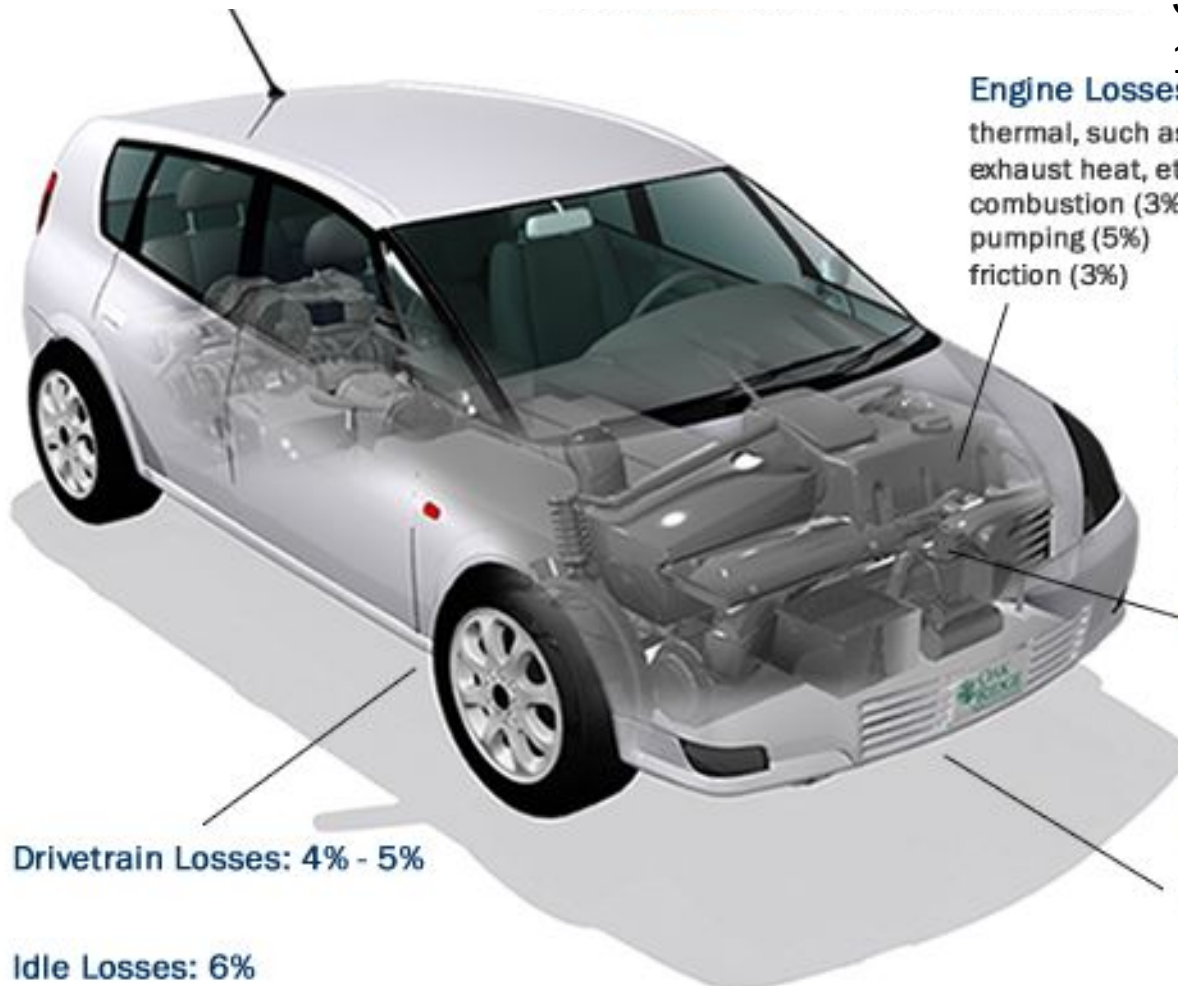


	ГОРОД	ПРИГОРОД	ТРАССА
Расстояние	4870 км	17272 км	29545 км
Время	16.5 мин	18.5 мин	17.8 мин
Скорость	17.6 км/час	57.5 км/час	99.6 км/час

ДВС vs электродвигатель



Потери в автомобиле с ДВС



Эффективность:

12%–30%

Engine Losses: 71% - 75%

thermal, such as radiator,
exhaust heat, etc. (60% - 64%)
combustion (3%)
pumping (5%)
friction (3%)

Auxiliary Electrical Losses:

0% - 2%

(e.g., climate control fans,
seat and steering wheel
warmers, headlights, etc.)

Parasitic Losses: 5% - 7%

(e.g., water, fuel and oil
pumps, ignition system,
engine control system, etc.)

Power to Wheels: 12% - 20%

Dissipated as
wind resistance: (3% - 5%)
rolling resistance (3% - 5%)
braking (6% - 10%)

Drivetrain Losses: 4% - 5%

Idle Losses: 6%

In this figure, they are accounted for as part of the engine and parasitic losses.

Some percentages may not add to 100% due to rounding.

Потери в электромобиле

Эффективность:
72%–94%

Energy Lost in Charging
Battery: 16%

Parasitic Losses: 4%

Electric Drive System
Losses: 18%

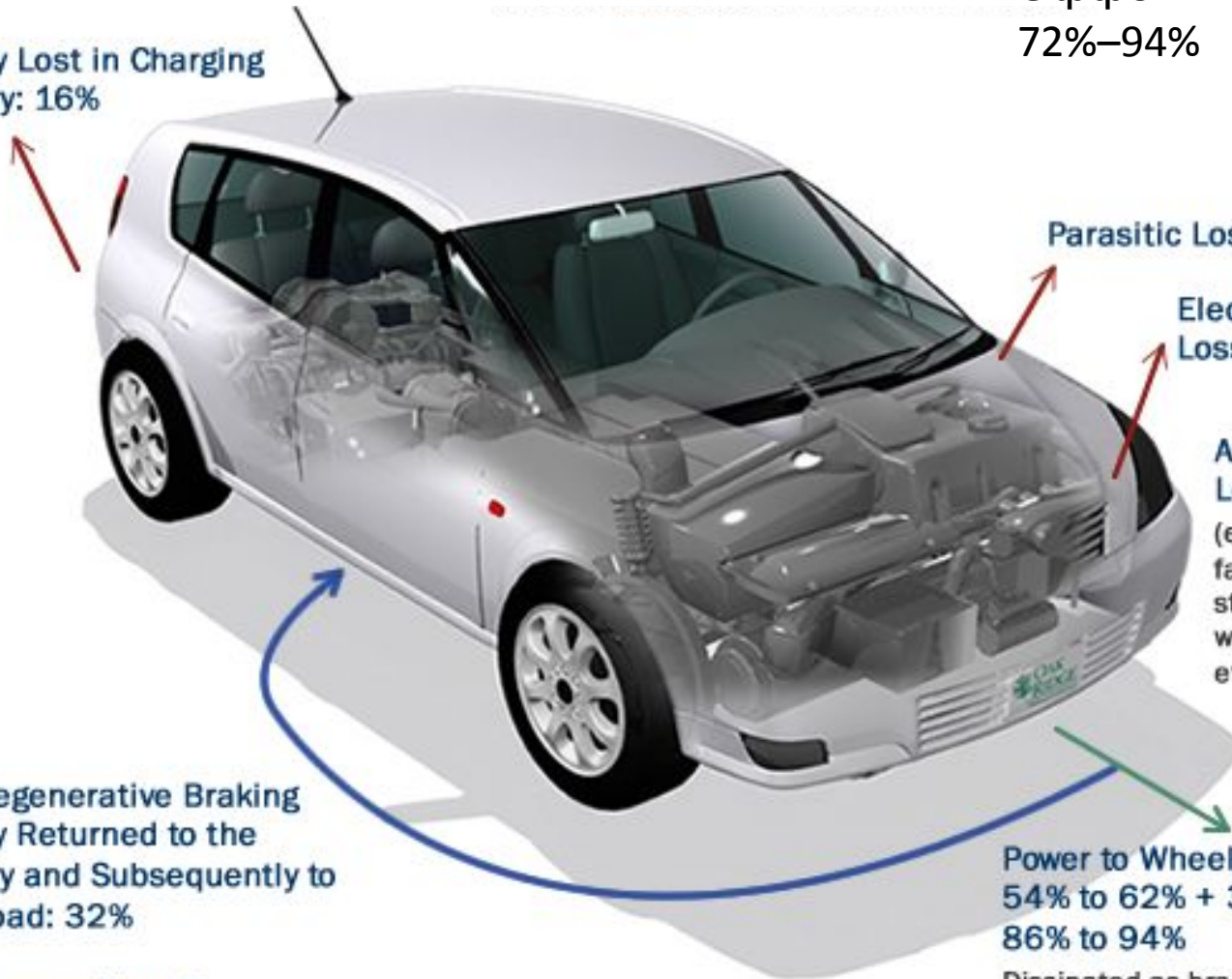
Auxiliary Electrical
Losses: 0% - 6%
(e.g., climate control
fans, seat and
steering wheel
warmers, headlights,
etc.)

Net Regenerative Braking
Energy Returned to the
Battery and Subsequently to
the Road: 32%

Idle Losses: Near 0

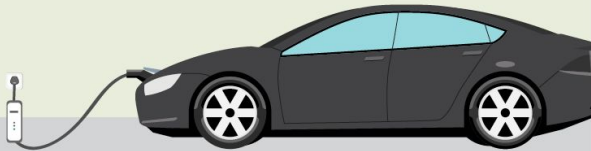
Power to Wheels:
54% to 62% + 32% (recovered) =
86% to 94%

Dissipated as braking (36% - 40%),
wind resistance (27% - 29%),
rolling resistance (23% - 25%)



Чем заряжать электромобиль

AC Level One



VOLTAGE

120v 1-Phase AC

AMPS

12–16 Amps

CHARGING LOADS

1.4 to 1.9 kW

CHARGE TIME FOR VEHICLE

3–5 Miles of Range Per Hour

AC Level Two



VOLTAGE

208V or 240V 1-Phase AC

AMPS

12–80 Amps (Typ. 32 Amps)

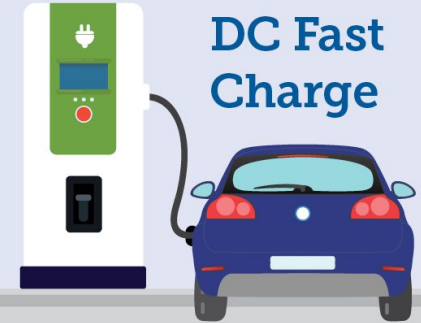
CHARGING LOADS

2.5 to 19.2 kW (Typ. 7 kW)

CHARGE TIME FOR VEHICLE

10–20 Miles of Range Per Hour

DC Fast Charge



VOLTAGE

208V or 480V 3-Phase AC

AMPS

<125 Amps (Typ. 60 Amps)

CHARGING LOADS

<90 kW (Typ. 50 kW)

CHARGE TIME FOR VEHICLE

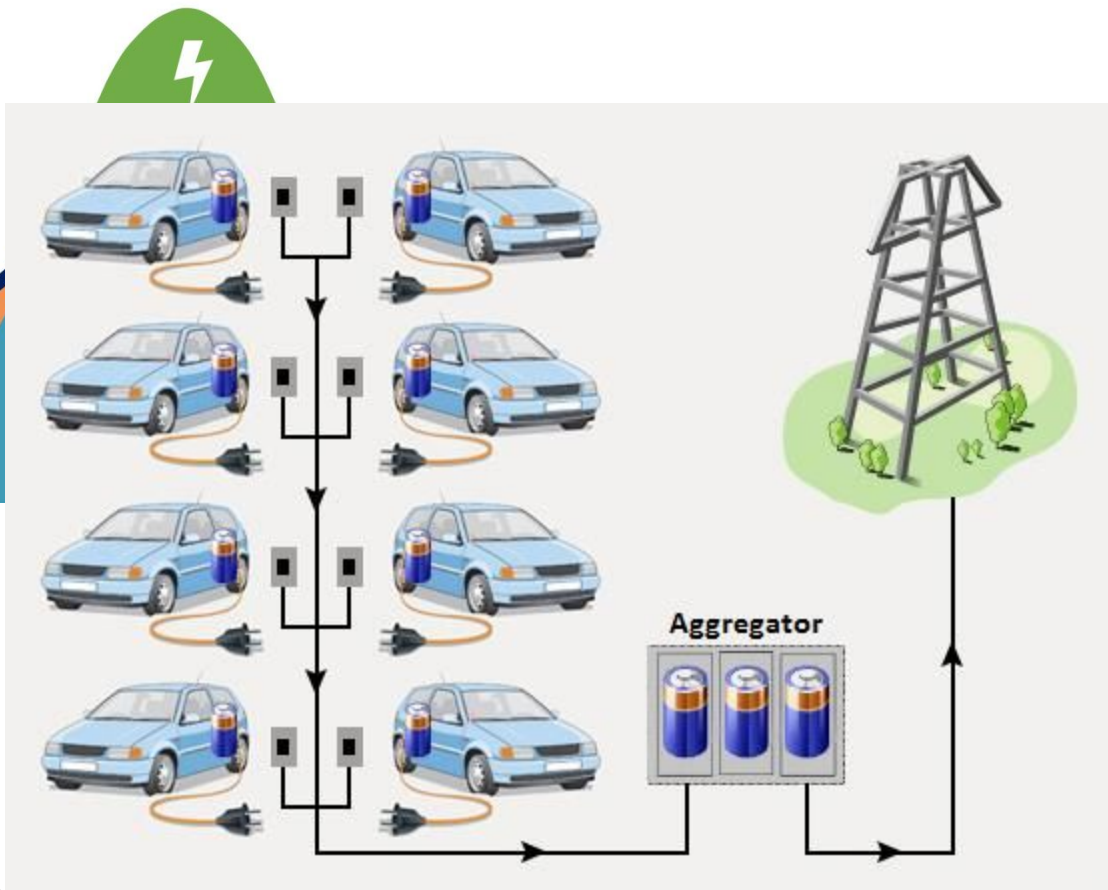
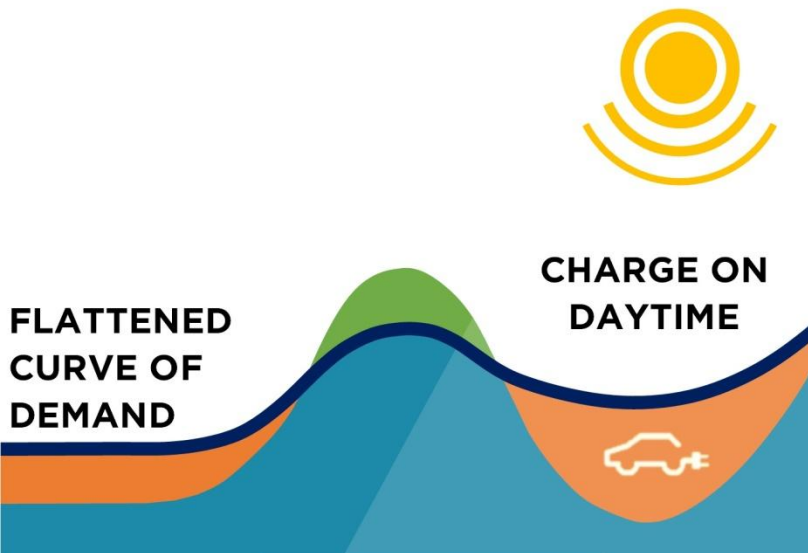
80% Charge in 20–30 Minutes

Инфраструктурные проблемы заряда электромобиля

- Как разместить зарядные станции
 - Путешествие из точки А в точку Б
 - Исходя из имеющихся электромобилей в районе
- Как спланировать заряд во времени
 - Что делать с ограничениями электросетей
 - “Эффект уточки” и профиль заряда

Распределение заряда по

времени ENERGY RELEASE ON EVENING



Smart grid: вместе с электроэнергией передается информация

Vehicle-to-grid (V2G): автомобиль взаимодействует с сетью (как интеллектуальный потребитель и накопитель)

Размещение: как парковки

$$demand(x, y) = \sum_{i \in area(x, y)} EV_i$$

сколько электромобилей (кВт ч)

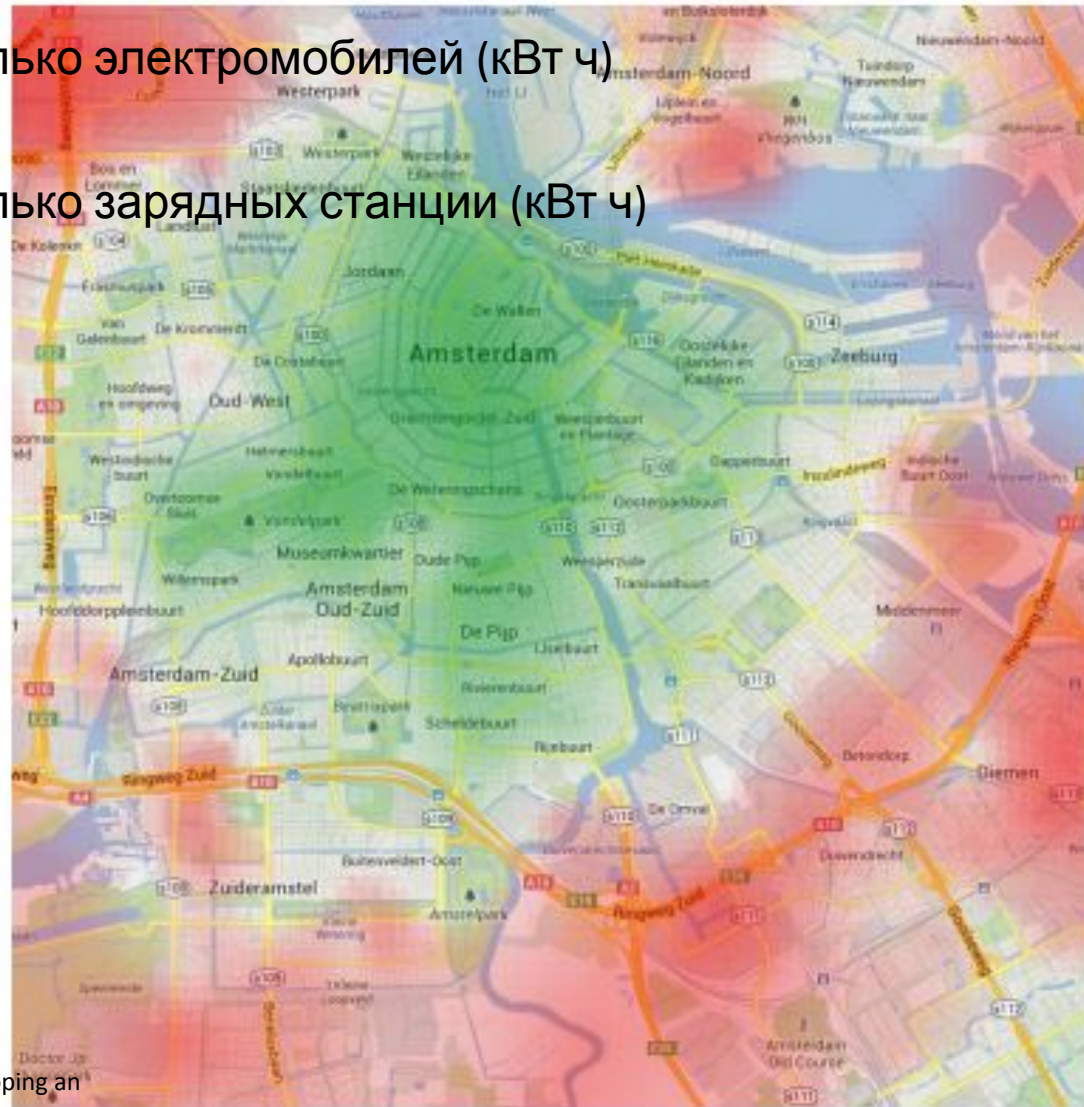
$$supply(x, y) = \sum_{i \in area(x, y)} Chg_i$$

