

## МЕТОДИКА И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ОПТИМИЗАЦИИ ДЛИТЕЛЬНОСТИ СВЕТОФОРНОГО ЦИКЛА<sup>1</sup>

Грушевский А. А.<sup>2</sup>, Ильинская Е. С.<sup>3</sup>, Финогеев А. А.<sup>4</sup>  
(ФГБОУ ВО Пензенский государственный  
университет, Пенза)

Одним из основных элементов управления транспортными и пешеходными потоками в дорожной среде является светофорное регулирование. Автоматизация управления светофорным регулированием позволяет рассчитать оптимальные режимы его работы с целью сокращения задержек при движении транспорта и времени ожидания проезда через перекрестки, снижения вероятности образования пробок. Результатом является повышение безопасности дорожного движения и устойчивости городской транспортной системы. В статье рассматриваются вопросы разработки модели, методики и инструментального средства для расчета оптимальных тактов светофорного цикла. Актуальность статьи обусловлена тем, что рост дорожного трафика снижает эффективность использования транспортных средств, увеличивает время задержек и остановок, расход топлива, повышает количество дорожно-транспортных происшествий и нарушений. Объектом исследования является система адаптивного управления светофорами на перекрестках. Целью исследования является анализ и разработка математической модели и методики расчета тактов светофорных циклов в зависимости от текущих условий дорожного движения на перекрестках для сокращения времени ожидания транспорта и пешеходов. Результатом исследований является разработанное программное приложение, которое реализует предложенную методику расчета оптимальной длительности тактов светофорного цикла в зависимости от интенсивности автомобильного и пешеходного трафика, длины очереди.

Ключевые слова: пешеходный поток, светофорный цикл, адаптивный светофор, интеллектуальный светофор, интенсивность трафика, модель светофорного цикла.

---

<sup>1</sup> Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-71-10087, <https://rscf.ru/project/20-71-10087/>.

<sup>2</sup> Александр Анатольевич Грушевский, аспирант ([sgrushevskii@mail.ru](mailto:sgrushevskii@mail.ru)).

<sup>3</sup> Екатерина Сергеевна Ильинская, магистрант ([ilinskaya58k@mail.ru](mailto:ilinskaya58k@mail.ru)).

<sup>4</sup> Антон Алексеевич Финогеев, к.т.н., доцент ([fanton3@yandex.ru](mailto:fanton3@yandex.ru)).

## **1. Введение**

Одним из методов повышения безопасности дорожного движения и снижения числа дорожно-транспортных происшествий (ДТП) является светофорное регулирование [6]. Светофоры предназначены для пропуска участников дорожного движения и для обозначения опасных участков. Они применяются для управления по направлениям или полосам движения, в местах с встречными конфликтующими потоками, в местах пересечения конфликтующих транспортных и пешеходных потоков, в местах организации реверсивного движения, на железнодорожных переездах, разводных мостах, переправах и т.п. [9]. Существует три типа светофоров: светофоры с жестким управлением (с постоянной долговременной настройкой), адаптивные светофоры и интеллектуальные светофоры [10]. Адаптивные светофоры предназначены для простых перекрестков, где нет постоянной загруженности дорожных полос в разных направлениях и периодически появляются свободные временные окна, например на перекрестках с выездом с второстепенной дороги или на регулируемых пешеходных переходах. Часто к таким светофорам относят те, у которых алгоритм работы просто изменяется в зависимости от времени суток, например в часы пик. Адаптивные светофоры работают на основе данных, получаемых с помощью видеокамер или детекторов обнаружения транспортных средств (ТС) и определения параметров транспортных потоков. Детекторы выполняют функции обнаружения подвижных и неподвижных ТС в контролируемой зоне, измерения количества автомобилей по полосам за заданный период, вычисления средней скорости движения по полосе в заданный период времени. Проблема видеокамер заключается в зависимости от погодных условий, когда, например, осадки и туман снижают точность распознавания и измерения характеристик транспортных потоков.

Светофорная система считается интеллектуальной, если она распознает ситуацию на перекрестке и динамически определяет оптимальные фазы переключения с учетом фактических задержек транспортных и пешеходных потоков. Системы работают с использованием детекторов транспортных средств, пешеходных датчиков и комплекса видеокамер. Данные об интенсивности

трафика на всех полосах движения и о скоплениях ТС и пешеходов поступают с датчиков детектирования и камер видеонаблюдения в реальном времени. Детекторы транспорта устанавливаются на уровнях 30, 60, 90 150 метров и стоп-линиях перекрестков. Для светофорного регулирования применяется метод дискретно-событийного управления с использованием модели нейронных сетей [12]. Интеллектуальные светофоры с моделью в виде нейронной сети относятся к системам с искусственным интеллектом [32]. Они учитывают множество различных факторов, а механизм регулирования базируется на обучении нейронной сети. Нейронная сеть по результатам распознавания и анализа транспортных потоков на полосах движения рассчитывает значения тактов переключения светофора для отдельных полос, пешеходов и типовых моделей перекрестков (рис. 1). Целью расчета является подбор тактов так, чтобы суммарно со всех сторон пропустить максимально возможное число ТС за интервал времени в зависимости от размера очереди, одновременно позволяя пешеходам перейти улицу за минимальное время ожидания.

