

VII МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОМАНДНО-ЛИЧНЫЙ
ТУРНИР ШКОЛЬНИКОВ ПО
МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ

Решение MaMoHT-2024

Ключевые слова:

Минимизация расхода топлива; Динамика
движения транспортных средств в потоке;
Эволюционный поиск; Оптимизация движения в
условиях “старт-стоп” трафика;

2024 – 10 – 30

Contents

1 Введение	3
1.1 Предположения и допущения	3
2 Общее описание модели к первой задаче	4
2.1 Методика описания модели	4
2.2 Определение оптимальной стратегии	4
2.3 Характеристики автомобилей	5
2.4 Влияние скорости и ускорения на расход топлива	5
3 Общее описание модели ко второй задаче	9
3.1 Идея решения и используемые методы	9
3.2 Вероятность	9
3.3 Симуляция	10
3.4 Выводы	11
4 Общее описание модели к третьей задаче	12
4.1 Идея решения	12
4.2 Пример	12
5 Общее описание модели к четвертой задаче	13
5.1 “Каждый сам за себя”	13
5.2 “Один за всех и все за одного”	13
6 Улучшение функционала светофоров	14
6.1 Наша альтернатива	14
6.2 Преимущества системы	14
7 Использование искусственного интеллекта (ИИ)	15
Библиография	16

1 | Введение

В условиях плотного городского движения, когда автомобили вынуждены часто останавливаться на светофорах, возобновление движения после полной остановки оказывает значительное влияние на расход топлива и износ тормозной системы. Одним из перспективных подходов к решению этой проблемы является стратегия «старта с движения» («rolling start»). Эта методика заключается в поддержании минимальной скорости движения вместо полной остановки при приближении к красному сигналу светофора, что позволяет снизить расход топлива и уменьшить износ тормозных колодок. Основная идея стратегии «старта с движения» — избежать полной остановки автомобиля, предугадывая смену сигнала светофора и замедляя автомобиль заранее. Это позволяет автомобилю сохранить инерцию, избегая интенсивных разгонов, которые требуют дополнительных затрат топлива. Исследования показывают, что плавные изменения скорости и минимизация остановок особенно эффективны для экономии топлива, особенно в условиях «старт-стоп» движения, характерного для городских маршрутов.

В сочетании с прогнозированием дорожной ситуации и учетом расстояния до впереди идущих автомобилей, стратегия «старта с движения» может стать эффективным методом повышения общей экологичности и экономичности городского транспорта.

В данной статье мы исследовали применение стратегии «старта с движения» в городских условиях, рассмотрев различные ситуации при различных параметрах - от достаточно примитивных, до более подробных, и разработали правила управления автомобилем для каждого из случаев, позволяющие минимизировать расход топлива и тормозных ресурсов.

1.1 | Предположения и допущения

1. В задании 3 все впереди идущие машины едут максимально рационально, т. е. по правилам, описанным в заданиях 1 и 2 при наличии и отсутствии табло времени у светофора соответственно.
2. Мы пренебрегаем иными источниками расхода топлива: фары, обогрев салона и.т.п.
3. Мы допускаем, что у всех автомобилей на дороге одинаковые геометрические характеристики.
4. Водитель не обращает внимания на автомобили идущие сзади него. Это важно для третьей задачи.

2 | Общее описание модели к первой задаче

(задание 1.0)

2.1 | Методика описания модели

(к модели прилагается код в приложении)

Для поиска оптимальной стратегии используется генетический алгоритм, реализованный с помощью библиотеки `pygad`. Ключевым элементом является функция приспособленности (fitness function), которая оценивает эффективность каждого потенциального решения на основе результатов симуляции движения транспортного средства.

Обозначение	Название
$a(t)$	Целевая функция
$v(t)$	Скорость
$x(t)$	Расстояние до цели
t	Время
i	Число итераций в секунду

Целевая функция задана с помощью линейной функции для описания которой достаточно 25-50 равномерно распределённых по времени точек.