сколько зарядных станции (кВт ч)

$$f(x, y) = supply(x, y) - demand(x, y)$$

Нет красных пятен на
карте

$$f(x, y) > 0$$

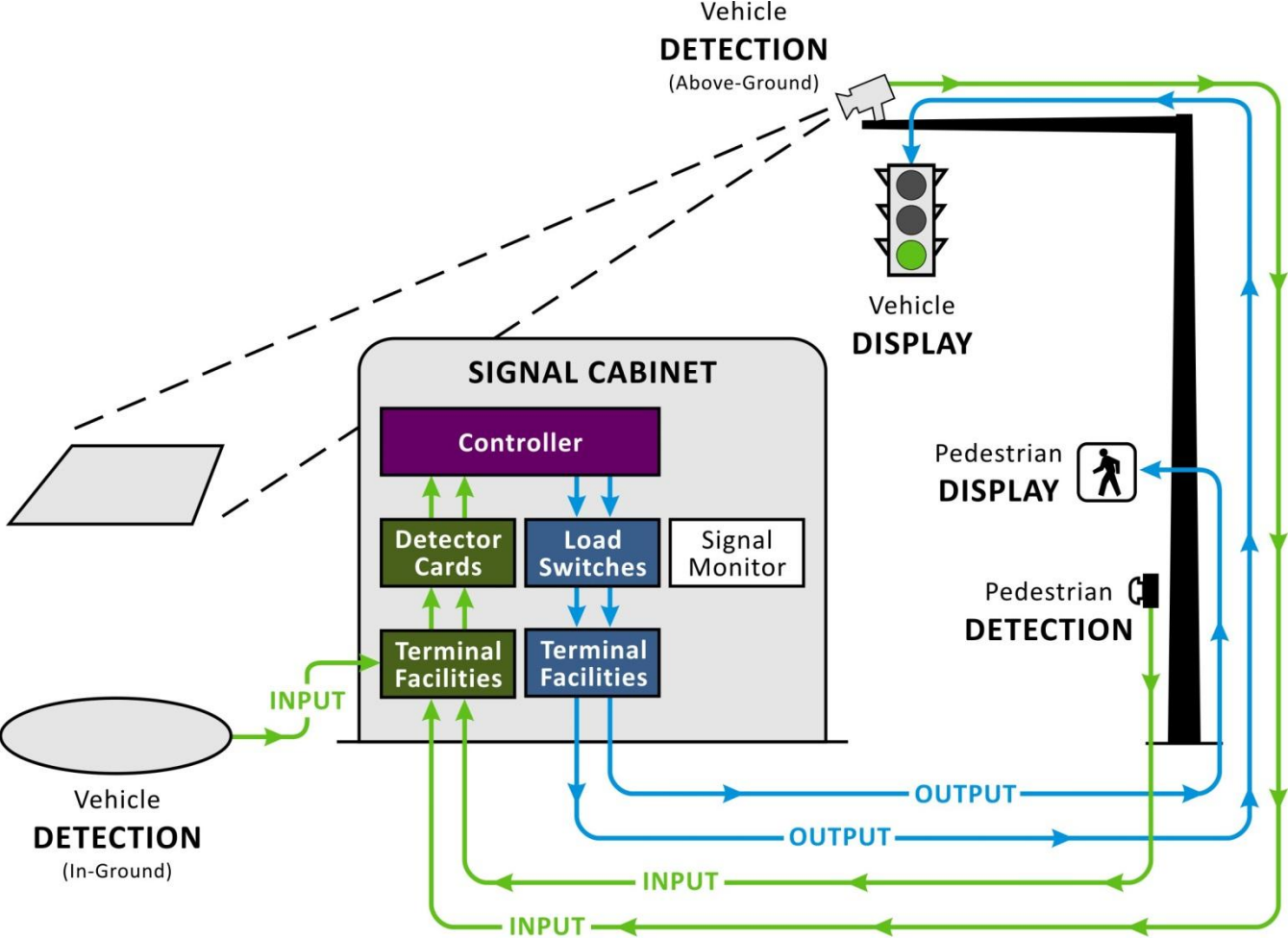


Автомобильные пробки

- \$305 млрд потерь в 2015 году в США
 - потерянная продуктивность людей
 - увеличение транспортных издержек через районы с пробками
 - затраченное топливо

RANK	CITY	PEAK HOURS SPENT IN CONGESTION	INRIX CONGESTION INDEX	AVERAGE CONGESTION RATE	TOTAL COST PER DRIVER	TOTAL COST TO THE CITY
1	Los Angeles; CA	102	18.3	12%	\$2,828	\$19.2bn
2	New York City; NY	91	17.4	13%	\$2,982	\$33.7bn
3	San Francisco; CA	79	13.7	12%	\$2,250	\$10.6bn
4	Atlanta; GA	70	12.3	10%	\$2,212	\$7.1bn
5	Miami; FL	64	11.8	9%	\$2,072	\$6.3bn

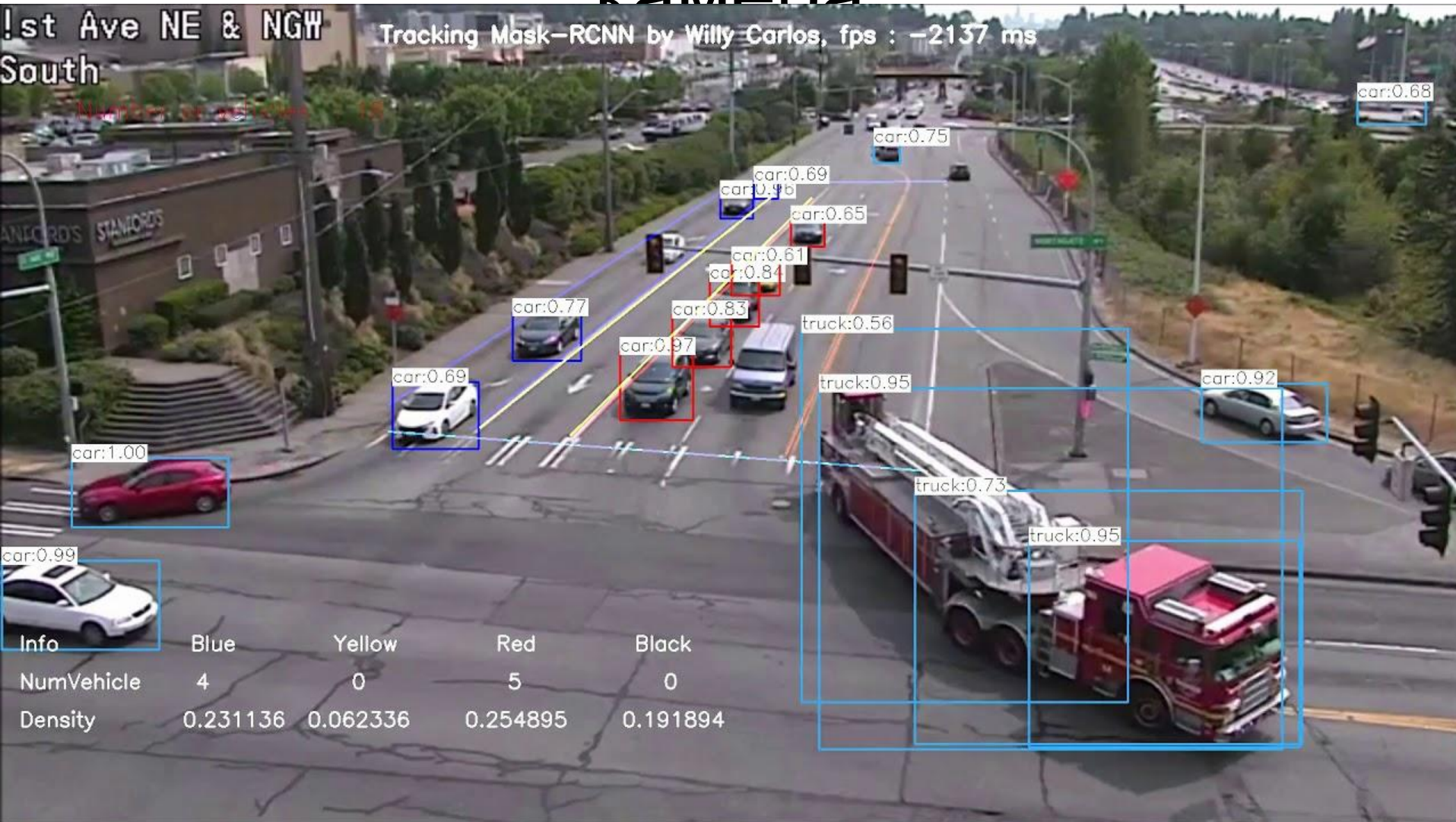
Светофор как замкнутая система управления



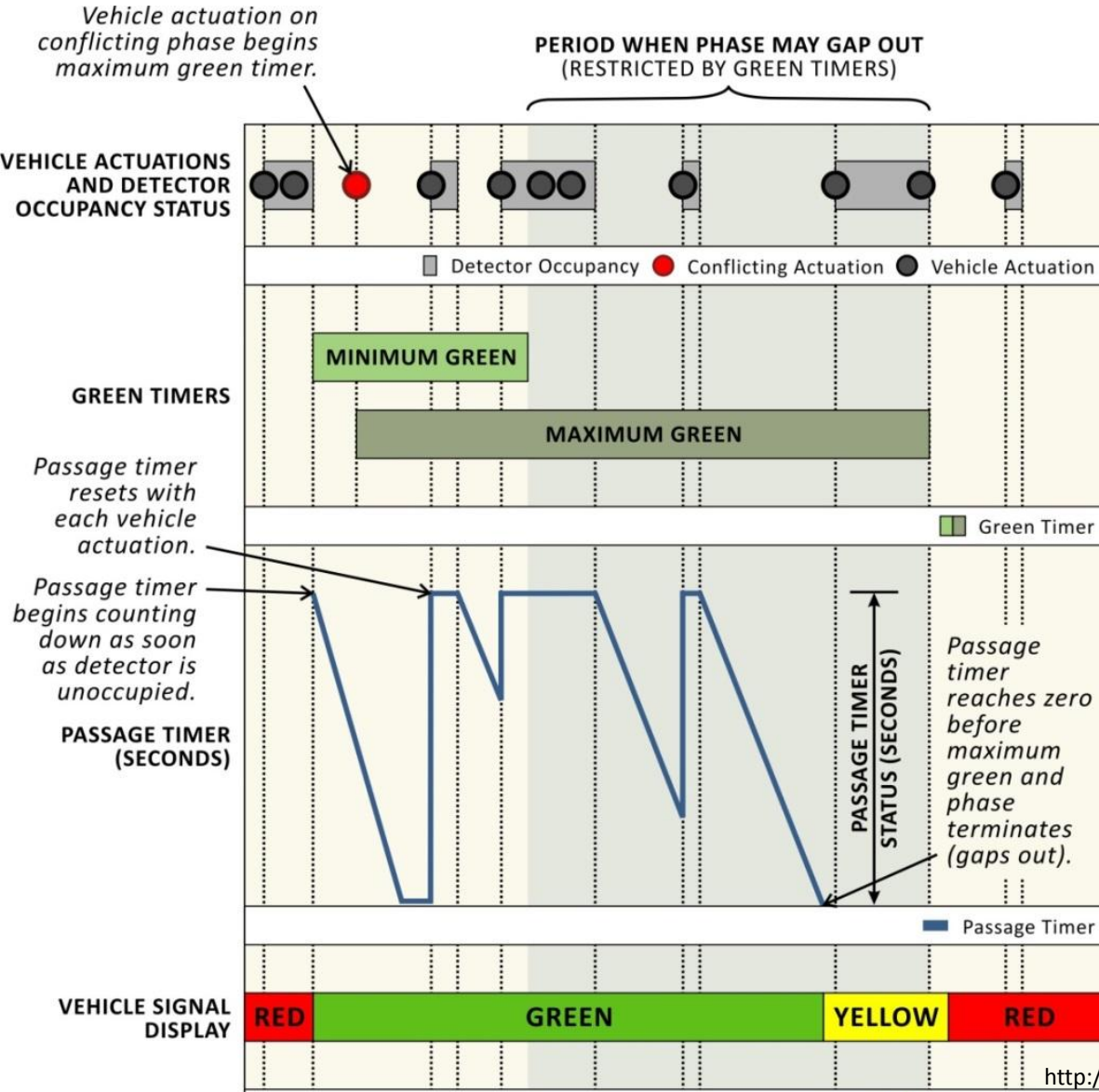
Очередь перед светофором: ИНДУКТИВНЫЙ ДАТЧИК



Очередь перед светофором: камера



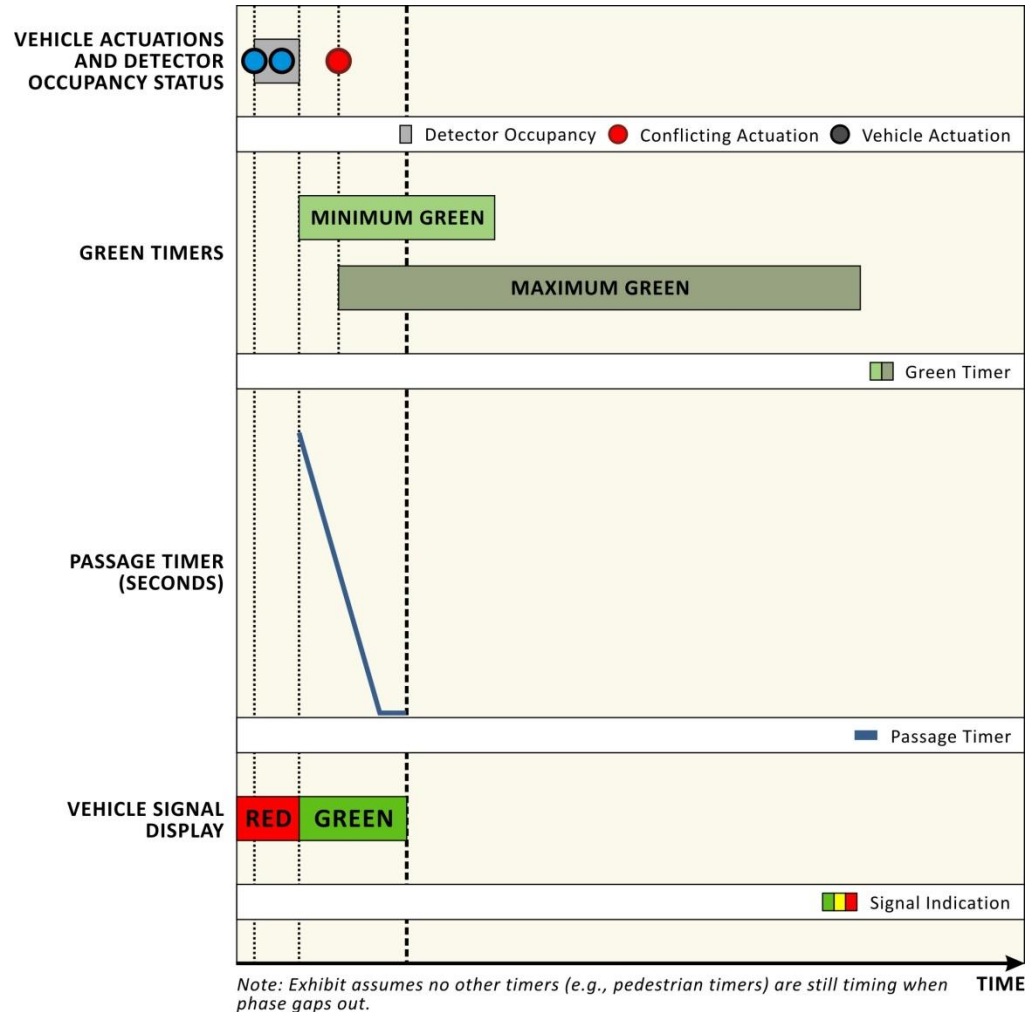
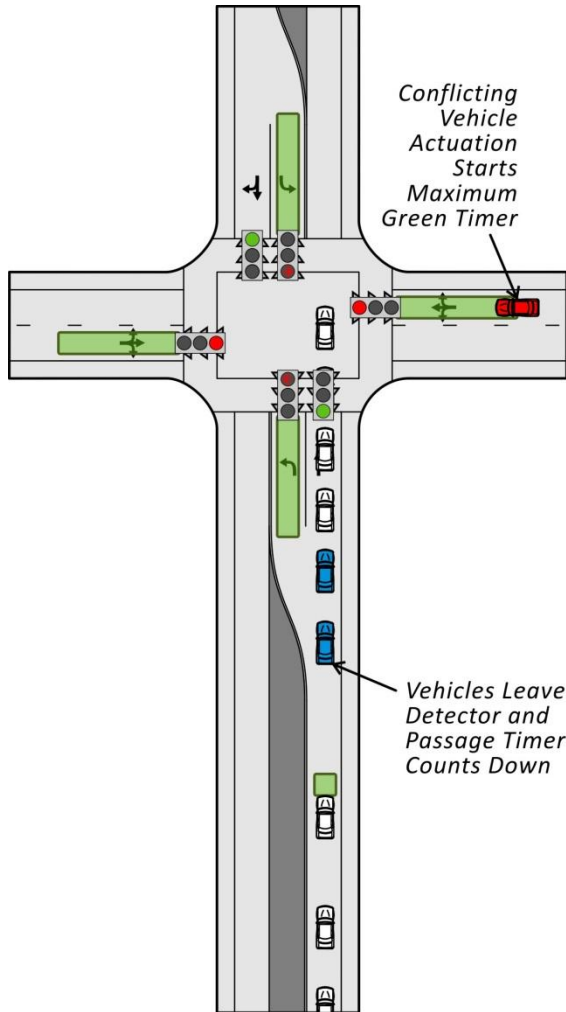
Цикл светофора в одном направлении