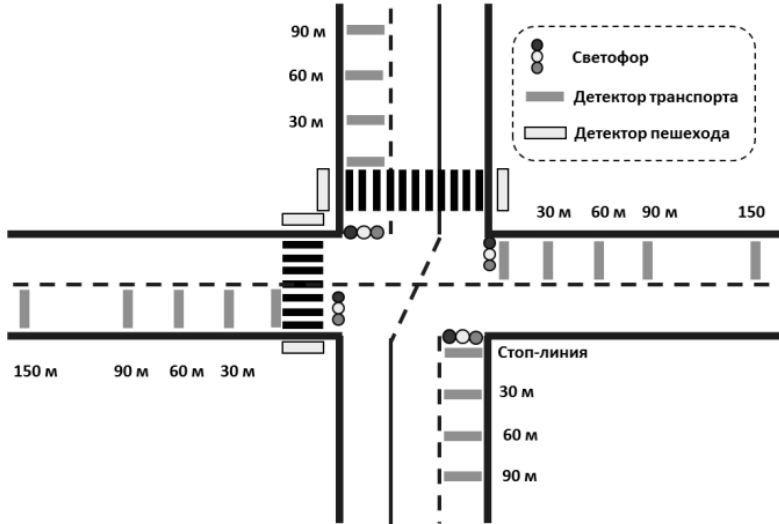


Рис. 1. Модель перекрёстка

Современные нейросетевые технологии позволяют достаточно точно распознать объекты в любых ракурсах при сложных метеоусловиях, обеспечивая более точный подсчет ТС на большом расстоянии [32, 15]. Нейронные сети могут определить состав ТС по разным параметрам для оценки времени движения автомобиля с учетом коэффициентов поправки расчетов [29, 27]. В отличие от адаптивных, светофоры с нейронной сетью могут распознавать и подсчитывать людей, что важно для настройки пешеходного цикла движения, а также распознавать объекты в виде колясок, велосипедов, самокатов и других ТС, которые также необходимо учитывать в процессе регулирования.

В современных автоматизированных системах управления дорожным движением используется информация от видеокamer, детекторов транспортных средств и пешеходных потоков (рис. 1). Полученная информация позволяет организовать управление транспортными потоками, скоординировать работу светофорных объектов на маршрутах движения. Преимуществом комбинированных систем видеонаблюдения и детектирования является возможность одновременного визуального мониторинга и расчета количественных статистик для транспортных и пешеходных потоков. Такие системы собирают данные трех типов:

а) статистическую информацию о дорожном трафике, включая число ТС, скорость ТС, ускорение транспортного потока, плотность, занятость полос и т.п.,

б) информацию о дорожно-транспортных происшествиях (ДТП) и нарушениях правил дорожного движения (ПДД), включая число и тип ДТП, нарушение скоростного режима, образование заторов и пробок, изменение плотности потока, движение по встречной полосе или обочине, замедление потока, наличие сторонних объектов и т.п.,

в) информацию о ТС в зоне пересечений автомобильных дорог, включая наличие, число и среднюю скорость движущихся ТС, наличие и число остановившихся ТС перед светофором, число ТС и длины очередей на полосах движения, число пешеходов, переходящих дорогу, число пешеходов, ожидающих перехода и т.п.

Последний тип данных в основном применяется в системах управления светофорами.

## **2. Теоретический обзор**

Для разработки адаптивных и интеллектуальных систем управления светофорными объектами применяются различные математические и имитационные модели, методы и алгоритмы оптимизации, поддержки принятия решений, статистического и интеллектуального анализа, глубокого машинного обучения, компьютерного зрения и т.д. Система управления светофорами рассматривается как один из компонентов городской интеллектуальной транспортной системы. Такая система обеспечивает моделирование, планирование, прогнозирование и оптимизацию функционирования объектов в дорожной среде с целью обеспечения безопасности дорожного движения и эффективности использования элементов дорожно-транспортной инфраструктуры.

В работе [4] авторами рассматривается математическая графовая модель регулируемого перекрестка, для оптимизации работы которого применяется вариационный генетический алгоритм. Дорожная сеть моделируется как ориентированный граф, где вершинами с весами (характеристиками транспортного потока) являются участки дорог, а дугами – проезды на перекрестках. Сигналы светофоров моделируются включением и выключением дуг. Математическая модель работы графа формализуется системой рекуррентных конечно-разностных уравнений. Критерием оптимизации является максимальное число ТС, которое должно пройти от входных участков к выходным за заданное время светофорной длительности [1].

Обзорная работа [14] представляет различные системы светофорного регулирования, разработанные с использованием современных подходов. Технологии сенсорных сетей, интеллектуальных транспортных систем и методы обработки изображений используются для сбора статистики дорожного движения в реальном времени и оценки данных для изменения светофорных фаз с помощью интеллектуальных контроллеров с нечеткой логикой. Другая обзорная статья [18] представляет сборник материалов по автоматизированным системам управления дорожным движением.

В работе [3] предложен метод адаптивного управления светофорами на основе нечеткой кластеризации. Определение оптимальных значений параметров систем управления светофорами (длительность фаз, радиусы наблюдений за транспортными и пешеходными потоками, пороговые коэффициенты, число кластеров) выполняется с использованием параллельного генетического оптимизационного алгоритма с вещественным кодированием. Исследования в работе [8] также связаны с синтезом математической модели распределения транспортных потоков для управления светофорной сигнализацией. Исходные данные используются в алгоритме расчета оптимальных параметров светофорного регулирования, а также в алгоритме определения длины ленты безостановочного движения и величины оптимального сдвига фазы светофора.

Авторы статьи [16] предложили интеллектуальную систему для последовательности светофоров. Она использует данные о транспортных и пешеходных потоках в реальном времени и алгоритмы машинного обучения для оптимизации. Данные поступают с детекторов, камеры видеонаблюдения и GPS-модулей. На основе данных система регулирует длительность фаз светофоров в последовательности на маршруте для оптимизации транспортного потока. Например, в часы пик длительность разрешающей фазы увеличивается в направлении с наибольшим трафиком. Ретроспективные данные используются в качестве обучающей выборки для оптимизации работы светофоров в разные дни недели и время суток путем поиска закономерностей в транспортных потоках, например, в часы пик. Другая работа [24] также связана с сезонными колебаниями транспортных и пешеходных потоков в городе. Цель исследования заключается в повышении эффективности системы светофоров путем мониторинга транспорта в режиме реального времени с учетом сезонности. Для светофорного регулирования движения также используется навигационный сервис Google Maps с целью минимизации пробок за счет определения плотности трафика и изменения времени ожидания на светофоре.