2.2 | Определение оптимальной стратегии

В контексте данной задачи под оптимальной стратегией понимается такой набор управляющих воздействий, который обеспечивает минимальные затраты топлива при выполнении основной миссии — доехать до цели. Все остальные параметры, такие как время выполнения манёвра или точность позиционирования (в допустимых пределах), рассматриваются как второстепенные и учитываются только при соблюдении главного критерия оптимальности - минимизации расхода топлива.

$$F_V = \int_0^t \underbrace{\frac{dV}{dt}(v(t), a(t))}_{\text{расход топлива}} dt - \text{расход топлива}$$

$$v(t) = \int_0^t a(t) dt + v_0$$

$$x(t) = \int_0^t v(t) dt + x_0$$

$$t : x(t) = L$$

Для упрощения модели используется аппроксимация:

$$v(t') \approx a(t)\Delta t + v(t),$$

$$x(t') \approx x(t) + v(t)\Delta t$$

$$\Delta t = \frac{1}{i}$$

Помимо потребления топлива были введены ещё некоторые параметры чтобы ускорить поиск оптимального решения, фрагмент:

$$F_G = \begin{cases} 5 \cdot 10^6, & t_s \in [t_1, t_2] \\ 4 \cdot 10^6(1 + \min(|t - t_1|, |t - t_2|)) & \end{cases}$$

$$F = \frac{2 \cdot 10^5}{F_B + 0.002} + F_G - \text{функция приспособленности}$$

Список параметров и формула упрощены, в данном примере F_G помогает алгоритму определить в какой момент надо приехать чтобы попасть в промежуток пока горит зелёный свет, где t_1 это момент начала зелёного света, а t_2 это момент включения красного.

2.3 | Характеристики автомобилей

Чтобы рассматривать оптимальные правила, для начала нужно определить, какие автомобили ездят по российским дорогам. В инфографике [1] указан топ-25 моделей проданных автомобилей в 2023 году и количество проданных машин. Собрал характеристики каждой машины из списка и взяв среднее арифметическое с весовыми коэффициентами (если машина продана N раз, имеет характеристику M , всего машин продано K , то вклад этой машины равен $\frac{N}{K} * M$) для каждой из характеристик.

После анализа данных получим следующую таблицу:

Легковой автомобиль		Грузовой автомобиль	
Характеристика	Значение	Характеристика	Значение
Длина автомобиля	4,37 м	Длина автомобиля	4,37 м
Максимальное $a_{\text{разг}}$	2,52 м/с ²	Максимальное $a_{\text{разг}}$	1 м/с ²
Масса автомобиля	1415 кг	Масса автомобиля	10860 кг

В рамках нашей модели примем, что максимальное ускорение торможения $a_{\text{торм}} = 2 \cdot a_{\text{разг}}$.

2.4 | Влияние скорости и ускорения на расход топлива

Используя модель, описанную в статье [1], получим выражение, описывающее расход топлива при движении. В используемой нами статье описано лишь влияние потерь от скорости. Мы же введем влияние ускорения автомобиля в эту модель.

$$F_{\text{тяги}} = F_{\text{сопр}} + ma \cdot v$$

$$F_{\text{тяги}} v = F_{\text{сопр}} v + mav$$

$$P_{\text{эфф}} = F_{\text{сопр}} v + mav$$

$$P = Q\eta$$

$$F_{\text{соп}}v + mav = \eta\lambda\rho \frac{dV}{dt}$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{mav + F_{\text{соп}}v}{\eta\lambda\rho}$$

$$\frac{dV}{dt} = \left| \frac{mav}{\eta\lambda\rho} + \alpha + \beta v + \gamma v^2 + \delta v^3 \right|$$

(мгновенный расход топлива от скорости и ускорения)

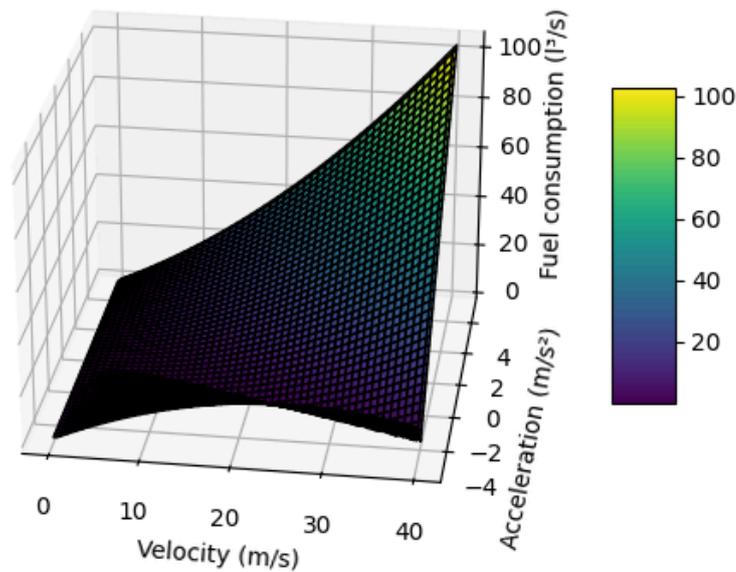
α – отражает постоянные траты : фары, отопление и т.п.