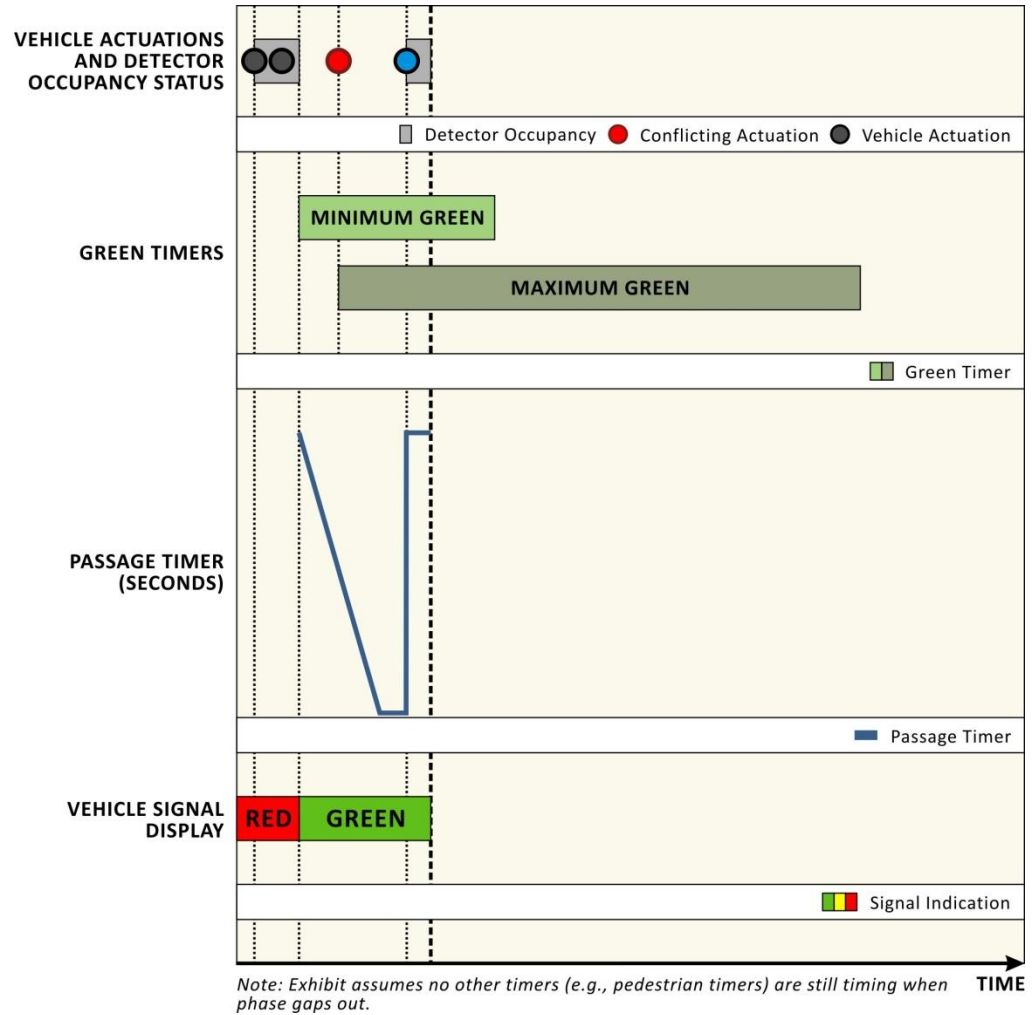
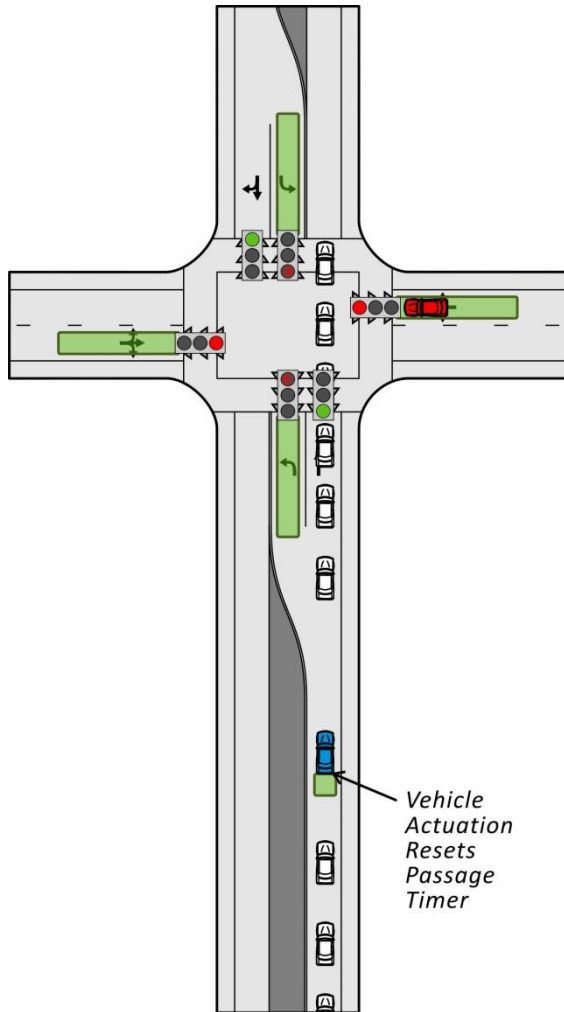


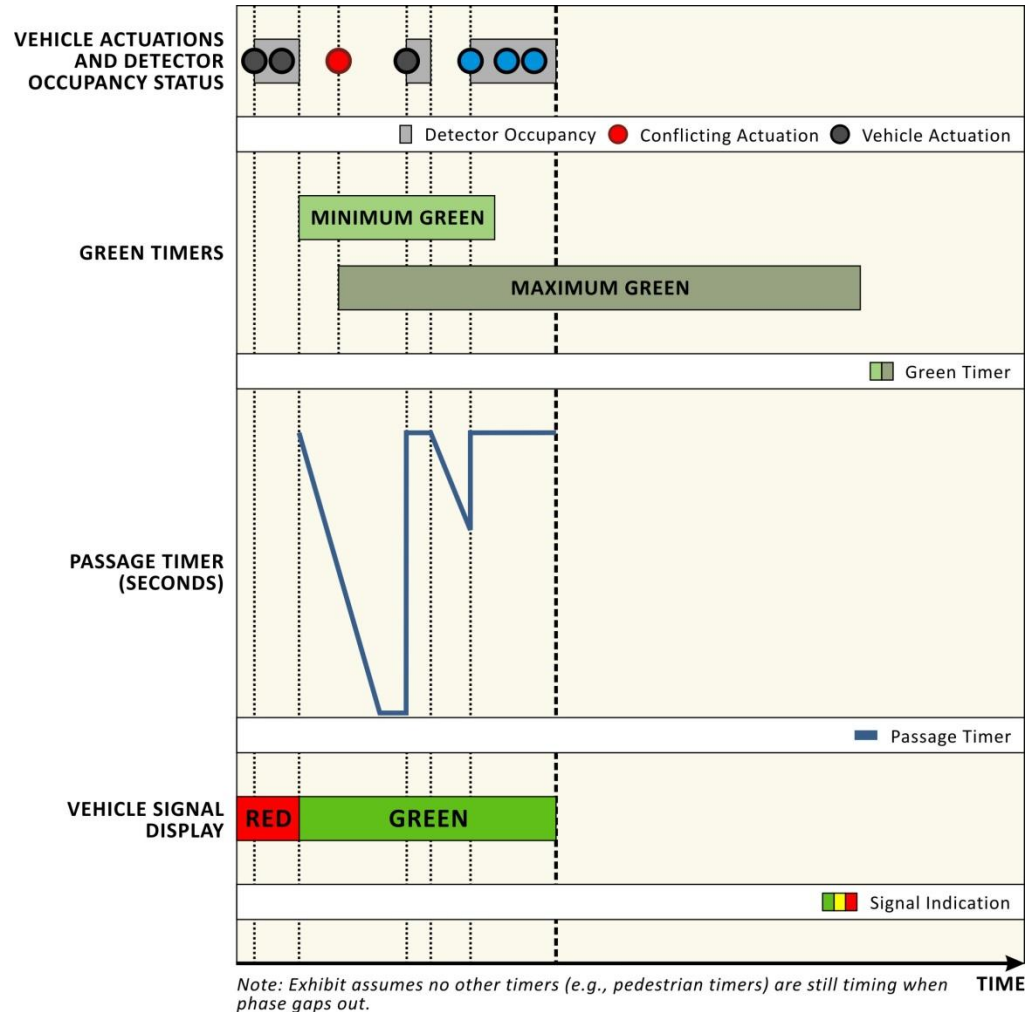
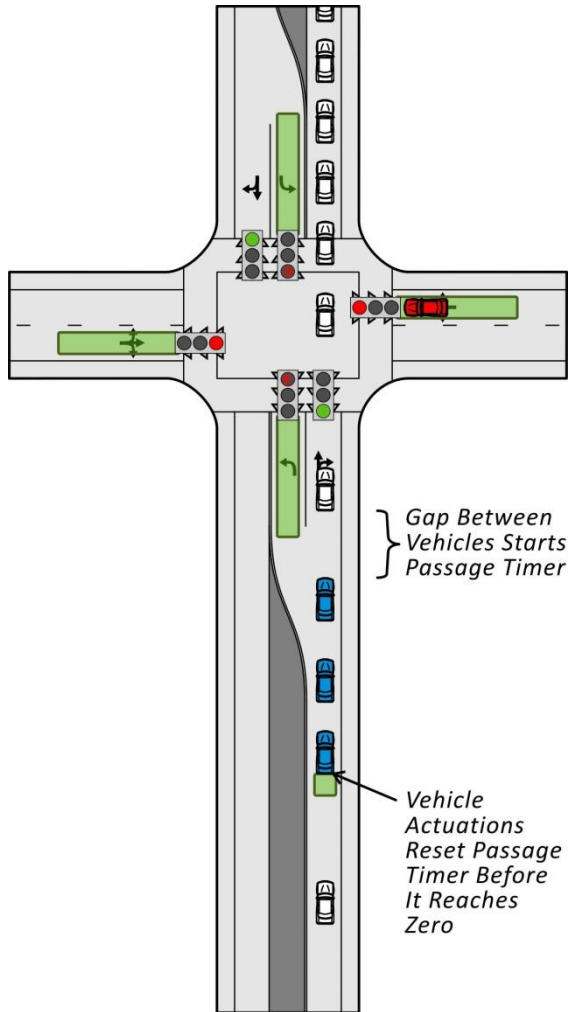
Три таймера:

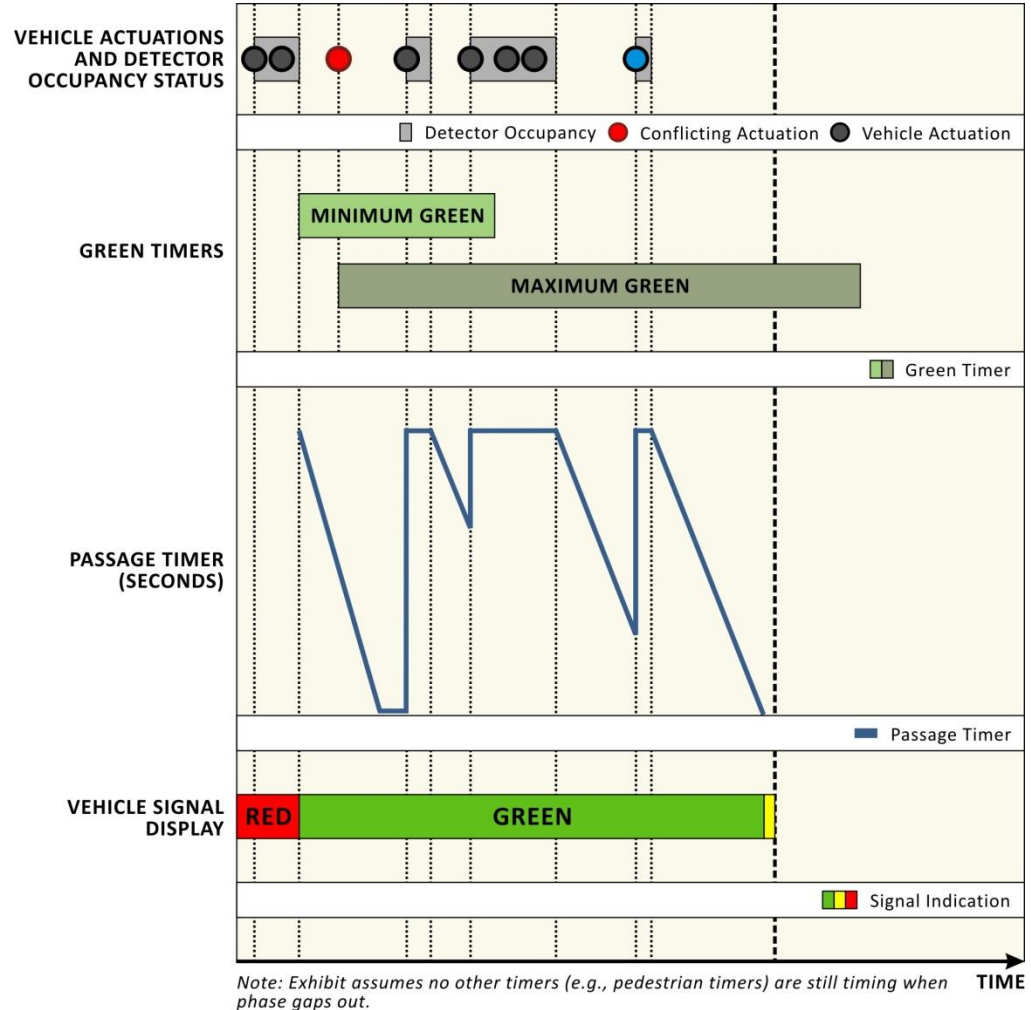
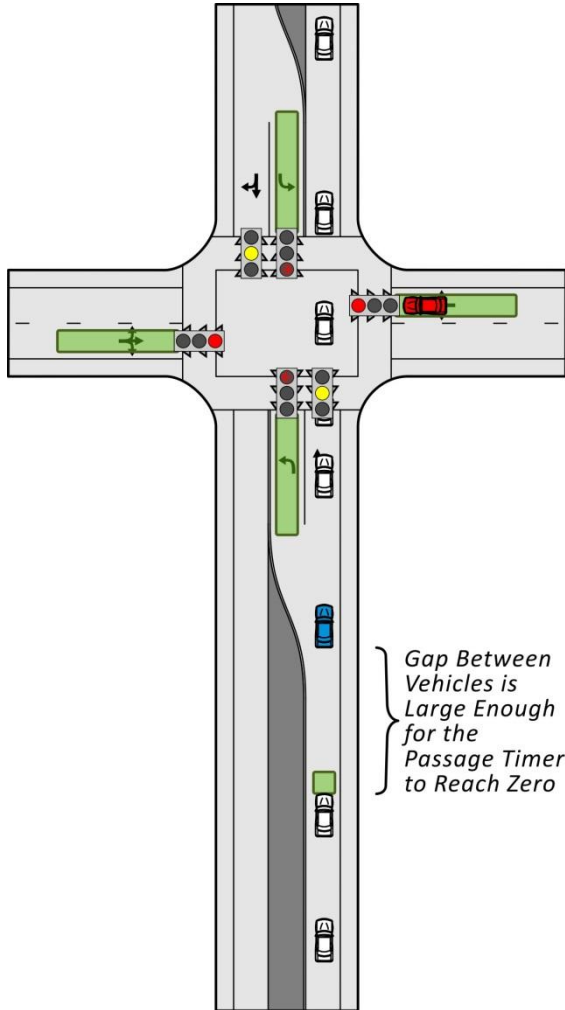
- Minimum green timer = Таймер минимальной длительности зеленого
- Maximum green timer = Таймер максимальной длительности зеленого
- Passage timer = Пропускной таймер – завершает зеленую фазу когда нет машин и минимальная длительность зеленого пройдена

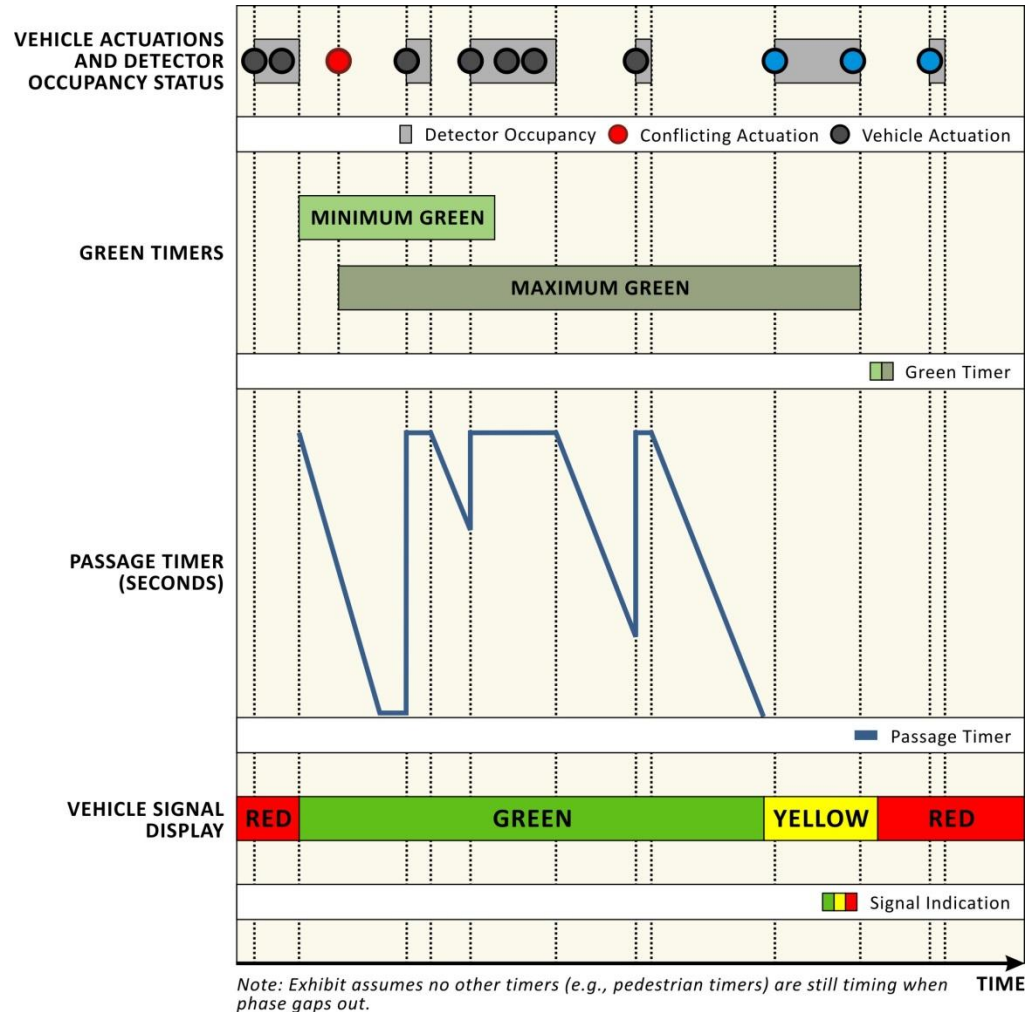
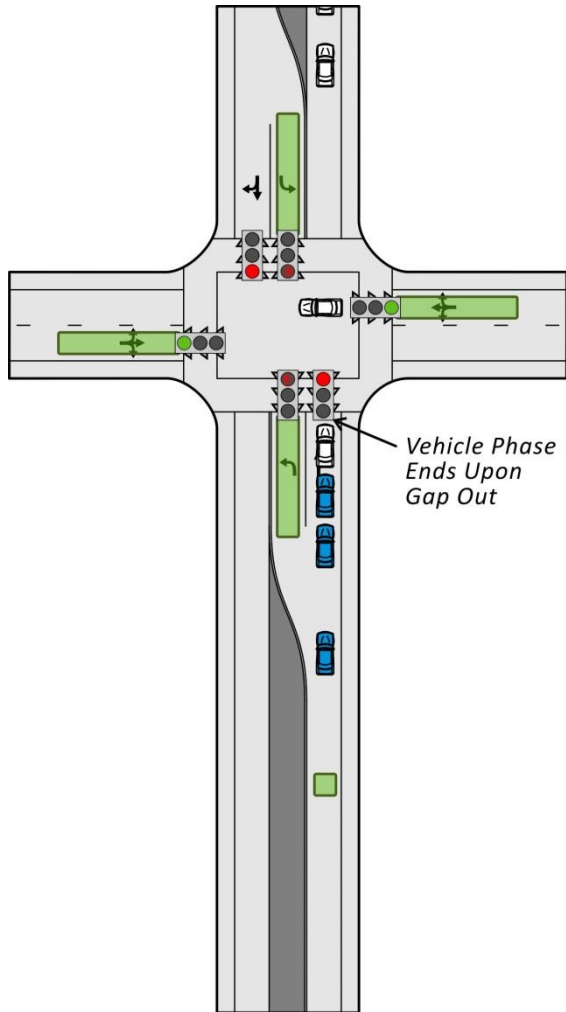
Таймеры настраиваются чаще всего по эмпирическим