Большое количество исследователей разрабатывают методы глубокого обучения и обучения с подкреплением для интеллек-

туального управления светофорами. В работе [33] авторы предлагают интеллектуальный метод управления светофорами с использованием алгоритма глубокой сети Q-learning для минимизации задержки ранних и поздних пиков трафика. В статье [30] авторы сравнивают различные решения по управлению сигналами светофора в режимах обучения и представляют свою модель принятия решений, основанную на глубоком обучении с подкреплением. Результаты исследований [22] также связаны с моделью глубокого обучения с подкреплением для управления циклом светофора. Авторы определяют сценарий дорожного движения как ряд состояний, а изменения светофорных циклов – как действия в многомерном марковском процессе принятия решений. Для оптимизации процесса используется сверточная нейронная сеть (CNN) с целью сопоставления состояний с вознаграждениями. Аналогичный подход на базе алгоритма глубокого обучения с подкреплением представлен в статье [21]. Алгоритм извлекает зависимости из данных о трафике в реальном времени и определяет оптимальную стратегию адаптивного управления сигналами светофора. Анализ показывает, что множество исследований в области интеллектуального управления светофорами (ITLC) в основном сосредоточены на совершенствовании метода обучения с подкреплением и метода координации работы светофорной последовательности. Однако для повышения эффективности методов необходимо учитывать условия дорожного движения и синхронизацию работы светофоров на разных перекрестках. В традиционных алгоритмах ITLC, основанных на обучении с подкреплением, при расчете вознаграждения учитывается либо длина очереди автомобилей, либо их время ожидания. Авторы работы [23] предлагают новый алгоритм ITLC с учетом времени отправки и обработки сообщений в сети для синхронизации работы светофоров и модель расчета вознаграждения с одновременным учетом времени ожидания и длины очереди. В статье [17] предлагается использовать альтернативный способ формулировки определений состояния и вознаграждения. Авторы предполагают, что такой подход обеспечивает быструю сходимость к оптимальной стратегии управления.

Для решения задач распознавания и детектирования транспортных средств на перекрестках с помощью видеокамер в сложных погодных условиях коллективом были разработаны собственные методы и инструментальные средства [11, 13, 25, 26]. Предложенные модели и методы позволяют распознавать транспортные средства на зашумленных изображениях, которые получаются при видеофиксации в условиях осадков, идентифицировать объекты при съемке под разными ракурсами и при перекрытиях до 75% на изображениях.

### **3. Материалы и методы**

Выделим две задачи автоматического регулирования дорожного трафика в урбанистической среде. Первой задачей является оптимальное управление длительностью светофорных циклов, второй – координированное управление последовательностью светофорных объектов, объединенных в единую зону на маршруте следования транспортных средств. Для решения задач в городах внедряются адаптивные и интеллектуальные светофоры, которые координируют фазы переключения на основе видеонаблюдения, детектирования ТС и пешеходов, проводят анализ дорожной обстановки на полосах движения, прилегающих к месту регулировки. Оптимальное управление длительностью светофорных циклов заключается в автоматической настройке тактов регулирования очередности пропуска ТС и пешеходов в зависимости от интенсивности конфликтующих транспортных и пешеходных потоков, от количества ожидающих пропуска ТС и пешеходов.

В обоих случаях для оптимального управления светофорными циклами необходимо учитывать ряд входных параметров, а именно:

- геометрические параметры перекрестков дорог (ширину проезжей части, число полос движения, разницу закруглений тротуаров, расстояние до конфликтных точек, наличие разделительных полос, их ширину и т.п.),
- параметры транспортных и пешеходных потоков по всем направлениям движения (картограммы потоков, среднюю скорость движения потоков, состав, длину автомобилей и т.п.),



- схема организации движения на перекрестках, которая включает направления движения на перекрестках и используется для определения и анализа конфликтных точек,
- параметры потоков насыщения и т.д.

*Постановка задачи.* Задачей исследования является разработка методики и программного приложения для расчета оптимальной длительности светофорного цикла для ТС при проезде на перекрестках и для пешеходов при пересечении проезжей части. Основные требования включают следующие положения.

1. Оптимальное время длительности светофорного цикла для ТС должно рассчитываться в зависимости от числа проездов ТС (транспортной загруженности) на полосах дороги до стоп-линии или конфликтной точки перекрестка.

2. Ограничение для максимально возможной загруженности перекрестка устанавливается не более 1500 автомобилей в час на одну полосу движения.

3. Фазы светофорного регулирования зависят от числа полос движения (2, 4 или 6 для основных и второстепенных дорог) и размера перекрестка.

4. При расчете схемы светофорного регулирования рекомендуется стремиться к минимальному числу фаз, к равномерной загрузке полос и к бесконфликтному пропуску пешеходов.

Рассмотрим особенности движения ТС через перекрестки, которые учитываются в методиках расчета и оптимизации светофорного цикла [5, 7]. Как правило, методики расчета используют для модели задержки ТС на перекрестках [31, 28]. В нашем случае выбрана модель, которая основывается на исследовании процессов проезда ТС через перекрёсток [2]:

$$(1) \quad d = \frac{(c-g)q}{gs} \cdot \frac{q_0}{s} + kg,$$

где  $d$  – средняя задержка ТС;  $c$  – длина цикла регулирования;  $g$  – длительность зеленого сигнала;  $q$  – интенсивность прибытия ТС;  $q_0$  – очередь ТС;  $s$  – интенсивность убытия ТС;  $k = [0-0,5]$  – коэффициент, учитывающий случайные задержки.

Критериями оптимальности в данной модели являются минимум задержки ТС в очереди ( $d = \min$ ), и минимальная длина очереди на перекрестке ( $q_0 = \min$ ). Модель адаптируется к ситуа-

ции на дороге и позволяет рассчитывать длительности тактов светофора в следующем цикле по результатам работы в предыдущем цикле.

Светофорный цикл без дополнительных поворотных фаз включает основной такт (для разрешающего в основном направлении и запрещающего сигналов в конфликтующем направлении) и промежуточный такт (рис. 2). Расчеты начинаются с определения длительности промежуточных тактов.