β – коэффициент трения качения, умноженный на g

γ – поправка на увеличение трения при большой скорости

δ – поправка на преодоление сопротивления воздуха

Fuel consumption



Воспользуемся константами, представленными в таблице, для анализа двух различных типов автомобилей: легкового и грузовика:

Vehicle type	α	β	γ	δ
Легковой автомобиль	$4,75 \cdot 10^{-1}$	$-8,50 \cdot 10^{-3}$	$5,41 \cdot 10^{-4}$	$1,04 \cdot 10^{-7}$
Грузовой автомобиль	$2,51 \cdot 10^{+0}$	$3,03 \cdot 10^{-2}$	$4,18 \cdot 10^{-3}$	$-1,26 \cdot 10^{-5}$

Используем модель легкового автомобиля в первых двух задачах.

2.4.1 | Начальные условия модели

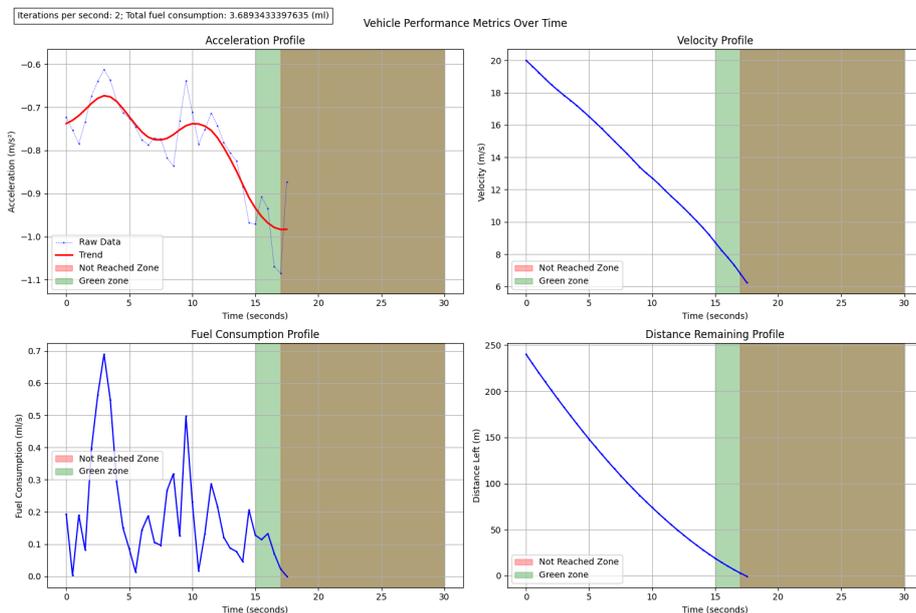
Считаем, что водитель движется по дороге с оптимальной скоростью равномерного вождения (он знает её из опыта вождения). Путём взятия производной определим, что оптимальная скорость - 16.4 м/с. Тогда пусть водитель, для простоты, движется с начальной скоростью $V_0 = 10$ м/с.

Пусть до светофора L метров, а время до включения зелёного света T секунд. Тогда тактики действия будут отличаться только в зависимости от отношения $\frac{L}{V_0 T}$.

2.4.2 | Примеры

Sedan: 1250 кг $a(t) \in [-5; 2.5], \forall t$

1. $v_0 = 20 \frac{M}{c}; L = 240M; T = 15c :$

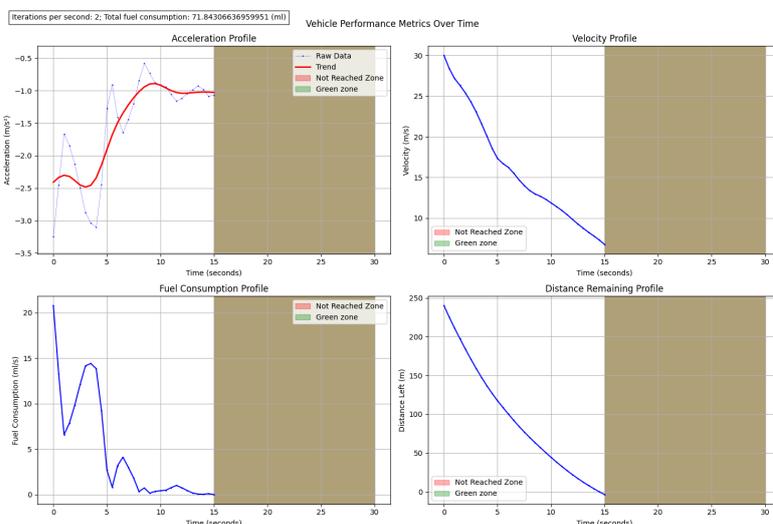


В этом случае выгоднее ехать без приложения ускорения со стороны машины, сводя потребление топлива к около-нулевому значению.