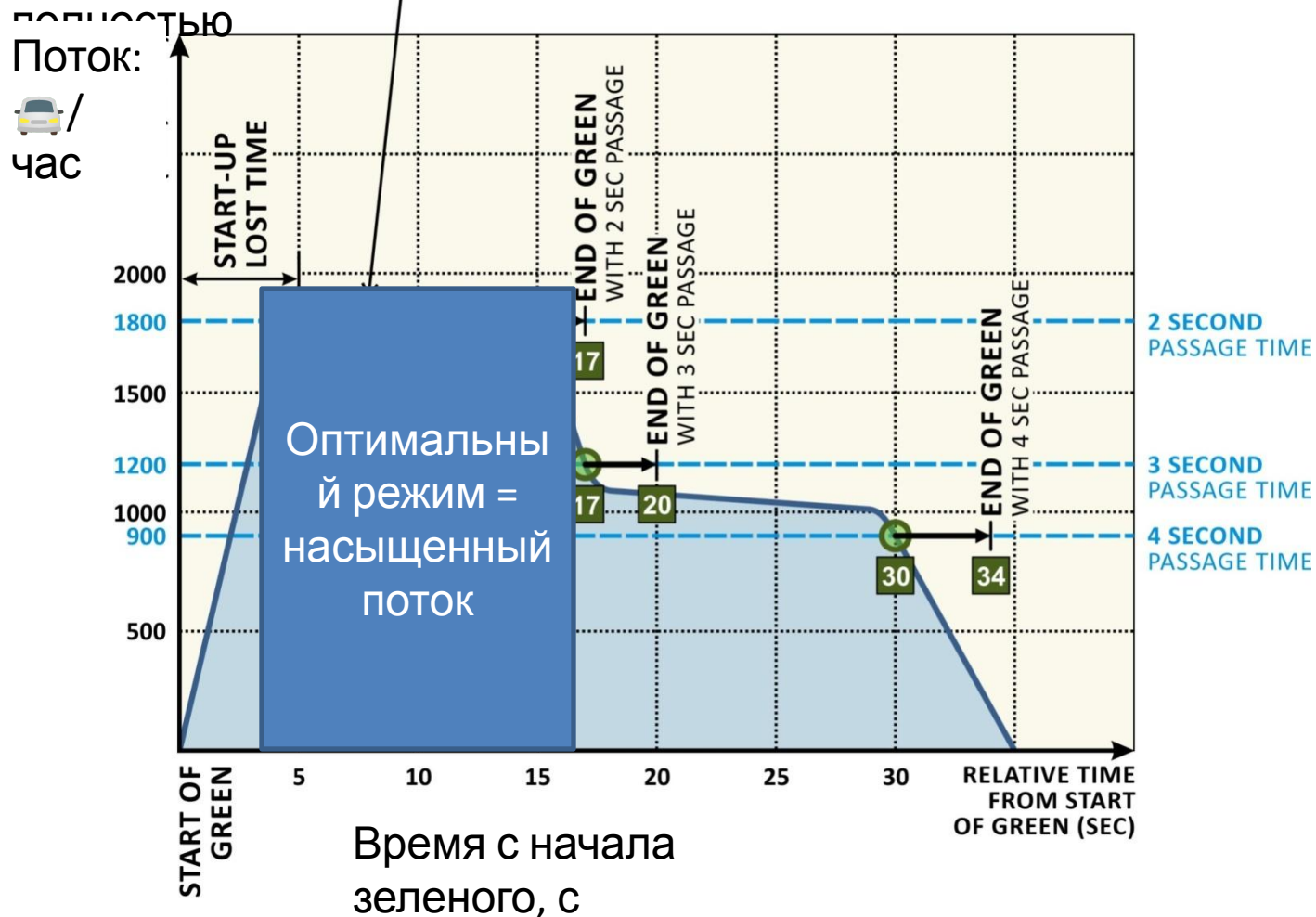






Поток через светофор на зеленый

Предельный (насыщенный) поток – когда вся очередь проезжает полностью



Теория элементарного перекрестка

Действуют стационарные ненасыщенные потоки, время желтого пренебрежимо мало.

Когда на одном направлении зеленый – в другом происходит накопление очереди машин:

$$n_1 = T_2 \cdot q_1, \quad n_2 = T_1 \cdot q_2$$

Максимальная пропускная способность – когда интенсивность потоков близка к насыщенным:

$$n_1/T_1 \rightarrow s_1, \quad n_2/T_2 \rightarrow s_2$$

Сумма времени зеленого в направлении 1 и 2 равна полному циклу светофора:

$$T_1 + T_2 = C$$

$$T_1 = \frac{y_1}{y_1 + y_2} \cdot C$$

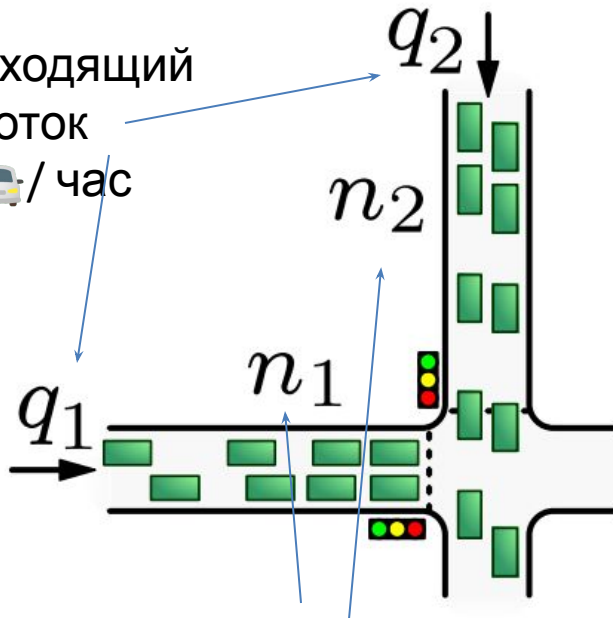
$$y_1 = \frac{q_1}{s_1}$$

$$T_2 = \frac{y_2}{y_1 + y_2} \cdot C$$

$$y_2 = \frac{q_2}{s_2}$$

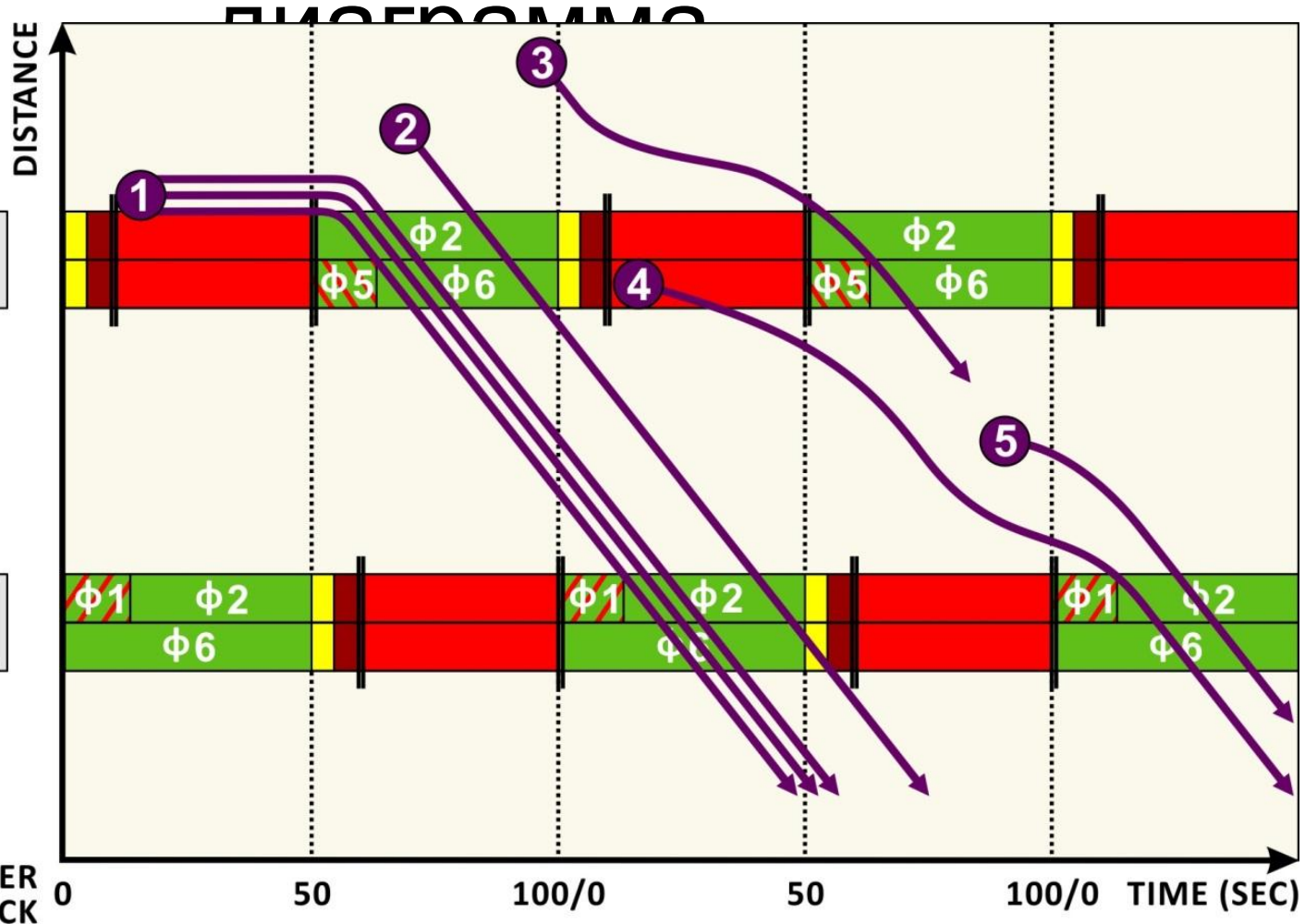
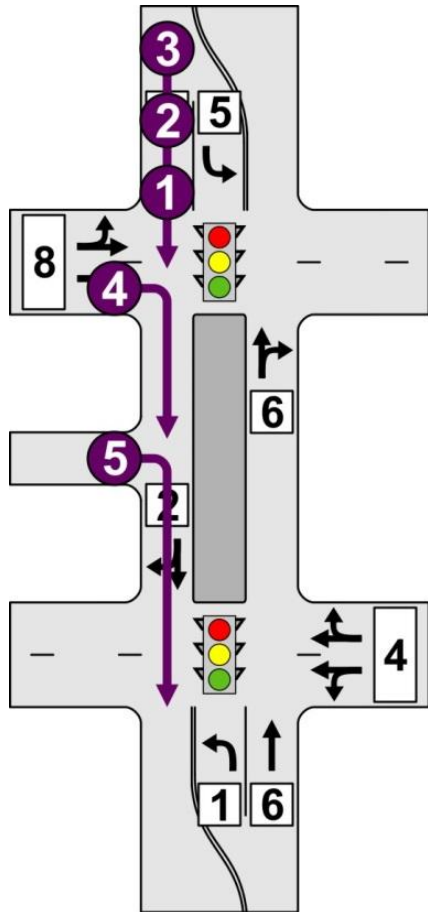
Уравнения Уебстера (Webster's theory)

где



Решение:

Координированный трафик и пространственно-временная диаграмма



MASTER
CLOCK

0

50

100/0

50

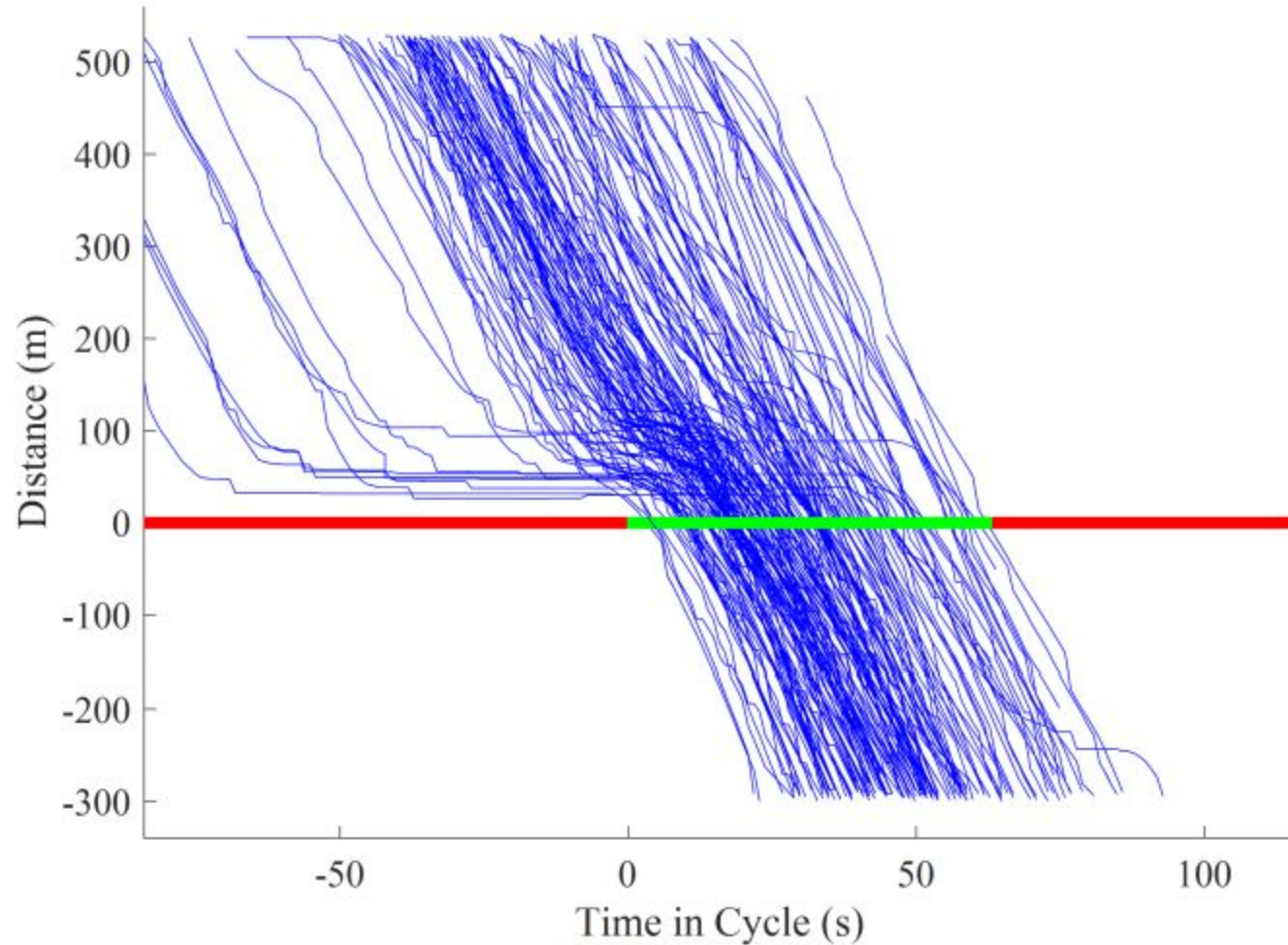
100/0

TIME (SEC)

В США: если расстояние между перекрестками меньше 0,5 мили (800 метров).

Условия зеленой волны: кратные продолжительности цикла и фазовый сдвиг между перекрестками

Трафик через скоординированный светофор



Оптимизация для общего случая

$$\min TT(\Psi, \mathbf{q}^*(\Psi)) = \sum_{l=1}^L q_l \cdot t_l(\Psi, \mathbf{q}^*(\Psi))$$

Полное
время
перемещения

Время перемещения
по участку системы
(из имитационной
модели)

$$\text{subject to : } C_{min,n} \leq C_n \leq C_{max,n}$$

$$0 \leq \theta_n \leq C_n - 1 \quad \forall n$$

$$\phi_{min,np} \leq \phi_{np} \leq \phi_{max,np} \quad \forall n, p$$

Поток по участку
системы

$$C_n = \sum_{p=1}^{P_n} (\phi_{np} + I_{np}) \quad \forall n$$

$n \in \{1, \dots, N\}$	Intersection indexes
$p \in \{1, \dots, P_n\}$	Indexes of phases at intersection n
Ψ	A set of signal timing settings
C_n	Cycle time for intersection n
θ_n	Offset of intersection n
ϕ_{np}	Phase p green time for intersection n
I_{np}	Interstage (lost) time from the end of phase p until the next

$l \in \{1, \dots, L\}$	Link indexes
$q_l \in \mathbf{q}^*(\Psi)$	User equilibrium link flows given signal timing parameters
$t_l(\Psi, \mathbf{q}^*(\Psi))$	Travel time on link l considering signal timings and user response

Управление в реальном времени

- На основе эвристических подходов (идентификация караванов и зеленых волн). Пример систем: *SCOOT*, *SCAT*
- На основе предсказывающей модели: model predictive control (MPC). Примеры систем: *RHODES*, *TUC*
 - модель может быть очень простой, например линейная модель с промежуточным хранением (store and forward model)

$$x(k+1) = x(k) + \bar{B}g(k)$$

- начальное состояние модели x каждый раз инициализируется собранными данными трафика (количество автомобилей в сегменте дороги)
- минимизируется функционал J на определенное число шагов вперед

$$J = \sum_{k=1}^{\infty} (x^T(k)Qx(k) + g^T(k)Rg(k))$$

- Без модели: экстремальное управление, метод *SPSA*

$$u_{n+1} = u_n - a_n \hat{g}_n(u_n) \quad (\hat{g}_n(u_n))_i = \frac{J(u_n + c_n \Delta_n) - J(u_n - c_n \Delta_n)}{2c_n (\Delta_n)_i}$$