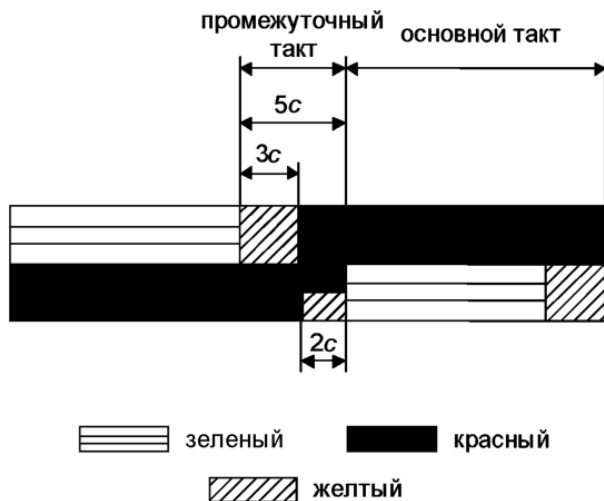


Рис. 2. Работа основных и промежуточного такта светофора

Промежуточный такт рекомендуется для обеспечения безопасности движения в период, когда движение ТС по основному направлению уже запрещено, ТС в конфликтующем направлении еще не получила разрешения на движение. Длительность промежуточного такта должна позволить ТС остановиться у стоп-линии или успеть миновать конфликтные точки пересечения с встречными ТС, начинающими движение в следующем основном такте. Минимальная длительность промежуточного такта работы светофора между разрешающим и запрещающим сигналом не может быть менее 4 с, с учетом того, что желтый сигнал светофора горит 3 с, а красный с желтым – 2 с. Однако статистика

ДТП показывает, что во время короткого промежуточного такта происходит больше всего аварий. Поэтому на перекрестках с повышенными показателями аварийности в переходный период смены сигналов по направлениям для повышения безопасности движения может быть организован режим «кругом красный». Длительность промежуточного такта можно оценить как сумму

$$(2) T_{ni} = t_{pi} + t_m + t_i + t_{(i+1)},$$

где  $t_{pi}$  – время реакции водителя на смену сигналов;  $t_m$  – время для проезда ТС тормозного пути;  $t_i$  – время движения ТС до дальней конфликтной точки;  $t_{(i+1)}$  – время проезда ТС в следующем основном такте конфликтующего направления от стоп-линии до конфликтной точки.

На практике время  $t_{pi}$  в большинстве случаев приблизительно равно времени  $t_{(i+1)}$ , поэтому их можно не учитывать при расчете длительности светофорного такта. Также при включении запрещающего сигнала происходит замедление скорости и торможение ТС перед стоп-линией, за исключением случаев нарушения правил дорожного движения. Тогда длительность промежуточного такта можно определить по формуле

$$(3) T_{ni} = \frac{V_{TC}}{7,2a_{TC}} + \frac{3,6(l_i + l_{TC})}{V_{TC}},$$

где  $V_{TC}$  – средняя скорость ТС при движении к перекрестку и на перекрестке без торможения (км/ч);  $a_{TC}$  – среднее замедление ТС при включении запрещающего сигнала ( $a_{TC} = 0,75 \text{ м/с}^2$ );  $l_i$  – расстояние от стоп-линии до дальней конфликтной точки (м);  $l_{TC}$  – средняя длина ТС (м).

Пешеходы, переходившие проезжую часть на разрешающий сигнал светофора, также должны закончить свое движение до окончания промежуточного такта. Если они не успеют перейти на другую сторону, то за время  $T_{ni}$  они должны вернуться обратно к началу движения или дойти до середины проезжей части (островка безопасности, разделительной линии встречных потоков). Максимальное время, которое требуется пешеходу, можно оценить как

$$(4) T_{ni}^p = \frac{B_{ns}}{4V_p},$$

где  $V_{ns}$  – ширина проезжей части для пешехода на  $i$ -м такте регулирования (м);  $V_p$  – средняя скорость движения пешеходов (в среднем 1,3 м/с).

После определения промежуточных тактов переходим к определению длительности основных тактов во всех фазах. Для расчета длительности здесь необходимо учитывать фазовые коэффициенты по каждому направлению движения, включая поворотные фазы. В случае интенсивного транспортного потока и наличия поворотов может потребоваться добавить в светофорный цикл поворотные такты, что увеличивает число фаз. Отметим, что при увеличении числа фаз пропускная способность всех полос снижается. Пропускная способность поворота ТС зависит от интенсивности встречного основного потока. Поэтому длительность времени такта на пропуск поворотного потока пропорциональна его интенсивности. Если интенсивность встречного потока не превышает 120 ТС в час, то отдельной фазы на пропуск такого потока не предусматривается и ТС должны проезжать в возможные свободные промежутки между ТС встречного потока. В противном случае рассчитывается длительность 3 фазы поворотного сигнала светофора. Также при интенсивности транспортного потока менее 120 ТС в час ТС могут проезжать через пешеходный поток без дополнительной фазы запрещающего сигнала для пешеходов, но только если интенсивность пешеходного потока не превышает 900 человек в час.

Фазовые коэффициенты можно определить как

$$(5) \quad y_{ij} = \frac{N_{ij}}{M_{ij}},$$

где  $y_{ij}$  – фазовый коэффициент направления;  $N_{ij}$  – интенсивность движения для периода суток;  $M_{ij}$  – поток насыщения на полосу (в нашем случае принимается как 1500 ТС в час). После расчета множества фазовых коэффициентов выбирается их максимум в данной фазе для дальнейших расчетов.

Полная длительность цикла регулирования вычисляется по формуле

$$(6) \quad T = \frac{1,5T_n + 5}{1 - Y}, \text{ где } T_n = \sum_{i=1}^n T_{ni}, \text{ а } Y = \sum_{i=1}^n y_i.$$

Длительность основных тактов для фаз определяется по формуле

$$(7) \quad t_i = \frac{(T - T_n) y_i}{Y},$$

где  $T$  – длительность светофорного цикла;  $T_n$  – сумма промежуточных тактов;  $Y$  – сумма фазовых коэффициентов  $y_i$ . Длительность проверяется на соответствие времени пропуска пешеходов и трамваев при их наличии.

Длительность основного такта пешеходов  $t_p$  определяется по формуле

$$(8) \quad t_p = \frac{B_p}{V_p} + 5,$$

где  $B_p$  – ширина пешеходного перехода;  $V_p$  – средняя скорость движения пешеходов.

При расчете циклов используется средняя скорость транспортных потоков по направлениям, которую можно определить по навигационным сервисам типа Yandex Map.

При изменении средних скоростей для оптимизации основных тактов в фазах и для корректировки длительности цикла применяется формула

$$(9) \quad T_{cor} = \frac{A}{2B} + \sqrt{\frac{A^2}{4B^2} - \frac{(T_n + T^*)(1,5T_n + 5)}{B}},$$

где  $A = 2,5T_n - T_n \cdot Y + T^* + 5$ ,  $B = 1 - Y$ ;  $T_{cor}$  – корректируемая длительность цикла;  $Y$  – сумма фазовых коэффициентов,  $T^* = \sum t_j$  – суммарная длительность  $j$ -х основных тактов;  $T_n$  – суммарная длительность промежуточных тактов.