Нулевая скорость может быть полезна в случае поворота на перекрёстке.

На самом деле потребление 0.7 мл / с — из графика относительно низкое.

2. $v_0 = 30 \frac{M}{c}; L = 240M; T = 15c :$

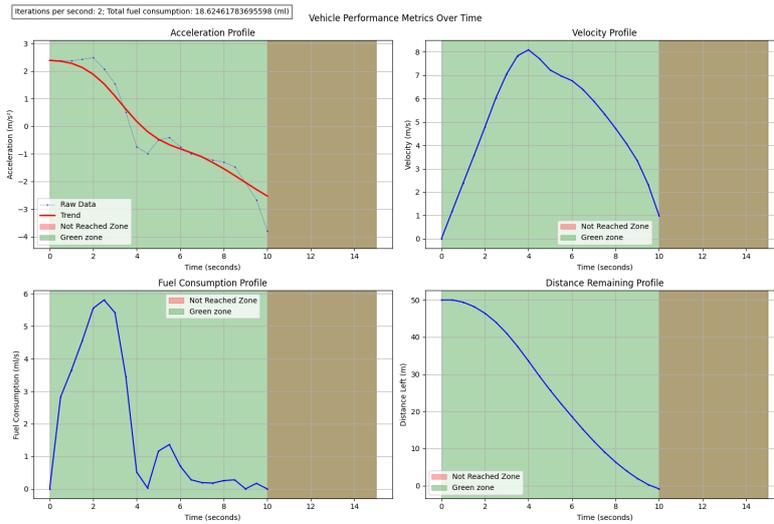


В этом случае скорость машины слишком высокая, поэтому самой оптимальной стратегией является торможение в начале.

По этой причине машина доезжает до светофора ровно к зелёному свету.

Bus: 10860 кг $a(t) \in [-2; 1], \forall t$

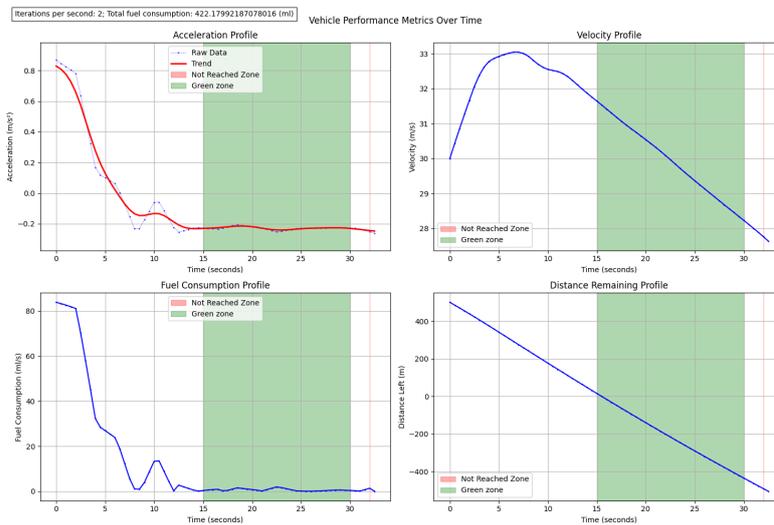
$$1. v_0 = 0 \frac{M}{c}; L = 50M; T = 0c :$$



Если начальная скорость нулевая, то выгодной стратегией эволюционный поиск всегда считает ускорение в начале и торможение через силы сопротивления в конце.

В этом можно убедиться по графику потребления топлива, в конце он околонулевой.

$$2. v = 30 \frac{M}{c}; L = 500M; X = 500M; T = 15c :$$



Этот случай отличается от остальных тем, что конечная точка находится дальше светофора и обозначена через X - расстояние от светофора.

Примечательно, что пересечение со светофором происходит как раз к началу зелёного света, поэтому в начале есть ускорение.

Рис. 5. Интересный случай

3 | Общее описание модели ко второй задаче

(задание 2.0)

Теперь, в отсутствие табло, придется поменять тактику. Наша цель — найти способ, который при отсутствии данных о времени всё же способен повысить энергоэффективность, используя имеющиеся данные. Очевидно, что ожидаемый расход будет больше. Попробуем его найти. Модель к этой задаче была взята из статьи [2].