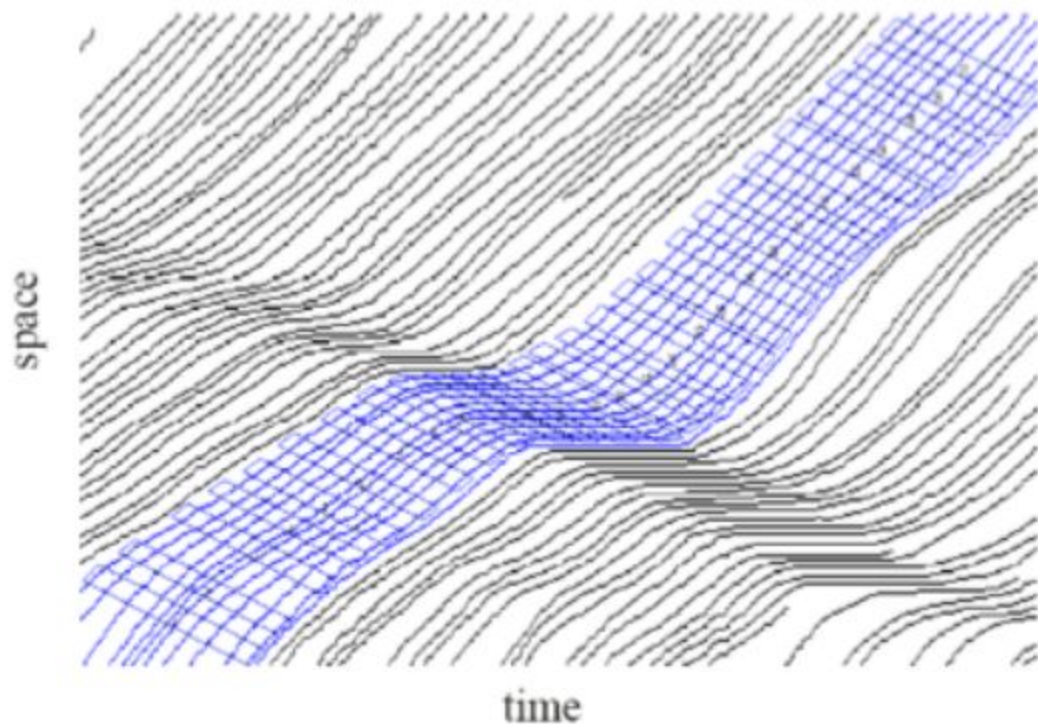
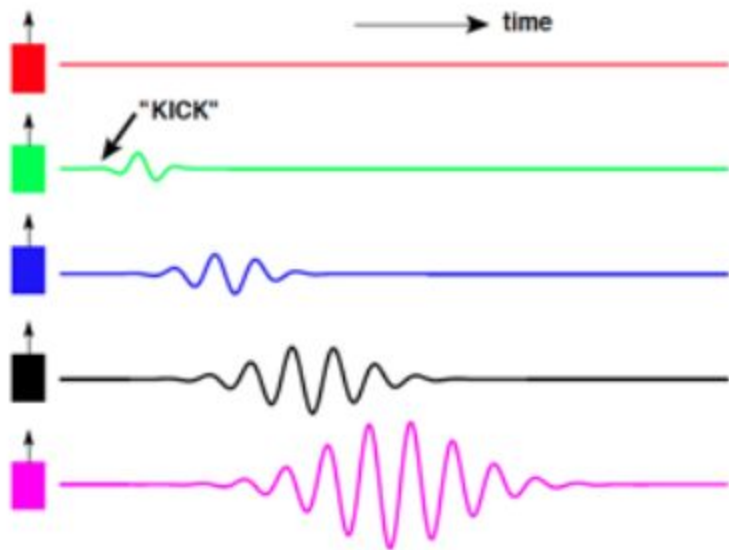
Неустойчивость трафика: элементарная модель



$$\frac{d}{dt}v(t + T_r) = k \cdot \Delta v(t)$$

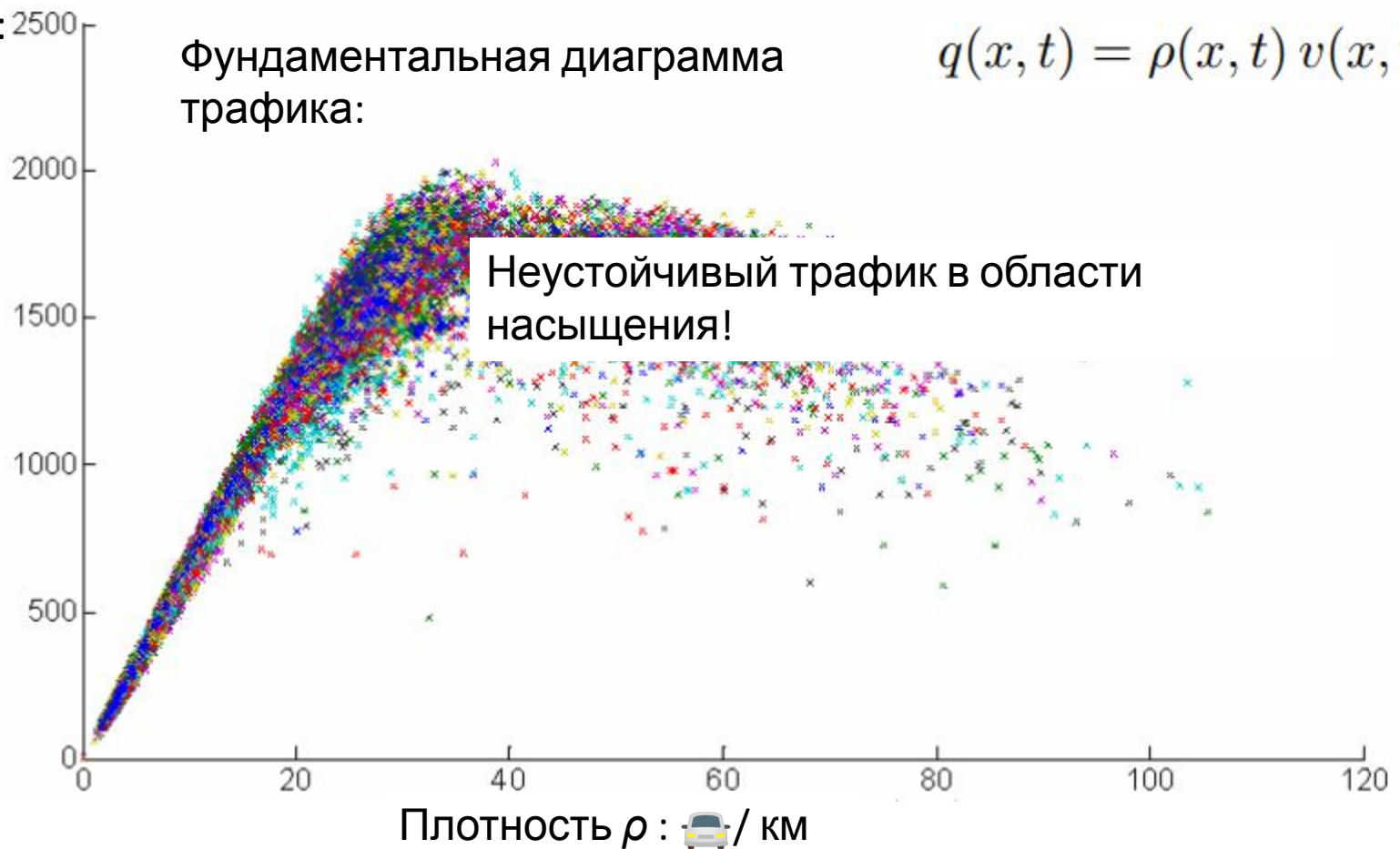
время реакции
водителя

коэффициент

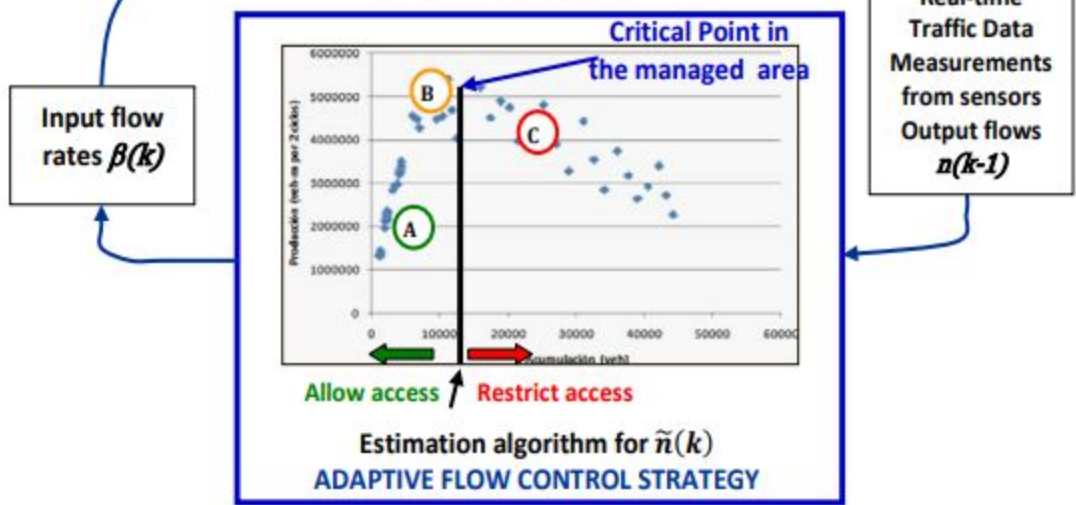
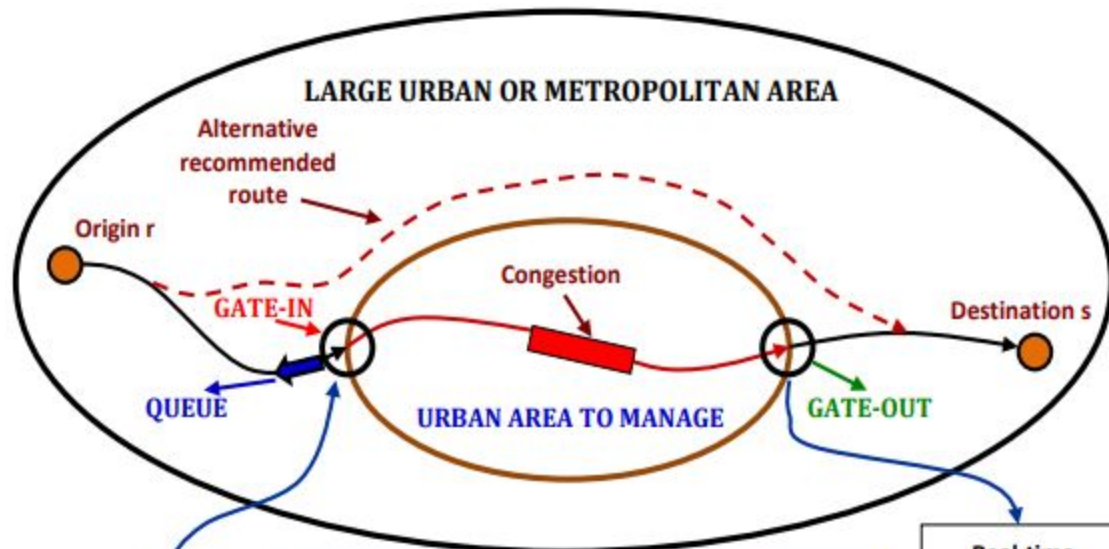


Неустойчивость трафика: от плотного движения к пробке

Поток q : 🚗 / час



Огораживание проблемного трафика

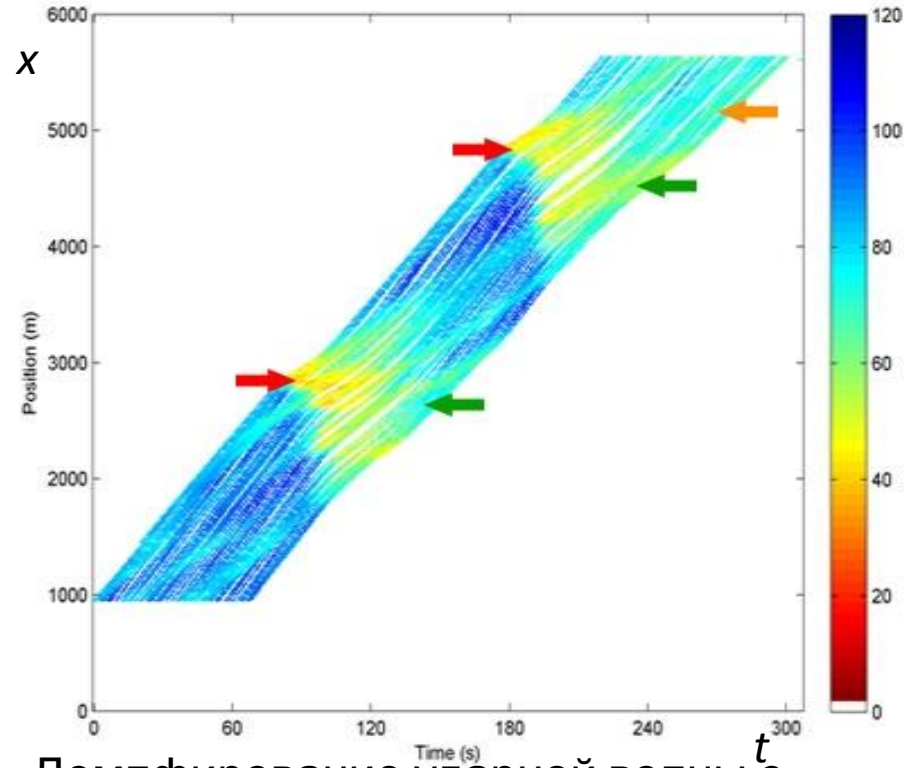
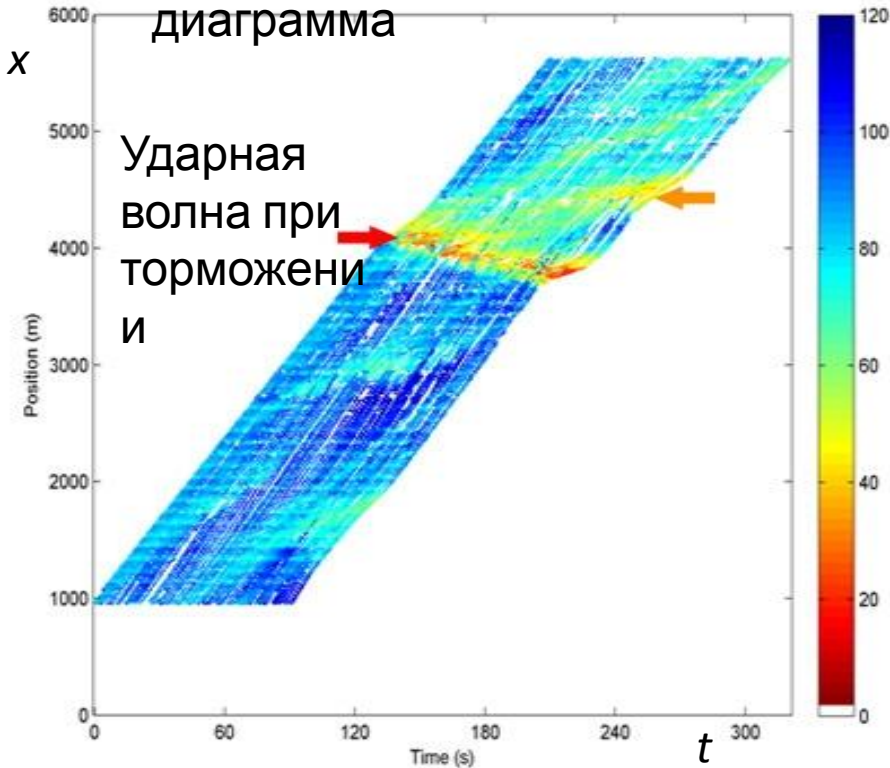


Гидродинамика трафика

Уравнение непрерывности трафика:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho(x, t) + \frac{\partial}{\partial x} q(x, t) = 0$$

Решение уравнения непрерывности = пространственно-временная диаграмма



Демпфирование ударной волны с помощью раннего предупреждения и сброса скорости

АВТОПИЛОТ

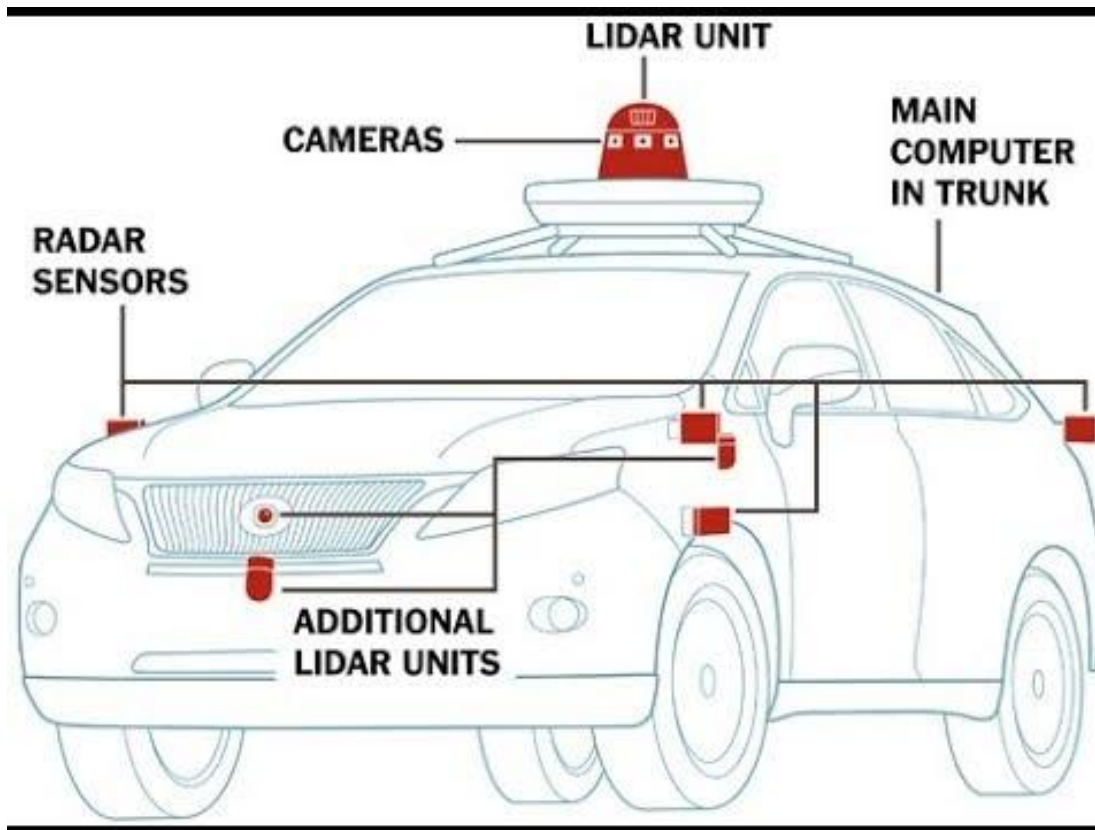
- Повышение безопасности
- Достижение более точного движения
- Автоматизация вождения

Уровни автономного управления

Уровень 0	Уровень 1	Уровень 2	Уровень 3	Уровень 4	Уровень 5
					
Водитель полностью управляет автомобилем	Водитель постоянно управляет дистанцией <u>или</u> рулением	Водитель всегда следит за автомобилем	Водитель может иногда не следить за автомобилем	Водитель не требуется для большинства рутинных ситуаций	Водитель не требуется
	Автомобиль управляет скоростью <u>или</u> рулением (стандартный круиз-контроль)	Автомобиль управляет скоростью <u>и</u> рулением в определенных случаях (адаптивный круиз-контроль)	Система сама управляет скоростью <u>и</u> рулением. Может безопасно передать управление водителю.	Система в полностью управляет автомобилем в соответствии с текущим трафиком и ПДД	Система полностью управляет автомобилем для заданных маршрутов