Длительность основных тактов  $T^*$  вычисляем по формулам

$$(10) \quad t_i^* = y_i K^* T^*;$$

$$(11) \quad K^* = \frac{T^* - T_n}{T^* - 1,5T_n - 5}.$$

#### 4. Результаты

Модель длительности циклов и методика расчета тактов светофора реализована в виде программного приложения. Приложение используется для адаптивной настройки оптимального светофорного цикла. Для его тестирования и верификации взяты параметры работы светофора в городе Пенза, полученные в ходе мониторинга работы и оценки интенсивности транспортного и пешеходного потоков на перекрестке (рис. 3).

```
Введите количество полос: 2
Введите количество фаз: 2
Введите интенсивность N для фазы 1: 925
Введите длину В для фазы 1: 12
Введите длительность  $t_n$  для фазы 1: 3
925.0 12.0 3.0 1.85 0.4
Введите интенсивность N для фазы 2: 578.125
Введите длину В для фазы 2: 20
Введите длительность  $t_n$  для фазы 2: 4
578.125 20.0 4.0 1.85 0.25
Введите текущее время суток: 15
Стартовая длина цикла: 44.29 с.
Фаза 1 удовлетворяет условиям для пешеходов (12.0).
t в расчетах расстояния и скорости = 22.95
Внимание: Фаза 2 требует увеличения времени для пешеходов (20.0).
Времени 14.34 не хватает
t в расчетах расстояния и скорости = 20.38
OPTIMAL AND CORRECTED Tcor = 53.61
Оптимизированный цикл: 53.61 с.
```

Рис. 3. Входные данные для оптимизации светофорного цикла

На первом шаге в приложении определяется оптимальное время для основного такта (зеленого света) пешеходного светофора для оптимальной настройки всего светофорного цикла. Во второй фазе 14 с для основного такта (зеленого света) явно недостаточно для перехода пешеходов на другую сторону, поэтому необходимо время увеличить, что приведет к увеличению всего цикла, чтобы не создавать пробок для ТС.

Приложение позволяет задавать и настраивать интенсивность дорожного и пешеходного трафика в зависимости от времени суток и выполнять адаптивную настройку основных тактов светофора с учетом данного параметра. Для каждой фазы светофора по направлениям параметр интенсивности задается для двух пиковых периодов времени – утреннего (7:00-10:00) и вечернего (17:00-19:00), обычных периодов – дневного (10:00-17:00) и вечернего (19:00-23:00), ночного периода (23:00-7:00). Для пиковых периодов экспериментально установлено, что на данном светофорном объекте в утренний период интенсивность увеличивается в 1,25 раза, в вечерний период интенсивность увеличивается в 2 раза, а в ночной период снижается в 0,5 раз по сравнению с обычной интенсивностью в дневное время.

Алгоритм расчета реализован в виде скрипта, который в статье не приводится из-за его объема. Приведем псевдокод и краткое описание основных этапов работы.

Псевдокод:

ВВОД количествоПолос, количествоФаз

Для каждой фазы:

ВВОД интенсивность, длинаПешеходногоПерехода, промежуточныйТакт

ЕСЛИ количествоПолос = 1, ТО потокНасыщения = 1250

ИНАЧЕ ЕСЛИ количествоПолос = 2, ТО потокНасыщения = 1250 \* 1,85

ИНАЧЕ ЕСЛИ количествоПолос = 3, ТО потокНасыщения = 1250 \* 2,55

ИНАЧЕ потокНасыщения = 1250 \* 3,05

фазовыйКоэффициент = интенсивность/потокНасыщения  
длительностьЦикла = (1,5 \* СУММА(промежуточныйТакт) + 5)/(1 – СУММА(фазовыйКоэффициент))

Для каждой фазы:

длительностьОсновногоТакта = ((длительностьЦикла – СУММА(промежуточныйТакт)) \* фазовыйКоэффициент)/(СУММА(фазовыйКоэффициент))

длительностьОсновногоТактаПешехода = (длинаПешеходногоПерехода/1,3) + 5

A = 2,5 \* СУММА(промежуточныйТакт) - СУММА(промежуточныйТакт) \* (СУММА(фазовыйКоэффициент) + СУММА(длительностьОсновногоТакта) + 5

B = 1 – (СУММА(фазовыйКоэффициент)

корректируемаяДлительностьЦикла = (A/2 \* B) + КОРЕНЬ((КВАДРАТ(A)/4 \* КВАДРАТ(B)) – (((СУММА(промежуточныйТакт) + СУММА(длительностьОсновногоТакта)) \* ((1,5 \* СУММА(промежуточныйТакт)) + 5))/B)

длительностьОсновныхТактов = (СУММА(длительностьОсновногоТакта) – СУММА(промежуточныйТакт))/(СУММА(длительностьОсновногоТакта) – 1,5 \* СУММА(промежуточныйТакт) – 5).

На этапе ввода данных алгоритм присваивает переменным введённые значения для количества полос и для количества фаз:

```
num_lanes = int(input("Введите количество полос: "))
```

```
num_phases = int(input("Введите количество фаз: "))
```

```
phases_traffic = []
```

Далее, исходя из количества фаз, пользователь может ввести значения для задания интенсивности фазы, длины пешеходного перехода и начальной длительности промежуточного такта работы светофора:

```
for i in range(num_phases):
    N = float(input(f"Введите интенсивность N для фазы {i + 1}: "))
    V = float(input(f"Введите длину V для фазы {i + 1}: "))
    tn = float(input(f"Введите длительность tn для фазы {i + 1}: "))
```

На втором этапе алгоритм рассчитывает фазовый коэффициент направления относительно заданной пользователем интенсивности и коэффициентов для четырех возможных полос  $k_n$ :

```
kn = {1: 1, 2: 1,85, 3: 2,55, 4: 3,05}[num_lanes]
y = N/(1250 * kn)
```

После расчета информация выводится на экран для проверки. Так как алгоритм учитывает время суток, то для показателей интенсивности с учетом сезонности применяется коррекция относительно текущего времени в 24-часовом формате.