3.1 | Идея решения и используемые методы

Чтобы получить наилучший возможный базовый уровень энергоэффективности, сначала решаем задачу оптимального управления, предполагая полное знание времени сигналов на всём плановом горизонте. Используется следующая целевая функция затрат:

$$J = \sum_i \left[w_1 \frac{t_{i+1} - t_i}{\Delta t_{\min}} + w_2 \left| \frac{a_i}{a_{\max}} \right| + c(x_i, t_i) \frac{1}{\epsilon} \right] \quad (1)$$

Где J — сумма элементарных функций расхода i ; $t_{i+1} - t_i$ — это время, необходимое автомобилю для прохождения расстояния между шагами x_i и x_{i+1} при данной скорости на x_i и ускорении a_i ; Δt_{\min} — минимальное время для завершения шага при максимальной начальной и конечной скорости, которое используется как масштабирующий фактор; a_i — постоянное ускорение, предполагаемое на шаге i , и a_{\max} — максимально допустимое ускорение (из таблицы из п.2). Константы w_1 и w_2 — ограничения движения, вызванные красным сигналом, вводятся как мягкие ограничения. Значение $c(x_i, t_i)$ равно нулю, пока горит зелёный (и 1 — когда красный), а ϵ — это очень малая константа (мы взяли её 10^{-6}), чтобы општрафовать модель за неоптимальные случаи простоя.

3.2 | Вероятность

3.2.1 | Расскажем, как её считать

Теперь возьмём модифицированную функцию, учитывающую вероятности:

$$J = \sum_i \left[w_1 \frac{t_{i+1} - t_i}{\Delta t_{\min}} + w_2 \left| \frac{a_i}{a_{\max}} \right| + c(x_i, t_i) |\ln(p(x_i, t_i))| \right] \quad (2)$$

Новой переменной является $p(x_i, t_i)$, которая представляет вероятность того, что свет будет зеленым в момент времени t_i для светофора, расположенного на позиции x_i . Когда вероятность зеленого света в $x_i t_i$ равна нулю, $\ln(p(x_i, t_i)) = \infty$, и проехать через светофор нельзя. Когда $p(x_i, t_i) = 1$, этот элемент целевой функции становится равным нулю, что позволяет модели выбрать эту скорость.

Минимизация функции стоимости (2) с учётом описанных ранее условий является задачей оптимального управления. Проблема решается с использованием метода динамического программирования (DDP), но в формате смещённого горизонта; по мере поступления новой информации (если выясняется, что автомобиль не может проехать) функция пересчитывается с учётом обновлённой информации на оставшемся отрезке пути.

3.2.2 | Теперь считаем

Обозначим состояние светофора, как $l(t)$, которое может принимать два значения g и r , представляющие зеленый и красный свет соответственно. Зная цвет светофора в момент времени t , определим его через Δt_p . Пусть средняя продолжительность зеленого и красного света равна t_g и t_r соответственно. Тогда полный цикл смены сигнала занимает $t_g + t_r$. Если сейчас зелёный свет, то (после проведения некоторых математических выкладок) вероятность зеленого света через t_p секунд равна:

$$P[l(t + t_p) = g | l(t) = g] = \begin{cases} \frac{t_g - t_m}{t_g} & t_m \leq t_r; \quad t_m \leq t_g \\ \frac{t_g - t_r}{t_g} & t_r \leq t_m \leq t_g \\ 0, & t_g \leq t_m \leq t_r \\ \frac{t_m - t_r}{t_g} & t_g \leq t_m; \quad t_r \leq t_m \end{cases}$$

где $t_m = \text{mod}(t_p, t_g + t_r)$ — это остаток от деления t_p на $t_g + t_r$. Аналогично, вероятность зеленого света через t_p секунд, учитывая, что сейчас свет красный, равна

$$P[l(t + t_p) = g | l(t) = r] = \begin{cases} \frac{t_m}{t_r} & t_m \leq t_r; \quad t_m \leq t_g \\ 1, & t_r \leq t_m \leq t_g \\ \frac{t_g}{t_r}, & t_g \leq t_m \leq t_r \\ \frac{t_g + t_r - t_m}{t_r} & t_g \leq t_m; \quad t_r \leq t_m \end{cases}$$

3.3 | Симуляция

В используемой нами статье была проведена серия симуляций, в которой была изучена эффективность алгоритма в общем случае.

Было проведено исследование случая, которое включало одно моделирование набора из трёх последовательных конфигураций времени сигналов. Профили скорости для исследуемых случаев без табло, с табло для ближайшего светофора и с полной информацией представлены на рисунке 2. На графике ниже видно, что оптимальная тактика при отсутствии информации приводит к 7 секундам простоя.