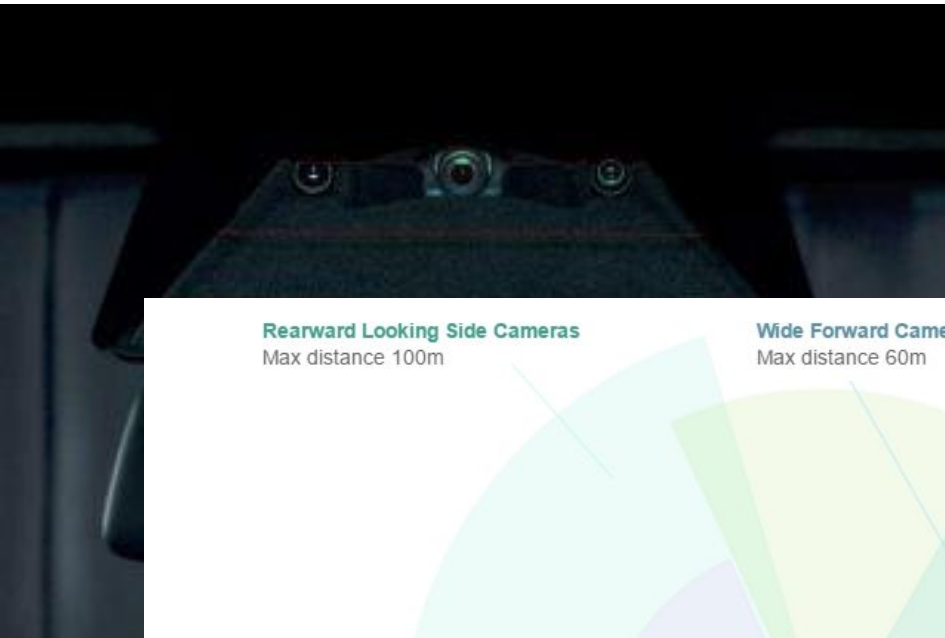
Вы сейчас
здесь

Автомобиль с автопилотом: сенсоры



- Камеры
- Лидар
- Радары

Сенсоры: камера



Rearward Looking Side Cameras

Max distance 100m

Wide Forward Camera

Max distance 60m

Main Forward Camera

Max distance 150m

Narrow Forward Camera

Max distance 250m

Rear View Camera

Max distance 50m

Ultrasonics

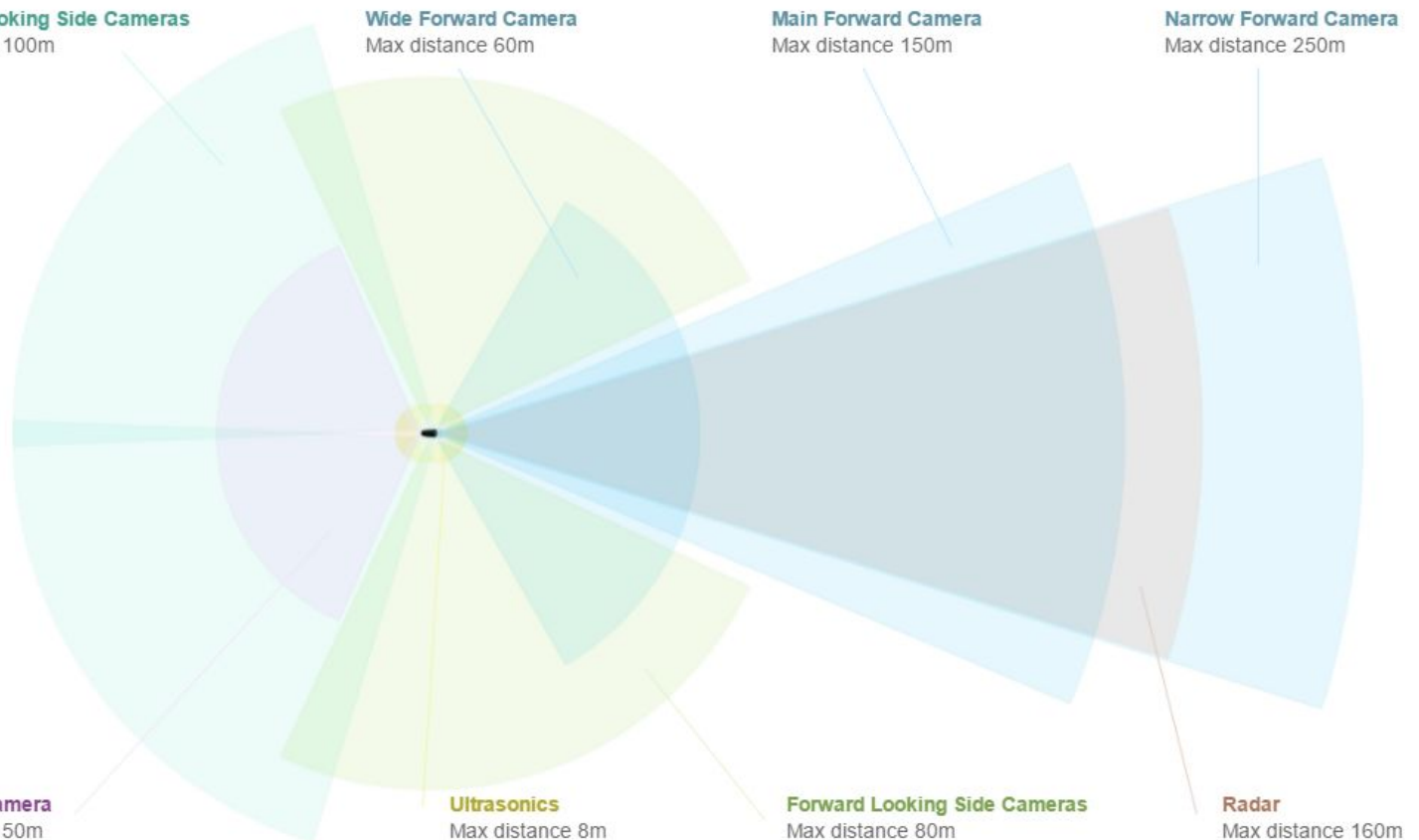
Max distance 8m

Forward Looking Side Cameras

Max distance 80m

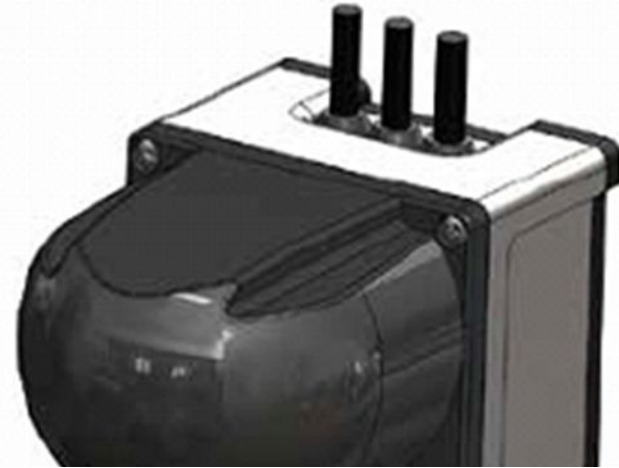
Radar

Max distance 160m

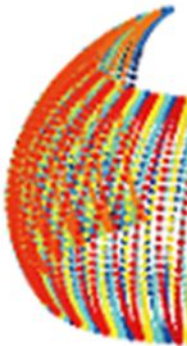


Сенсоры: лидар

Режим со сплошной разверткой



Режим с 4-мя перекрывающимися областями

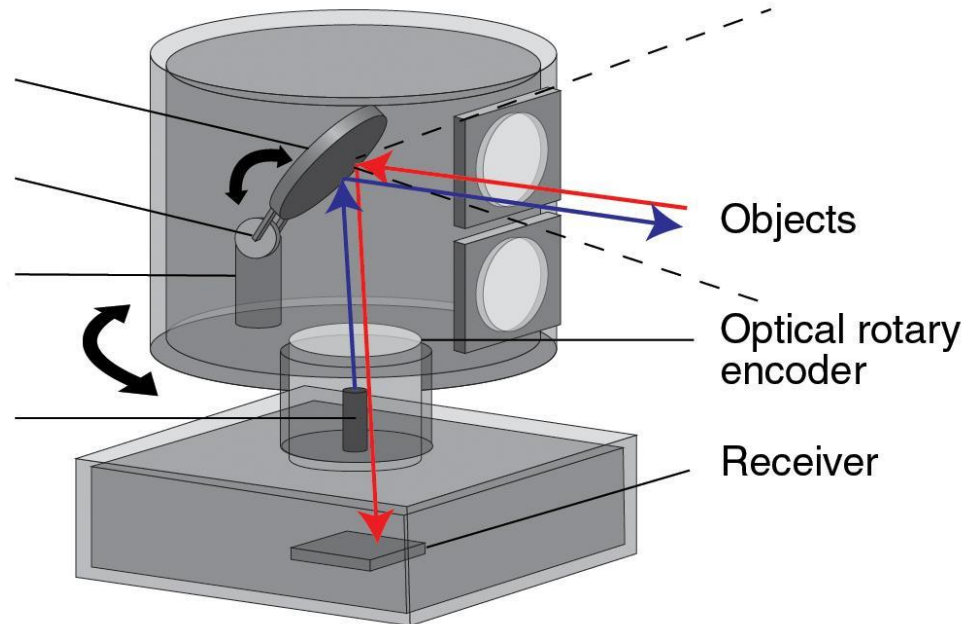


Tilting mirror

Optical rotary encoder

Servo motor

Laser source

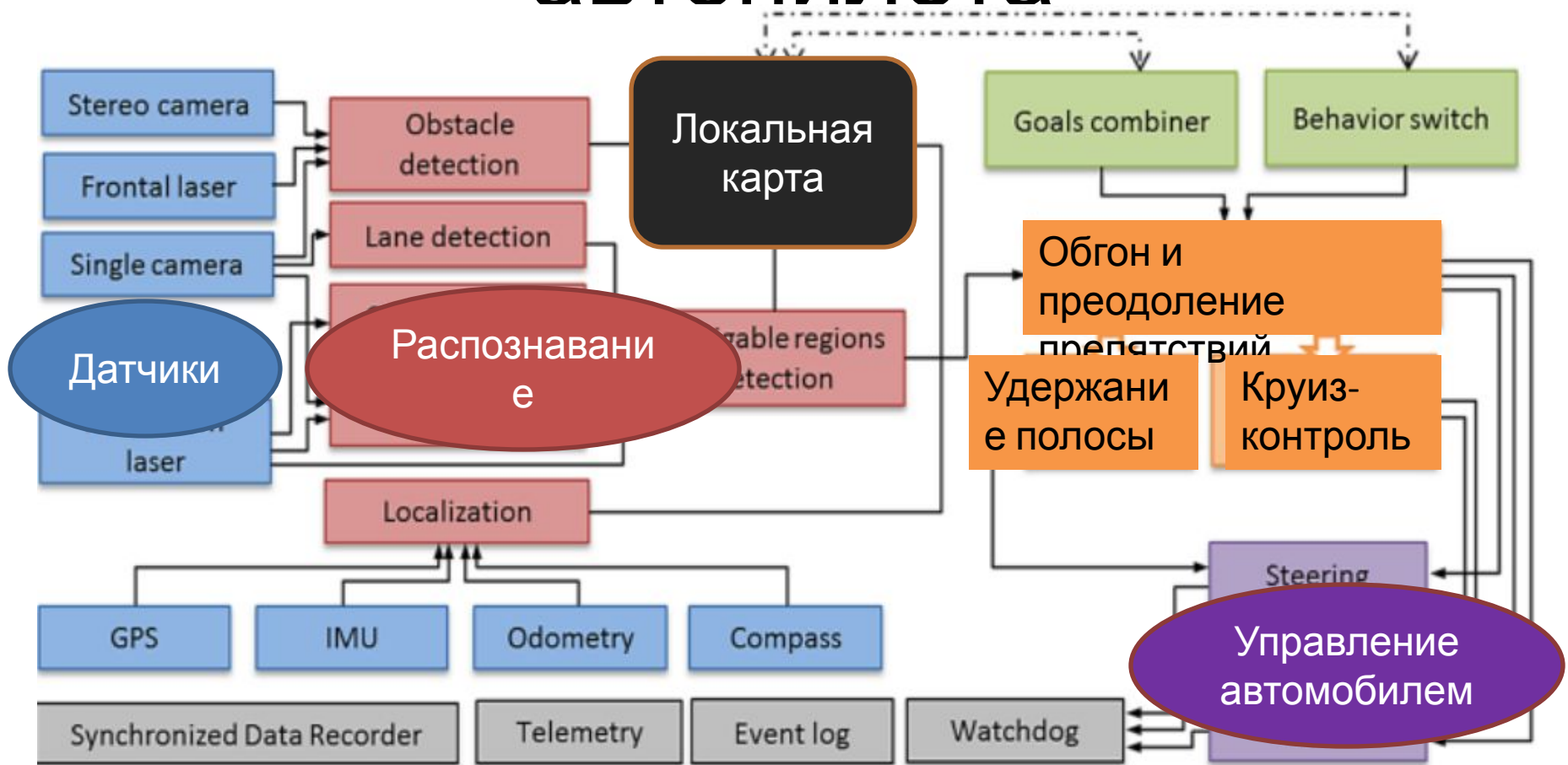


Objects

Optical rotary encoder

Receiver

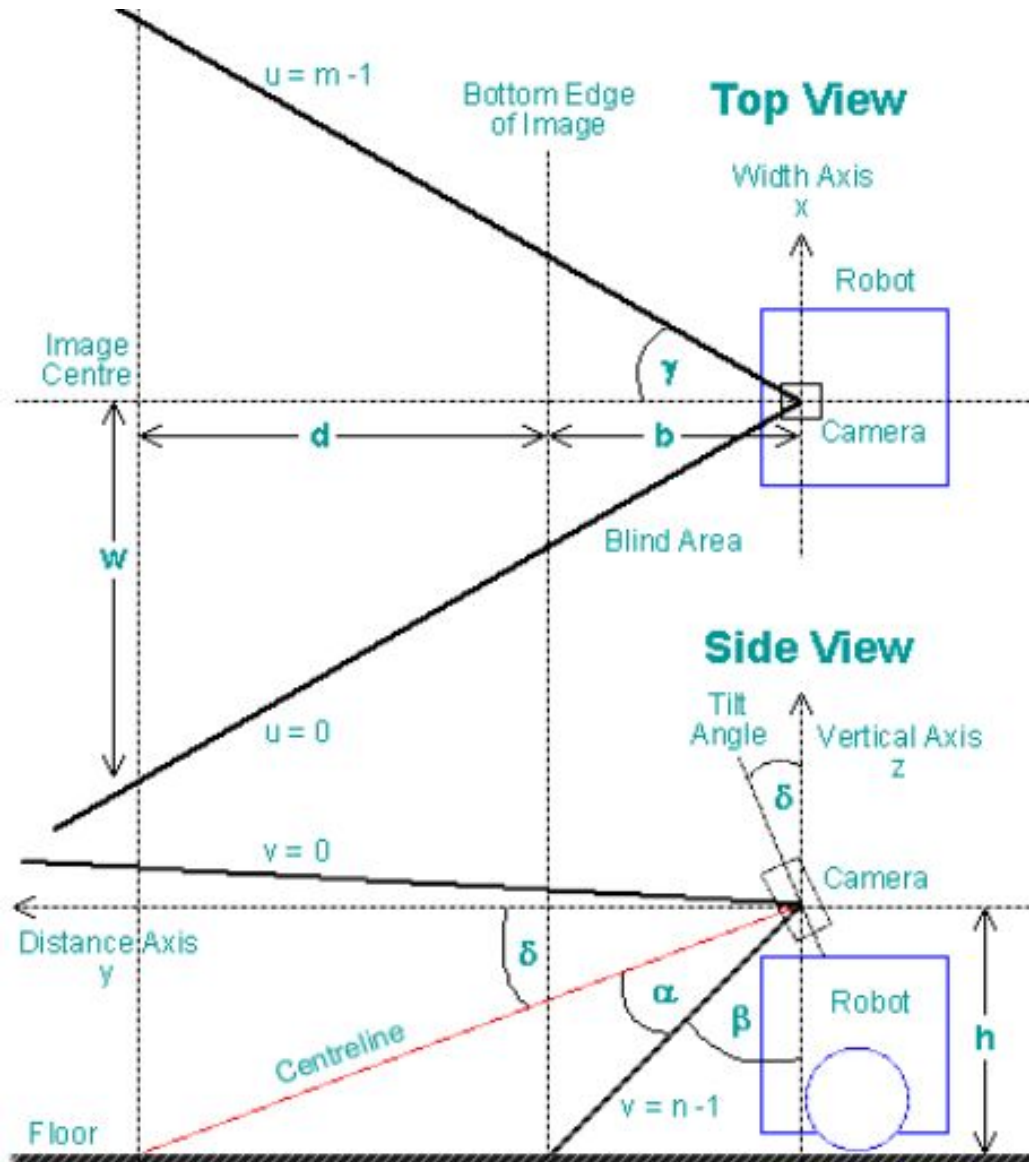
Архитектура системы автопилота



Распознавание объектов

- Имеет ли это изображение предмет X?
 - Один из методов Aggregated Channel Features (ACF) detector: детектор агрегированных канальных признаков
- Каково расстояние до X?
 - После калибровки камеры – тривиальная тригонометрия