На третьем этапе происходит расчёт исходного цикла регулировки. Здесь создается объект класса `TrafficSignalOptimizer`, в который передаются заданные переменные в виде словаря, а также пустые списки для уточненных и неуточненных показателей. После передачи данных производятся расчёты первоначального неуточнённого цикла регулировки. В ходе начального расчёта цикла находятся длительности тактов зелёного сигнала. Затем проводится суммирование известных длительностей, чтобы проверить корректность расчета первоначального цикла регулировки:

```
traffic_optimizer = TrafficSignalOptimizer(
    phases_traffic, num_lanes, phases_concr_t, phases_nonconcr_y)
original_duration = traffic_optimizer.calculate_cycle_duration()
Method «calculate_cycle_duration()»:
def calculate_cycle_duration(self):
    Tn = sum(phase["tn"] for phase in self.phases)
    sum_yi = sum(phase["y"] for phase in self.phases)
    T = (1,5 * Tn + 5)/abs(1 - sum_yi)
    for phase in self.phases:
        phase["t"] = phase["y"] * (((T - Tn) * T)/(T - 1,5 * Tn - 5))
```



```
original_cycle_duration = sum(phase["t"] + phase["tn"] for  
phase in self.phases)  
return original_cycle_duration
```

Стартовая длина цикла выводится на экран.

На четвёртом этапе для каждой фазы в цикле проводятся расчёты времени, необходимого пешеходам для прохождения перехода. Для этого используются заданные длины пешеходных переходов во всех направлениях, а средняя скорость пешехода принимается как 1,3 м/с. Если в ходе расчета длительность получается меньше длительности такта зелёного сигнала, то длительность такта зелёных сигналов записывается в список неуточнённой длительности. Если длительность такта зелёного сигнала окажется меньше, чем расчётная длительность относительно расстояния и скорости, то её значение используется вместо первоначальной длительности такта зелёного сигнала. Полученный результат записывается в список для уточнённых значений:

```
for phase in traffic_optimizer.phases:  
    B = phases_traffic[i]["B"]  
    traffic_optimizer.single_check_pedestrian_crossing_time(B, i)  
    t = traffic_optimizer.phases[i]["t"]  
    print(f"t в расчетах расстояния и скорости = {t:.2f}")  
    i += 1
```

На последнем этапе для новых уточнённых и неуточнённых длительностей тактов зелёных сигналов запускается алгоритм оптимизации «optimize\_cycle\_duration()», чтобы скорректировать их длительность:

```
optimized_duration = traffic_optimizer.optimize_cycle_duration()  
print(f"Оптимизированный цикл: {optimized_duration:.2f} с.")  
Method «optimize_cycle_duration()»:  
def optimize_cycle_duration(self):  
    Tn = sum(phase["tn"] for phase in self.phases)  
    sum_yi = sum(phase["y"] for phase in self.phases_nonconcr_y)  
    A = (  
        2,5 * Tn  
        - Tn * sum_yi  
        + sum(phase["t"] for phase in self.phases_concr_t)  
        + 5  
    )
```

```

b = abs(1 - sum_yi)
Tcor = (A/ (2 * b)) + (
    A**2/(4 * b**2)
    - ((Tn + sum(phase["t"] for phase in self.phases_concr_t)) *
(1,5 * Tn + 5))
    / b
) ** 0,5
print(f"OPTIMAL AND CORRECTED Tcor = {Tcor:.2f}")
Kcor = (Tcor - Tn)/(Tcor - 1,5 * Tn - 5)

```

Приведем пример расчётов длительностей тактов светофорного цикла. Пусть  $y_1 = 0,4$ ;  $y_2 = 0,25$ ;  $t_{n1} = 3$  с;  $t_{n2} = 4$  с. Длительность цикла составляет 2 фазы, а коэффициент полос = 1,85.

Тогда:

$$(12) T_n = 4 + 3 = 7 \text{ с,}$$

$$(13) T = \frac{(1,57+5)}{(1-(0,4+0,25))} = 44 \text{ с,}$$

$$(14) t_1 = 0,4 \cdot \left( \frac{\left(\left(\frac{4}{7}\right) \cdot 44\right)}{(44-1,5 \cdot 7-5)} \right) = 23 \text{ с,}$$

$$(15) t_2 = 0,25 \cdot \left( \frac{\left(\left(\frac{4}{7}\right) \cdot 44\right)}{(44-1,5 \cdot 7-5)} \right) = 14 \text{ с.}$$

Определим исходный цикл как:  $T = t_1 + t_{n1} + t_2 + t_{n2} = 23 + 3 + 14 + 4 = 44$  с.

Далее проверим достаточность длительности такта зеленых сигналов  $t_1$  и  $t_2$ . Время, необходимое для перехода дороги Б вдоль дороги А определим, как:  $t_{n1} = 5 + (12/1,3) = 14$  с. Видно, что  $t_{n1} = 14 < t_1 = 23$ .

Для перехода дороги А вдоль дороги Б определим:  $t_{n2} = 5 + (20/1,3) = 20$  с. Видно, что  $t_{n2} = 20 > t_2 = 4$  с. Согласно методике, принимаем уточненную длительность  $t_2 = 20$  с.

Определим скорректированную длительность цикла:  $A = 2,5 \cdot 7 - 7 \cdot 0,4 + 20 + 5 = 39,7$  с,  $B = 1 - 0,4 = 0,6$  с.

$$(16) T_{cor} = \left(\frac{39,7}{1,2}\right) + \sqrt{\left(\frac{39,7^2}{1,2^2}\right) - \frac{(7+20)(10,5+5)}{0,6}};$$

$$(17) T_{cor} = 33 + \sqrt{1089 - 700} = 33 + 19,7 = 52 \text{ с (округл.);}$$

$$(18) t_{cor1} = 0,4 \cdot \frac{(52-7) \cdot 52}{52-10,5-7} = 25,6 = 26 \text{ с (округл.).}$$

Окончательный цикл регулировки будет следующий:  
 $T_{cor} = 26 + 3 + 20 + 4 = 53$  с.