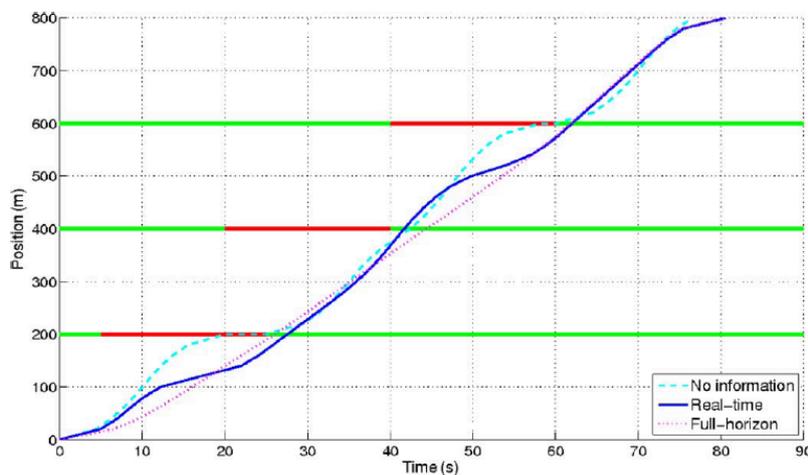


Рис. 6. Симуляция: сравнение профилей скорости водителя: без табло, с табло к первому светофору и с табло ко всем светофорам.

3.4 | Выводы

3.4.1 | Немного счёта

По результатам симуляции видно, что даже при оптимальной стратегии минимизации остановок на светофорах, таковые всё равно будут присутствовать, в связи с невозможностью точно предсказать поведение светофора в конкретный момент времени.

Однако для уменьшения их количества мы можем вывести оптимальное правило, основываясь на поведении водителя в симуляции.

При полном отсутствии информации о дальнейшем поведении светофора водитель сначала движется с постоянной скоростью $\sim 15 \text{ м/с} = 54 \text{ км/ч}$. Затем, примерно на расстоянии 50 м он начинает равномерно тормозить, так, что нулевой скорости он достигнет как раз когда подъедет к светофору. Неточностями в скорости и расстоянии до светофора можно пренебречь, т. к. водитель всё ещё человек и не может с математической точностью узнать расстояние до светофора.

Ускорение торможения находим по формуле

$$a = \frac{v_k^2 - v_n^2}{2d} = \frac{0^2 - 15^2}{2 \cdot 50} = -2,25 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

Однако начальная скорость водителя может оказаться больше, чем нужно. Т. к. мы рассматриваем городские условия, максимальной возможной начальной скоростью будем считать 60 км/ч ($\sim 16,6 \text{ м/с}$). В таком случае, чтобы затормозить до оптимальной скорости (54 км/ч) с оптимальным ускорением ($-2,25 \text{ м/с}^2$) водителю понадобится тормозной путь

$$d = \frac{v_k^2 - v_n^2}{2a} = \frac{15^2 - 16,6^2}{2 \cdot (-2,25)} \approx 12 \text{ м}$$

В случае, если начальная скорость автомобиля меньше оптимальной, путь, необходимый на ускорение также будет $\leq 12 \text{ м}$ (это непосредственно следует из формулы расстояния выше).

3.4.2 | Каким же будет правило?

Итоговое правило ко второму заданию нашей работы можно сформулировать так:

Если горит красный: На расстоянии $x \geq 70$ метров от светофора водителю следует равномерно затормозить с ускорением $2,25 \text{ м/с}^2$ до скорости 54 км/ч, если его изначальная скорость была выше или ускориться с тем же ускорением до той же скорости, если изначальная скорость была ниже. Далее, на расстоянии примерно 50 метров следует начать тормозить с ускорением $2,25 \text{ м/с}^2$ до полной остановки.

Как только загорается зелёный: Водителю следует разогнаться с тем же ускорением $2,25 \text{ м/с}^2$ до 54 км/ч, затем продолжать движение с установленной скоростью.

4 | Общее описание модели к третьей задаче

(задание 3.0)

Для решения этой задачи мы воспользуемся моделями и правилами, полученными ранее, и вместе с этим создадим новую модель, введя дополнительные параметры и ограничения.

Нам придётся учесть такие моменты, как количество машин впереди, их тип (от легкового автомобиля до тяжёлого грузовика), а также их поведение на дороге: стоят они или движутся, а если и движутся, то с какой скоростью.