Расстояние по камере



$$\alpha + \beta + \delta = \pi/2$$

$$\tan \beta = b/h$$

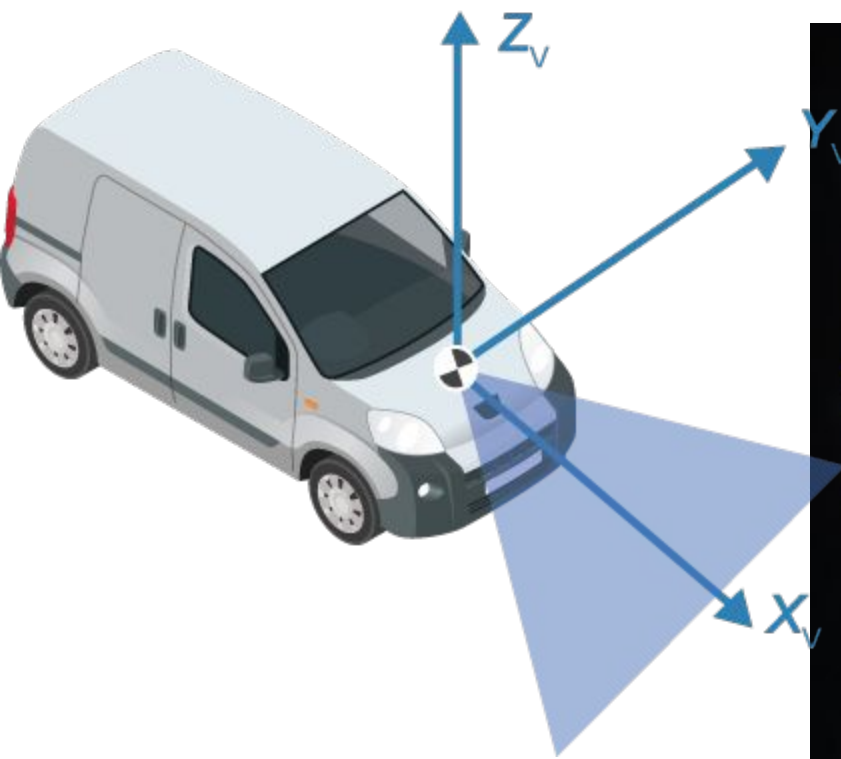
$$\tan(\alpha + \beta) = (b + d)/h$$

$$\tan \gamma = w/(b + d)$$

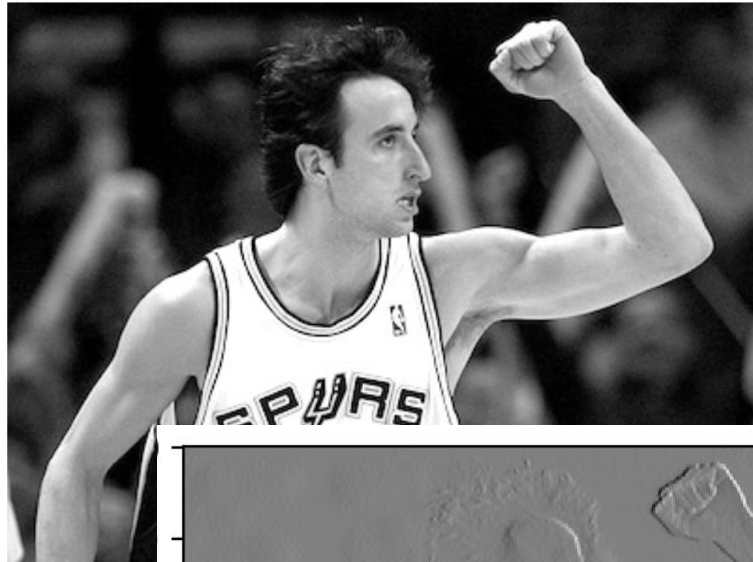
$$y = h \cdot \tan \left(\beta + 2\alpha \frac{n - 1 - v}{n - 1} \right)$$

$$x = y \cdot \tan \left(\gamma \frac{2u - m + 1}{m - 1} \right)$$

Система координат по камере



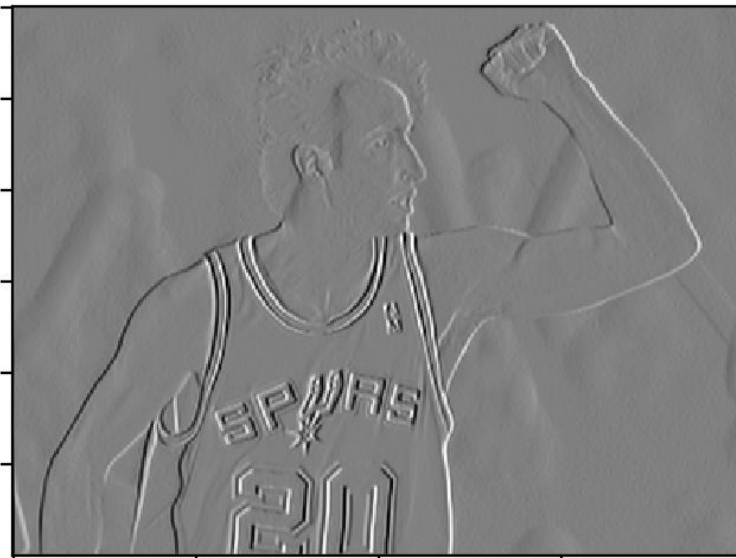
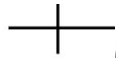
ACF detector: градиент



$$\nabla f = \begin{bmatrix} g_x \\ \frac{\partial f}{\partial x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(x+1, y) - f(x-1, y) \\ f(x, y+1) - f(x, y-1) \end{bmatrix}$$

$$\nabla f = \begin{bmatrix} f(x+1, y) - f(x-1, y) \\ f(x, y+1) - f(x, y-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 55 - 105 \\ 90 - 40 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -50 \\ 50 \end{bmatrix}$$

$$g = \sqrt{g_x^2 + g_y^2} \quad \theta = \arctan(g_y/g_x)$$

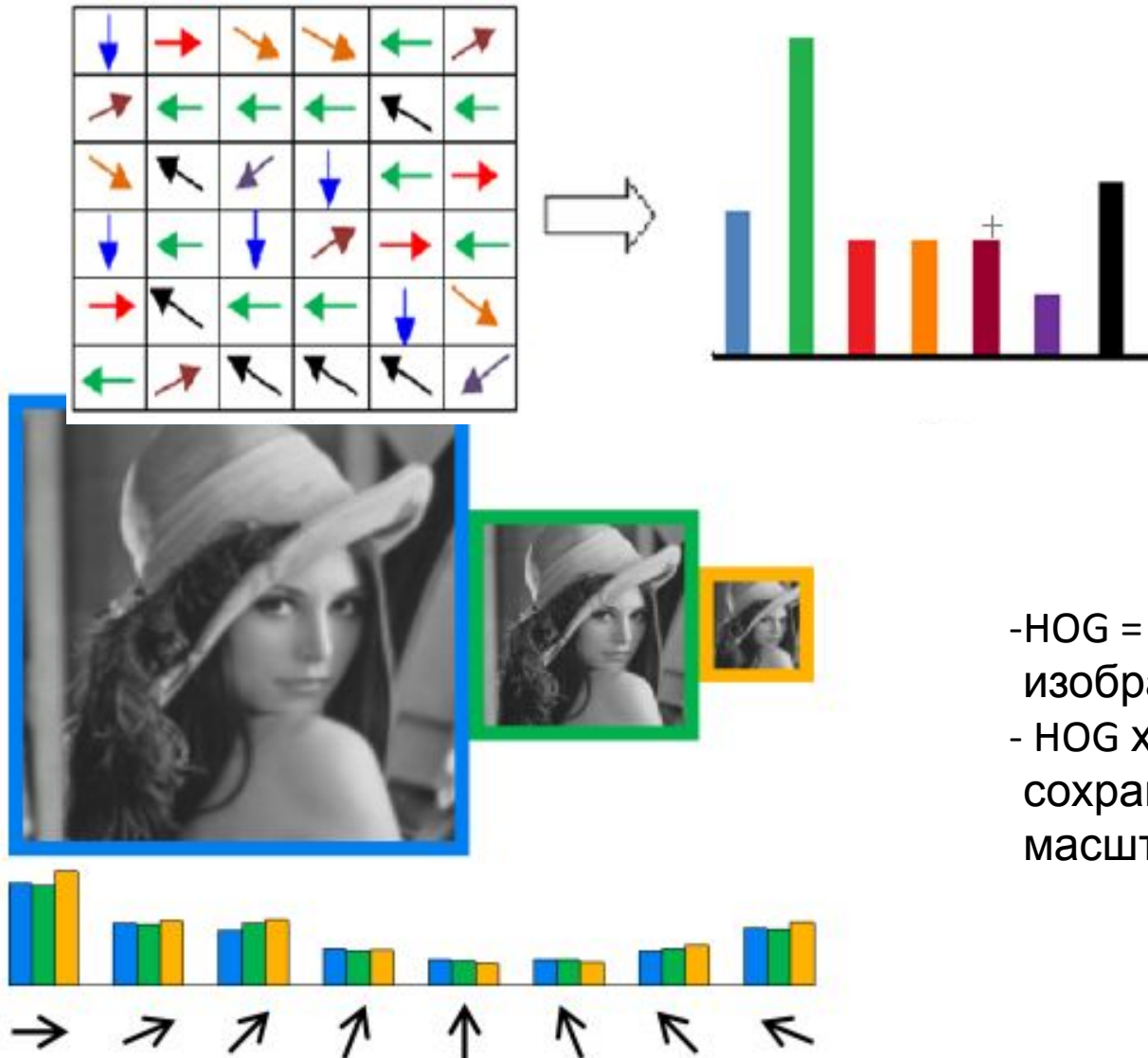


0 100 200 300
Gx



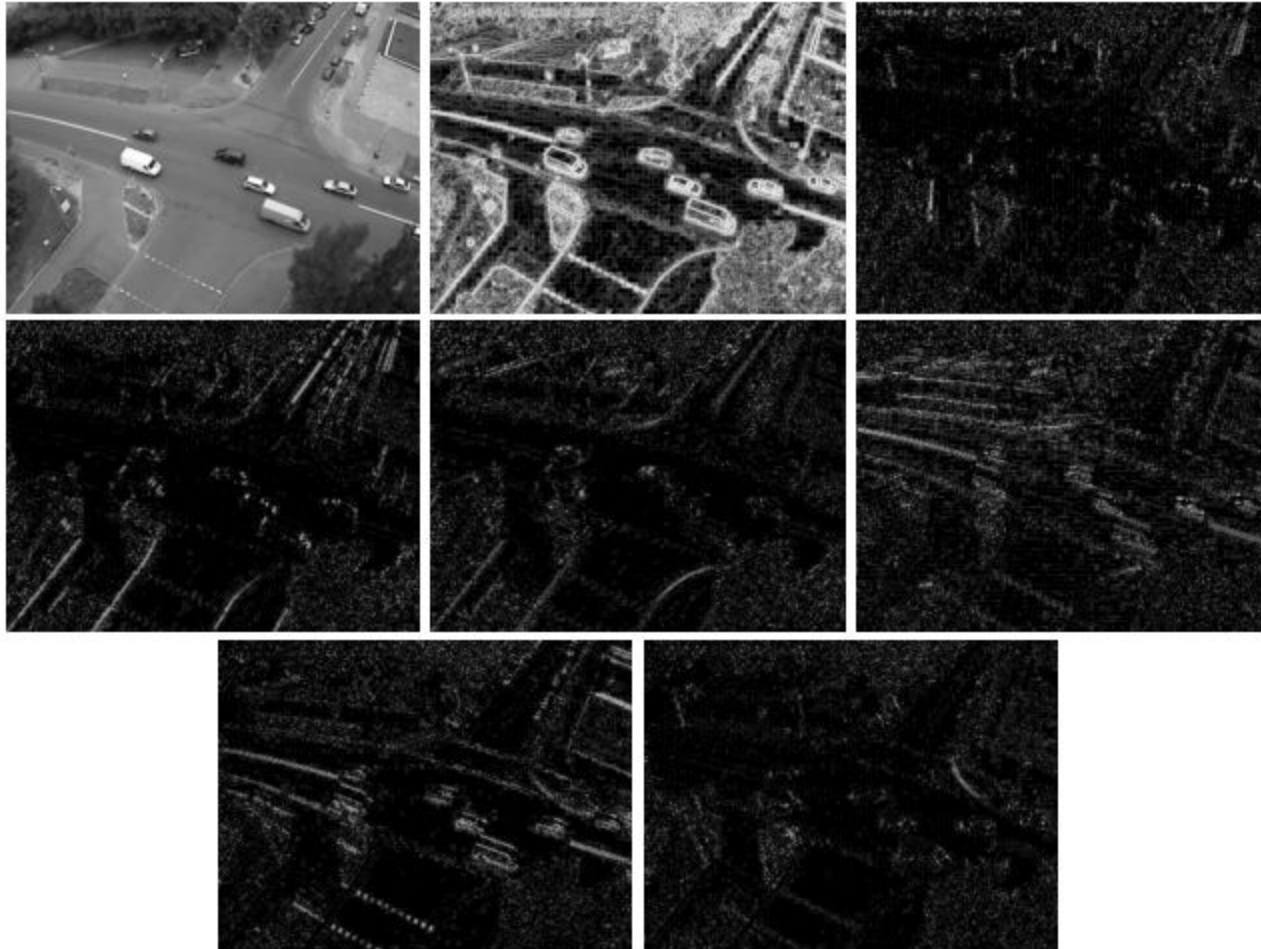
0 50 100 150 200 250
Gy

ACF detector: гистограмма направленных градиентов (HOG)



- HOG = дескриптор изображения
- HOG хорошо сохраняется при масштабировании

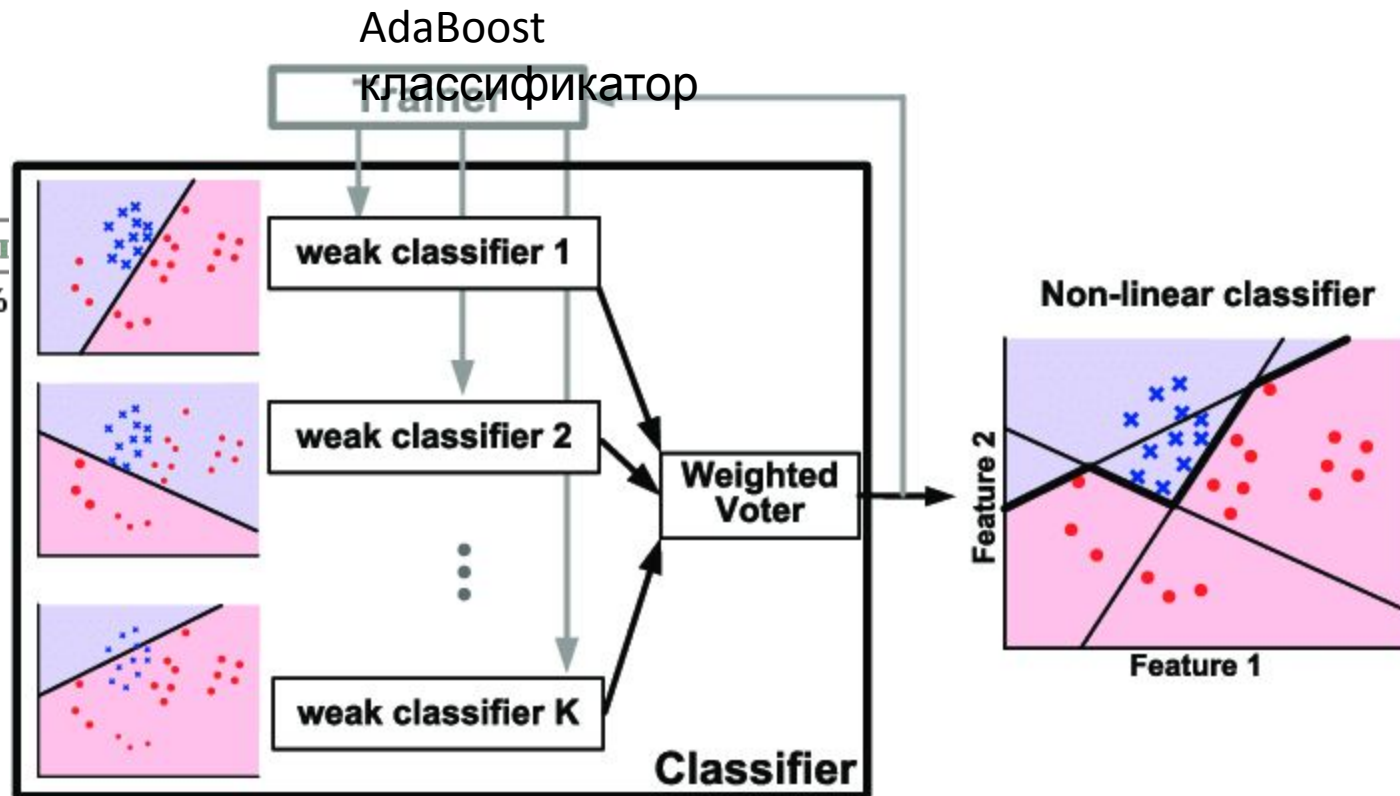
Каналы данных детектора АСФ:



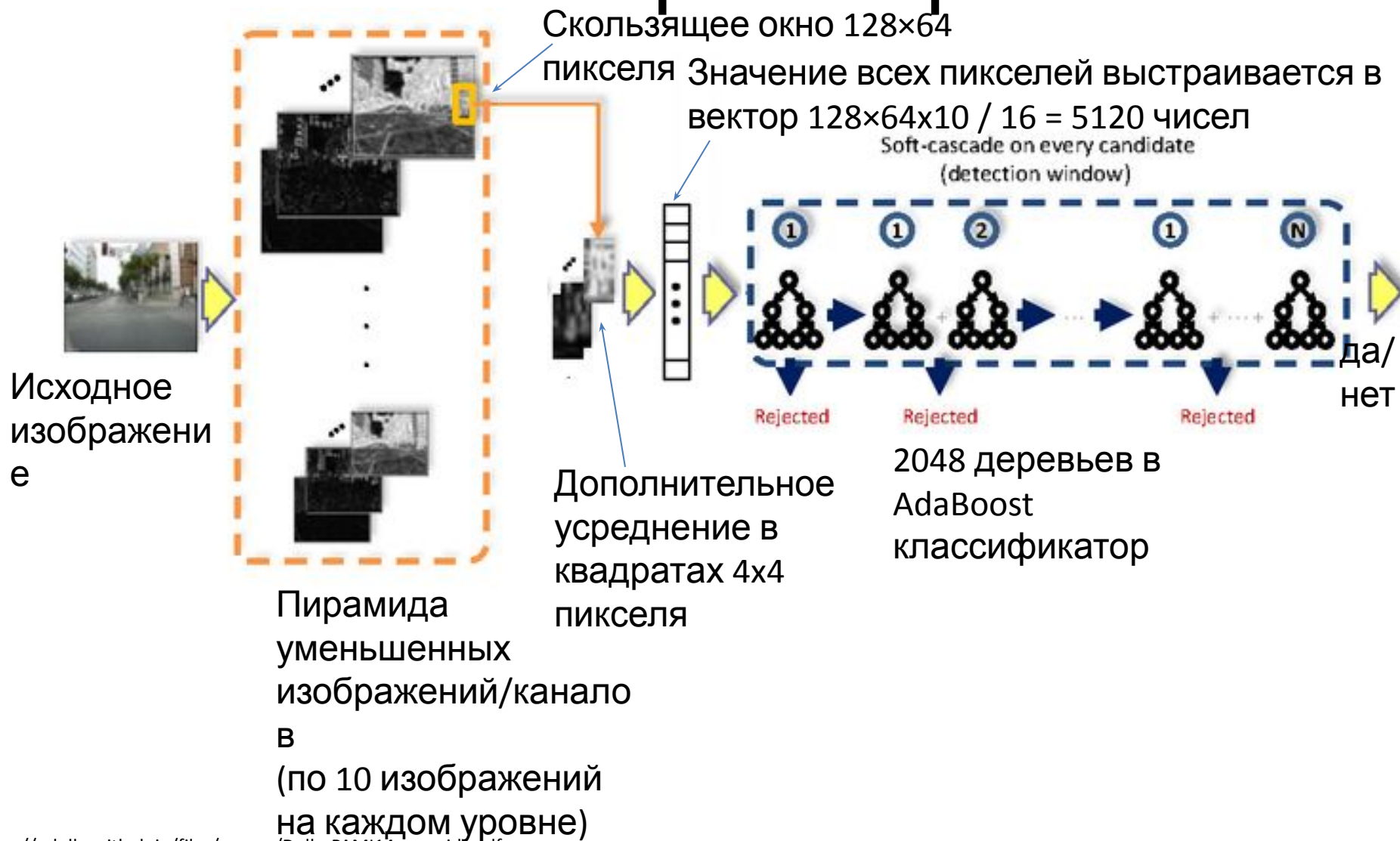
- grayscale изображение,
- амплитуда (длина вектора) градиента
- гистограммы ориентированных градиентов, отобранные в 6