В результате расчета для двух фаз светофорного цикла мы получаем уточнённую длительность светофорного цикла, равную 53 секундам, которая включает уточнённую длительность такта зелёных сигналов и длительность промежуточного такта работы.

## **5. Заключение**

Актуальность разработки методики и инструментального средства автоматического расчета светофорного цикла обусловлена тем, что постоянный рост загрузки городской дорожной сети увеличивает задержки на светофорах, особенно в часы пик, число остановок, расход топлива, повышает вероятность дорожно-транспортных происшествий и нарушений ПДД. Задержки на светофорах являются причиной образования заторов и пробок. Транспортные пробки – один из наиболее негативных факторов современной городской среды. Целью исследований является создание методики расчета тактов светофорного цикла и приложения для автоматического управления работой адаптивного светофора.

В результате исследований разработана методика расчета, которая реализована в виде программного приложения для оптимизации цикла регулировки светофора, включающего в себя найденные и уточнённые длины тактов зелёных сигналов с учетом множества фаз. Алгоритм учитывает ширину дороги, длину пешеходного перехода, время суток, количество полос, интенсивность фазы, количество самих фаз, а также промежуточные такты работы. В дальнейшем предполагается реализовать отображение результатов расчета для различных светофоров на цифровой карте с привязкой к конкретным геопространственным координатам светофорных объектов. Основным ограничением данной версии приложения является максимально допустимое число фаз светофора не более 4. Однако использование приложения заметно упрощает процесс настройки адаптивных светофоров, так как программа производит расчёты и оптимизацию под каждую отдельно взятую дорожную ситуацию. Это позволяет

светофору в автоматическом режиме динамично изменять длительность цикла регулировки без стороннего вмешательства. Программное приложение достаточно универсально и не требует дополнительной настройки в зависимости от типа светофора, модели перекрестка или дорожной ситуации. Приложения разработано для применения в качестве компонента интеллектуальной системы мониторинга и управления в дорожно-транспортной среде [20, 19].

### Литература

1. АНТОНИАДИ Г.Д., АРХИПОВ В.О., ЦУПРИКОВ А.А. *Анализ модели задержки Вебстера* // Ежемесячный научный журнал «Евразийский союз учёных». – 2018. – №11(56), ч. 9. – С. 6–12.
2. АНТОНИАДИ Г.Д., АРХИПОВ В.О., ЦУПРИКОВ А.А. *Математическая модель задержки автотранспорта на регулируемом перекрёстке* // Информационные технологии. – 2019. – Т. 25, №4. – С. 210–215.
3. БЕКЛАРЯН А.Л., БЕКЛАРЯН Л.А., АКОПОВ А.С. *Имитационная модель интеллектуальной транспортной системы «умного города» с адаптивным управлением светофорами на основе нечеткой кластеризации* // Бизнес-информатика. – 2023. – Т. 17, № 3. – С. 70–86.
4. БЕЦКОВ А.В., ДИВЕЕВ А.И., СОФРОНОВА Е.А. *Об интеллектуальной транспортной системе в больших городах* // Труды международного симпозиума «Надёжность и качество». – 2021. – Т. 1. – С. 295–298.
5. БОРОВСКОЙ А.Е., ШЕВЦОВА А.Г. *Методика выбора рационального режима работы светофорного объекта на автомобильном транспорте* // Трансп.: Наука, техн., упр./ ВИНТИ РАН. – 2012. – №6. – С. 50–53.
6. *ГОСТ Р 52282-2004 — Технические средства организации дорожного движения. Светофоры дорожные. Типы и основные параметры. Общие технические требования. Методы испытаний.* – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200038801> (дата обращения: 01.09.2024).

7. *Методические рекомендации по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения. Использование программных продуктов математического моделирования транспортных потоков при оценке эффективности проектных решений в сфере организации дорожного движения.* – М.: Минтранс РФ, 2017. – 72 с. – URL: <https://mintrans.gov.ru/file/404538> (дата обращения: 09.09.2024).
8. НАУМОВА Н.А., ДОМБРОВСКИЙ А.Н., ДАНОВИЧ Л.М. *Метод управления светофорной сигнализацией в условиях функционирования интеллектуальных транспортных систем // Фундаментальные исследования.* – 2017. – №9-1. – С. 64–68.
9. *Отраслевой дорожный методический документ ОДМ 218.4.005-2010. Рекомендации по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах.* – М., 2011. – URL: <https://irtechnologies.ru/assets/odm-218.4.005-2010.pdf> (дата обращения: 09.09.2024).
10. *Отраслевой дорожный методический документ ОДМ 218.6.003–011. Методические рекомендации по проектированию светофорных объектов на автомобильных дорогах.* – М., 2011. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293771/4293771345.pdf> (дата обращения: 09.09.2024).
11. СУЛИЦКИЙ М.В., ЗЕЛЕНСКИЙ И.С., САДОВНИКОВА Н.П. и др. *Разработка интеллектуальной системы распознавания объектов для решения задач ситуационного управления в городе // Современные наукоемкие технологии.* – 2023. – № 7. – С. 104–109.
12. ТИМОФЕЕВА О.П., МАЛЫШЕВА Е.М., СОКОЛОВА Ю.В. *Проектирование интеллектуальной системы управления светофорами на основе нейронной сети // Современные проблемы науки и образования.* – 2014. – №6. – URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=16496> (дата обращения: 01.09.2024).
13. ПАРЫГИН Д.С., БУРОВ С.С., АНОХИН А.О. и др. *Платформа для моделирования массовых перемещений объектов и субъектов в условиях городской среды // Программные продукты и системы.* – 2021. – Т. 34, №2. – С. 354–364. – URL: <http://www.swsys.ru/files/2021-2/354-364.pdf>.