4.1 | Идея решения

(к модели прилагается код в приложении)

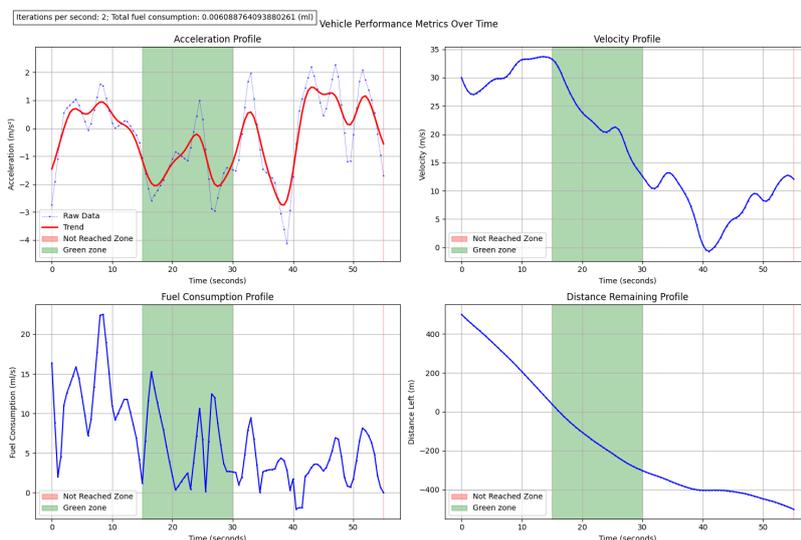
Пусть перед водителем n машин одинаковой длины L и $k : 1 \leq k \leq n$ позиция первой самой тяжелой машины считая от светофора. Наша модель предусматривает два типа автомобилей (легкий и грузовой), которые отличаются своим весом, разгоном, максимальной скоростью и другими характеристиками. Тогда $a_{\text{груз}} \ll a_{\text{легк}}$, где $a_{\text{груз}}$ - максимальный разгон грузовика, $a_{\text{легк}}$ - максимальный разгон легкового автомобиля. Посмотрим, какой тип авто стоит на k позиции. Понятно, что все машины, стоящие за ним будут разгоняться с таким же ускорением, как и k -я машина. А значит все автомобили, стоящие перед k -й машиной повлияют на модель только дополнительным расстоянием, не оказав никакого воздействия на ускорение. Таким образом с допущением, можно сказать, что перед водителем будет машина с разгоном k -й машины, но длиной $(n - k + 1) \cdot L$ стоящая на расстоянии $(k - 1) \cdot L$ от светофора. Далее нужно воспользоваться результатом первой задачи и применить критерии, указанные выше.

4.2 | Пример

Возьмём результаты одного из результатов симуляций задачи №1 для примера.

В таком случае автомобиль сзади действует по модели из текущей задачи, а её основное ограничение - отсутствие возможности обогнать водителя. Важно при этом, что модель материальных точек для автомобилей спереди - ведь это тела, имеющие длину.

$$v = 30 \frac{\text{м}}{\text{с}}; L = 500\text{м}; X = 500\text{м}; T = 15\text{с} :$$



см. Рис. 5.

По сравнению с передней машиной, машина действующая по модели №3 всегда находится на пару метров дальше от светофора.

Ещё например эта машина пересекает светофор на 16-17 секундах, так как передняя пересекла их на 15-ой.

5 | Общее описание модели к четвертой задаче

(задание 4.0)

Решать эту задачу мы будем способом, аналогичным задаче 3: воспользуемся предыдущими моделями, вместе с этим введя новые параметры и ограничения. С добавлением l количества дорог задача усложняется тем, что теперь нужно совершить оптимальный выбор полосы.

5.1 | «Каждый сам за себя»

(задание 4.1)

Определение оптимальной стратегии:

Предположим, что у нас l полос и длина l_i полосы: $n_i \cdot L$, где n_i - количество автомобилей, L длина одной машины. Тогда пусть первая самая тяжелая машина от светофора стоит на позиции k_i : $1 \leq k_i \leq n_i$. Введем также поправочный коэффициент $q_{\text{груз}} > q_{\text{легк}}$, он нужен для того чтобы различать разгон грузового и легкового автомобилей. Теперь осталось задать функцию цены f_{cost_i} :

$$f_{\text{cost}_i} = \begin{cases} (k_i-1) \cdot L + q_{\text{груз}} \cdot (n_i - k_i + 1) \cdot L, & \text{если } \geq 1 \text{ грузовиков} \\ q_{\text{легк}} \cdot n_i \cdot L, & \text{если } 0 \text{ грузовиков} \end{cases}$$

Остается найти $\min(f_{\text{cost}_i})$ и понять в какую l_i полосу лучше встать. Заметим, что нам невыгодно менять выбор, ведь лучшая полоса лучше уже не станет.