направлениях

АСФ детектор: концепция дерева решений и каскада классификаторов



ACF: структура классификатора

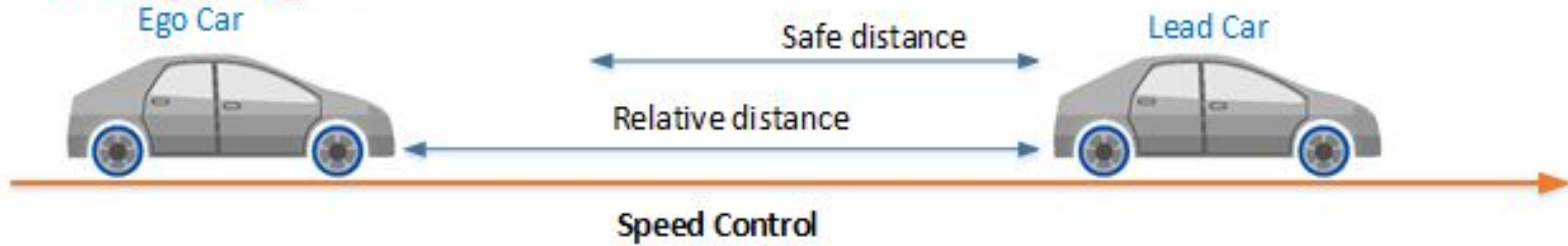


ACF детектор (MATLAB Automated Driving System Toolbox)

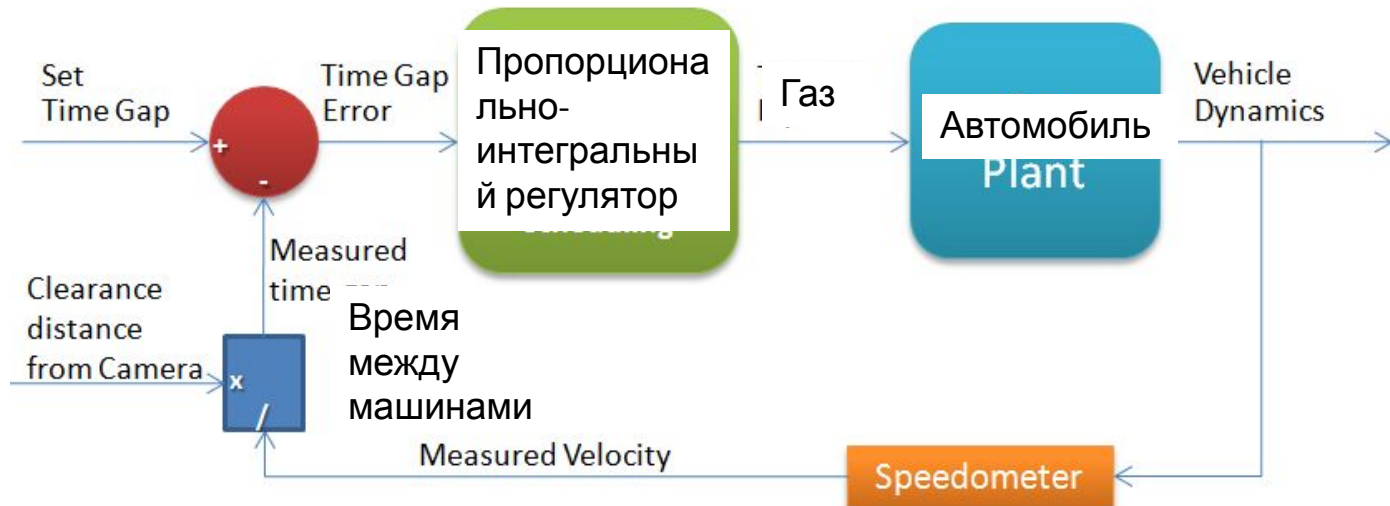


Адаптивный КРУИЗ-КОНТРОЛЬ

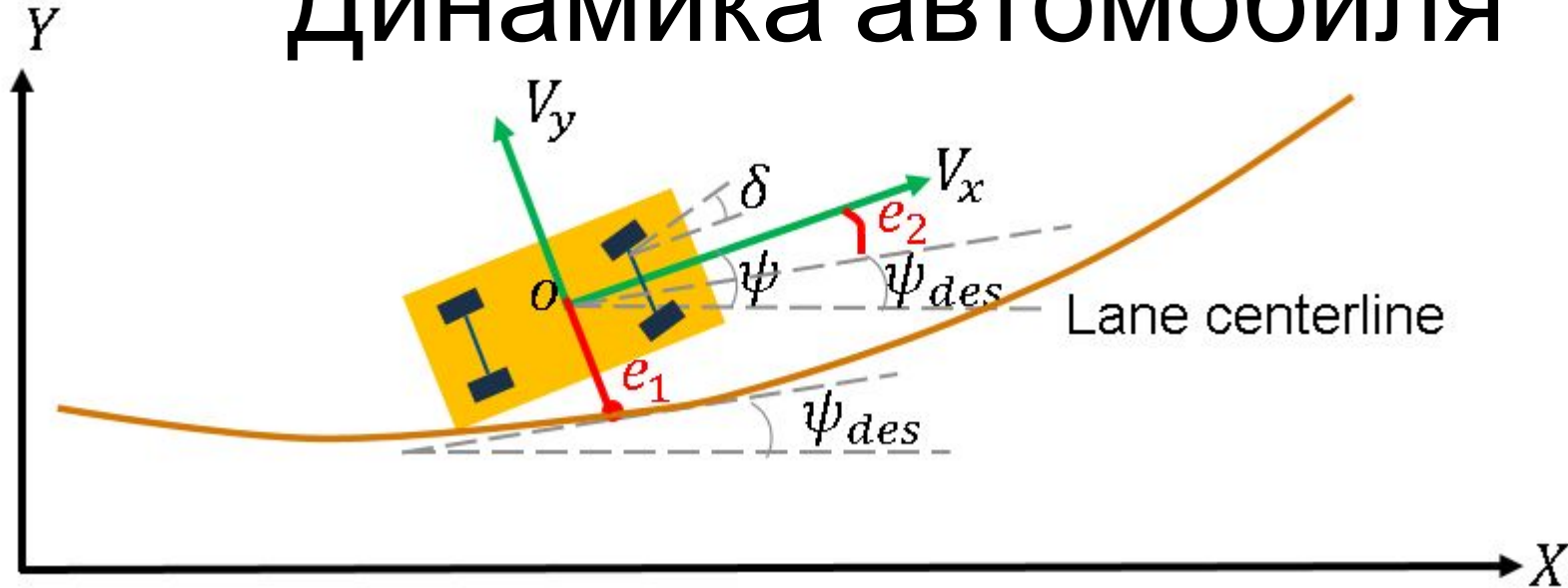
Goal: $V_{ego} = V_{set}$



Goal: $D_{rel} = D_{safe}$



Динамика автомобиля



Тип модели: “двухколесный робот”, аффинная нелинейная

система:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_y \\ \psi \\ \dot{\psi} \\ V_x \\ \dot{V}_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{2C_f+2C_r}{mV_x} & 0 & -V_x - \frac{2C_f l_f - 2C_r l_r}{mV_x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{2C_f l_f - 2C_r l_r}{I_z V_x} & 0 & -\frac{2C_f l_f^2 + 2C_r l_r^2}{I_z V_x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\tau} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_y \\ \psi \\ \dot{\psi} \\ V_x \\ \dot{V}_x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{2C_f}{m} \\ 0 \\ \frac{2C_f l_f}{I_z} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{\tau} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ V_y \dot{\psi} \\ 0 \end{bmatrix}$$

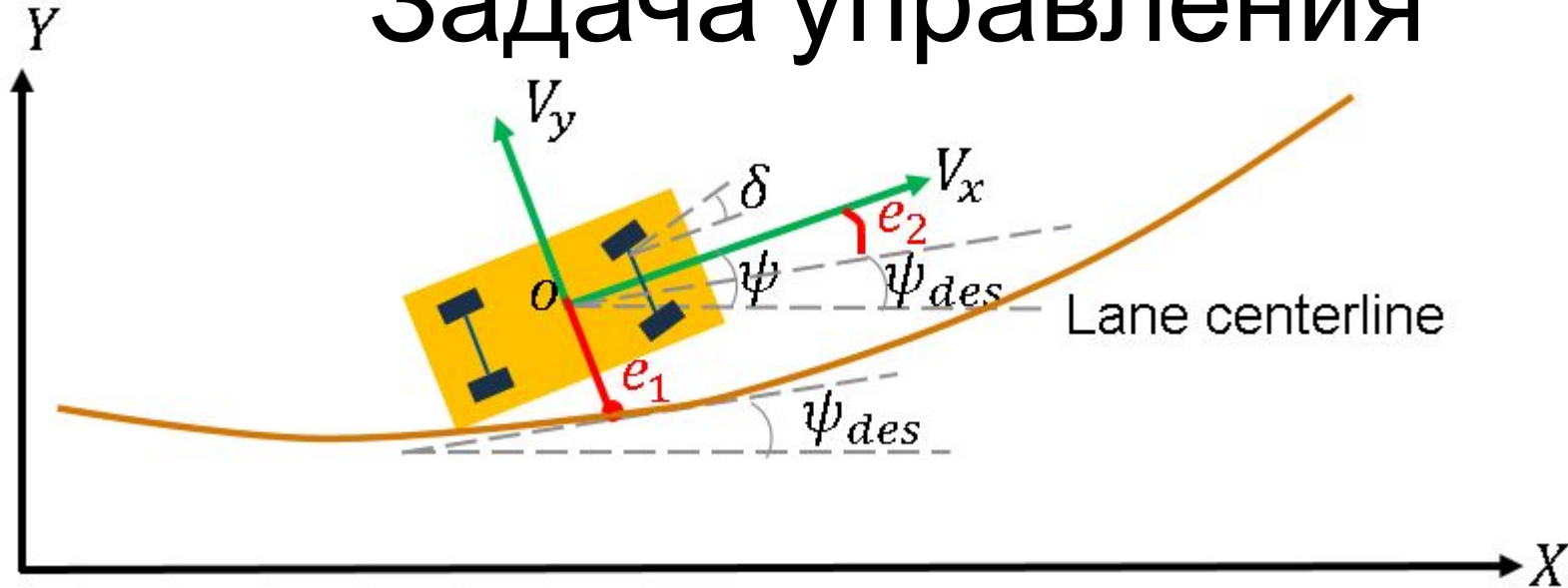
руление ускорение

Преобразование координат

$$\dot{X} = V_x \cos(\psi) - V_y \sin(\psi), \quad \dot{Y} = V_x \sin(\psi) + V_y \cos(\psi)$$

Вектор состояний: скорости и ускорения (в подвижной системе координат) + ориентация

Задача управления



$$(V_x - V_x^{ref})^2 \rightarrow \min$$

поддержание постоянной скорости

$$x_{front} \geq x^{ref}$$

координата машины впереди на безопасном расстоянии

$$u_{min} \geq u \geq u_{max}$$

ускорение в заданных пределах

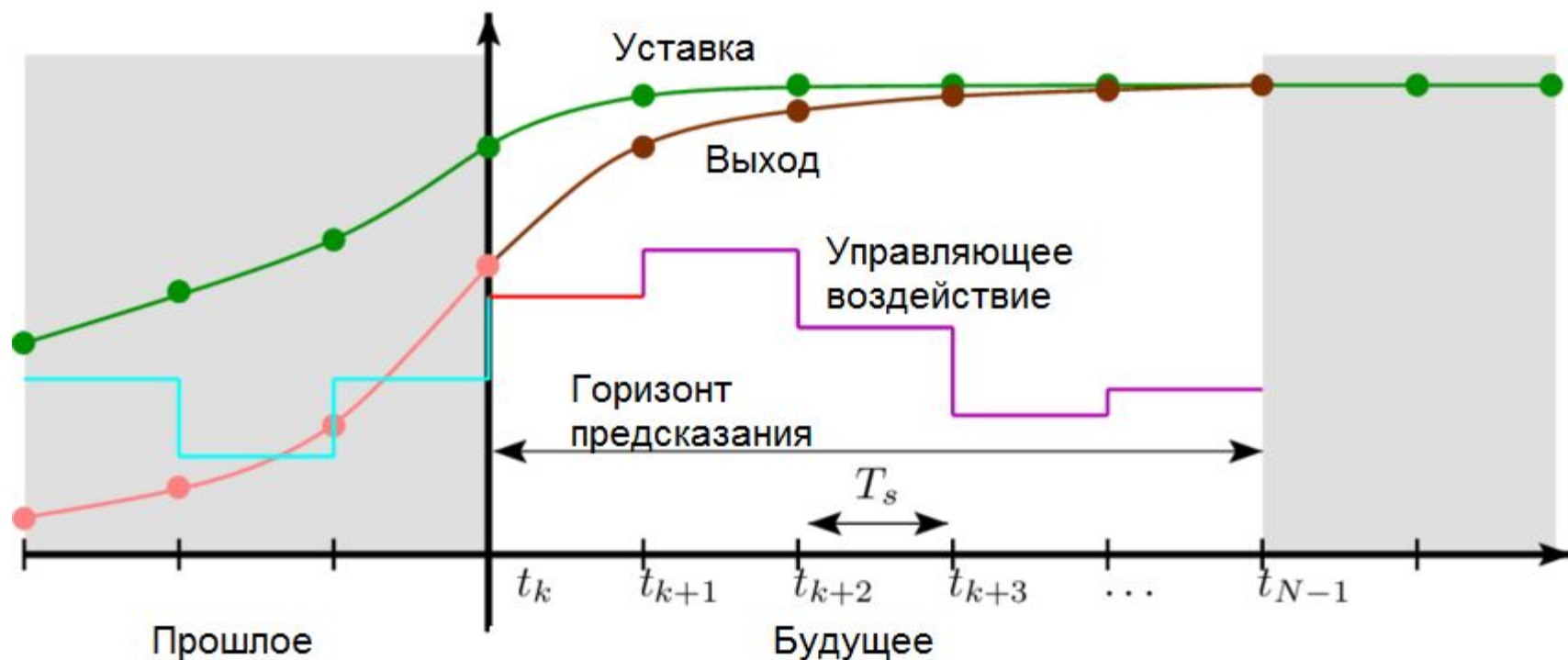
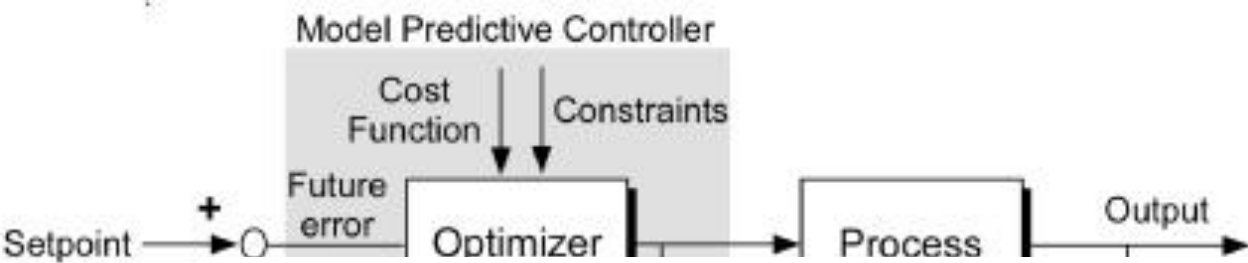
$$\dot{e}_1 = V_x e_2 + V_y \rightarrow 0$$

езда по центру

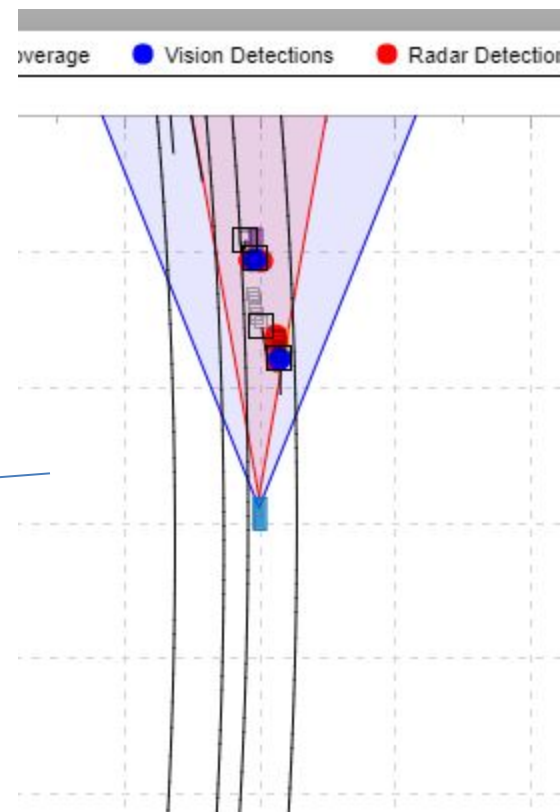
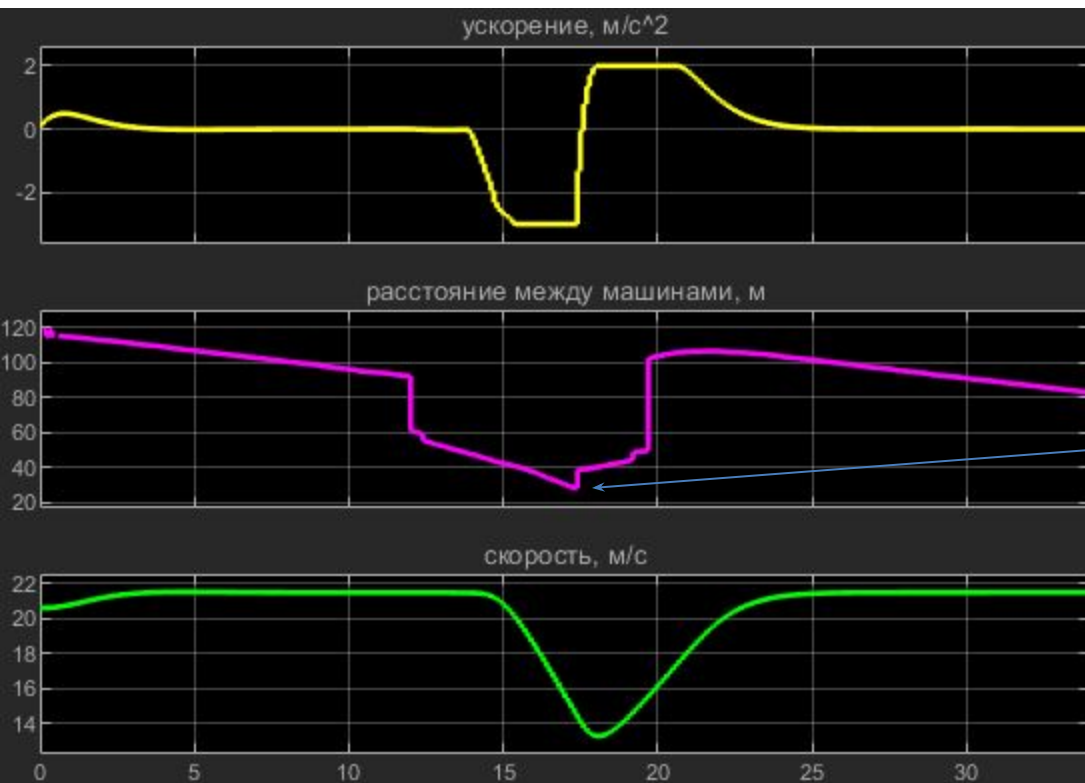
$$e_2 = \psi - \psi^{ref} \rightarrow 0$$

полосы

Управление на основе предсказывающей модели: model predictive control (MPC)



Демонстрация в Simulink



Спасибо за внимание!

- FaceBook/LinkedIn: Alex Borisevich
- alex.borysevych@gmail.com