В случае командной игры получаем, что эти функции должны быть равны для всех полос, чтобы уменьшить общее ожидание. Тогда при введении «пустой» полосы (аналогично выделенным полосам для ОТ) среднее ожидание бесспорно увеличится, ведь мы уйдем от равенства стоимостей полос.

Алгоритм управления:

При выборе полосы водителю следует посмотреть, сколько машин едет в каждой и какого типа. Затем водитель должен оценить наименьшую скорость машины в каждой из полос и выбрать ту, где скорость выше всего, а общее количество машин - меньше. Далее остаётся руководствоваться правилами, полученными в задаче 3.

5.2 | «Один за всех и все за одного»

(задание 4.2)

Решать задачу, в которой водители придерживаются кооперативной стратегии мы будем способом синхронизации движения. Мы уже разработали оптимальное правило для движения автомобиля в одной полосе при наличии машин перед ним.

В каждой из полос могут быть как автомобили, уже стоящие на светофоре, так и подъезжающие к нему. Таким образом, для водителей, соблюдающих кооперативную стратегию, оптимальное правило будет звучать так:

В каждом из рядов ближайший к светофору движущийся автомобиль соблюдает правило полученное в задаче 3. Все машины за ним едут с той же скоростью, что и автомобиль, соблюдая безопасную дистанцию. Каждый водитель оценивает примерное количество машин в каждом ряду и при необходимости переходит в другую полосу, чтобы загруженность всех рядов была примерно равной.

Таким образом мы синхронизируем движение автомобилей во всех рядах.

6 | Улучшение функционала светофоров

(задание 5.0)

Вопрос об улучшении функционала существующих светофоров становится особенно актуальным в условиях растущих транспортных потоков и увеличения числа участников дорожного движения. Современные технологии, включая искусственный интеллект, способствуют оптимизации управления движением на перекрестках. Внедрение дополнительных блоков управления, основанных на этих технологиях, может значительно повысить эффективность работы светофоров и безопасность на дорогах. Современные светофоры работают по заранее заданному интервалу, что не всегда соответствует реальным условиям дорожного движения. Это может вызвать ненужные остановки и задержки, более того, постоянное торможение и последующий разгон автомобилей увеличивает расход топлива и уровень выбросов вредных веществ, таких как углекислый газ и оксиды азота. Это особенно важно в районах с высокой плотностью движения, где большее количество остановок на светофорах усугубляет экологические проблемы. Внедрение интеллектуальных систем управления, способных адаптироваться к изменяющимся условиям в реальном времени, является решением данных проблем и важным шагом в развитии транспортных систем.

6.1 | Наша альтернатива

Наилучшим улучшением функционала светофоров, по нашему мнению, станет использование датчиков, которые передают данные о состоянии светофора транспортным средствам. Они включают в себя информацию о текущем цвете (зеленый, желтый или красный) и времени до смены цвета. Когда транспортное средство приближается к светофору на расстоянии L , встроенный в светофор датчик передает информацию о текущем состоянии светофора (например, красный, желтый или зеленый свет) другому датчику, установленному в автомобиле. Для передачи данных используются технологии, такие как Dedicated Short Range Communication (DSRC) и Cellular Vehicle-to-Everything (C-V2X). Они обеспечивают надежную и быструю передачу информации между светофорами и автомобилями, что критически важно для оптимизации потоков движения.

6.2 | Преимущества системы

1. Снижение расхода топлива автомобиля: благодаря нашему оптимальному алгоритму, примененному в первой задаче, водитель, зная время до смены цвета светофора, сможет выбрать подходящую скорость для минимизации расходов топлива.
2. Снижение уровня загрязнения окружающей среды: сокращение частоты остановок и стартов способствует уменьшению выбросов вредных веществ в атмосферу. Кроме того, более плавное движение автомобилей помогает снизить общий углеродный след.

7 | Использование искусственного интеллекта (ИИ)

При написании статьи и проведении исследований искусственный интеллект (ИИ) не использовался.

Библиография

- [1] J. Zhao, W. Li, J. Wang, и X. Ban, «Dynamic Traffic Signal Timing Optimization Strategy Incorporating Various Vehicle Fuel Consumption Characteristics», *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, doi: 10.1109/tvt.2015.2506629.
- [2] G. M. A. Vahidi, «An Optimal Velocity-Planning Scheme for Vehicle Energy Efficiency Through Probabilistic Prediction of Traffic-Signal Timing», *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, doi: 10.1109/TITS.2014.2319306.
- [3] АЕБ, «Продажи легковых и лёгких коммерческих автомобилей в России в декабре 2023», 2023. [Онлайн]. Доступно на: <https://aebrus.ru/upload/iblock/a20/RUS-Car-Sales-in-December-2023.pdf>