14. AGRAWAL A., PAULUS R. *Intelligent traffic light design and control in smart cities: a survey on techniques and methodologies* // Int. Journal of Vehicle Information and Communication Systems. – 2020. – Vol. 5, No. 4. – P. 436–481.
15. ANDRIYANOV N.A., DEMENTIEV V.E., TASHLINSKII A.G. *Detection of objects in the images: from likelihood relationships towards scalable and efficient neural networks* // Computer Optics. – 2022. – Vol. 46, No. 1. – P. 139–159.
16. BEEVI S., PRATHAP J., GOWTHAM N. et al. *Efficient Traffic Flow Management System Using Ai-Powered Traffic Lights in DEEP Learning* // Int. Journal of Emerging Technologies and Innovative Research. – 2023. – Vol. 10, No. 11. – P. 514–521. – URL: <http://www.jetir.org/papers/JETIR2311467.pdf>.
17. BOUKTIF S., CHENIKI A., OUNI A. et al. *Traffic Signal Control Based on Deep Reinforcement Learning with Simplified State and Reward Definitions* // 4th Int. Conf. on Artificial Intelligence and Big Data (ICAIBD-2021), Chengdu, China. – IEEE, 2021. – P. 253–260.
18. DUSHKIN R.V. *Thematic Review of the Association of Traffic Engineers: Adaptive Traffic Management Systems and Road Controllers*. – 2017. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/324154125\\_Thematic\\_Review\\_of\\_the\\_Association\\_of\\_Traffic\\_Engineers\\_Adaptive\\_Traffic\\_Management\\_Systems\\_and\\_Road\\_Collectors](https://www.researchgate.net/publication/324154125_Thematic_Review_of_the_Association_of_Traffic_Engineers_Adaptive_Traffic_Management_Systems_and_Road_Collectors).
19. FINOGEEV A.G., FINOGEEV A.A., FIONOVA L.R. *Intelligent monitoring system for smart road environment* // Journal of Industrial Information Integration. – 2019. – Vol. 15. – P. 15–20.
20. FINOGEEV A.G., BERSHADSKY A.M., FINOGEEV A.A. et al. *Multiagent Intelligent System of Convergent Sensor Data Processing for the Smart&Safe Road* / Chatchawal Wongchoosuk (eds.) // Intelligent System. – IntechOpen. – 2018. – Chapter 5. – P. 102–121. – URL: <https://www.intechopen.com/books/intelligent-system/multiagent-intelligent-system-of-convergent-sensor-data-processing-for-the-smart-safe-road>.
21. GAO J., SHEN Y., LIU J. et al. *Adaptive Traffic Signal Control: Deep Reinforcement Learning Algorithm with Experience Replay and Target Network* // ArXiv abs/1705.02755. – 2017.

22. LIANG X., DU X., WANG G. et al. *A Deep Reinforcement Learning Network for Traffic Light Cycle Control* // IEEE Trans. on Vehicular Technology. – 2019. – Vol. 68, No. 2. – P. 1243–1253.
23. LIU D., LI L. *A traffic light control method based on multi-agent deep reinforcement learning algorithm* // Scientific Reports. – 2023. – Vol. 13, No. 1. – P. 9396.
24. MAHIMA K.T.Y., ABEYGUNAWARDANA R.A.B., GINIGE T.N.D.S. *Dynamic Traffic Light Controlling System Using Google Maps and IoT* // From Innovation to Impact (FITI-2020). – IEEE, 2020. – Vol. 1. – P. 1–5.
25. OSIPOV A., PLESHAKOVA E., GATAULLIN S. et al. *Deep Learning Method for Recognition and Classification of Images from Video Recorders in Difficult Weather Conditions* // Sustainability. – 2022. – Vol. 14, No. 4. – P. 2420.
26. PARYGIN D., FINOGEEV A. *Management of Information from Surveillance Cameras at the Infrastructure Facility* // New Trends and Applications in Internet of Things (IoT) and Big Data Analytics. – Cham: Springer International Publishing, 2022. – P. 173–186.
27. RANYAL E., SADHU A., JAIN K. *Road condition monitoring using smart sensing and artificial intelligence: A review* // Sensors. – 2022. – Vol. 22, No. 8. – P. 3044.
28. ROBERTSON D.I., BRETHERTON R.D. *Optimizing networks of traffic signals in real time – the SCOOT method* // IEEE Trans. on Vehicular Technology. – 1991. – Vol. 40, No. 1. – P. 11–15.
29. SHEN X., CHEN Y.C., TAO X. et al. *Convolutional neural pyramid for image processing* // arXiv preprint arXiv:1704.02071. – 2017.
30. SUN H., SUN Y., YU B. *Applications on Deep Reinforcement Learning in Traffic Signal Control* // IEEE 4th Int. Conf. on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT-2022). – IEEE, 2022. – P. 680–685.
31. WEBSTER F.V. *Traffic Signal Settings* // Road Research Technical Paper. – 1958.
32. ZHANG Y., HUANG G. *Traffic flow prediction model based on deep belief network and genetic algorithm* // IET Intelligent Transport Systems. – 2018. – Vol. 12, No. 6. – P. 533–541.

33. ZHOU C., LIU S., LI X. et al. *An Intelligent Traffic Signal Control System Based on Deep Reinforcement Learning* // Information Communication Technologies Conference (ICTC-2020). – IEEE, 2020. – P. 255–259.

## **METHODOLOGY AND TOOLS FOR OPTIMIZING THE DURATION OF THE TRAFFIC LIGHT CYCLE**

**Alexander Grushevsky**, Penza State University, Penza, Russia, PhD student (sgrushevskii@mail.ru).

**Ekaterina Ilyinskaya**, Penza State University, Penza, Russia, Master's Degree student (ilinskaya58k@mail.ru).

**Anton Finogeev**, Penza State University, Penza, Russia, PhD in Engineering, Associate Professor (fantom3@yandex.ru).

*Abstract: One of the main elements of traffic and pedestrian flow control in the road environment is traffic light regulation. Automation of traffic light regulation allows calculating the optimal modes of its operation in order to reduce delays in traffic and waiting time for vehicles to pass through intersections, and reduce the likelihood of traffic jams. The result is increased road safety and sustainability of the urban transport system. The article considers the development of a model, methodology, and tool for calculating the optimal traffic light cycle steps. The relevance of the article is due to the fact that the growth of road traffic reduces the efficiency of vehicle use, increases the time of delays and stops, fuel consumption, and increases the number of traffic accidents and violations. The object of the study is an adaptive traffic light control system at intersections. The purpose of the study is to analyze and develop a mathematical model and methodology for calculating traffic light cycle steps depending on current traffic conditions at intersections in order to reduce the waiting time of vehicles and pedestrians. The result of the research is a developed software application that implements the proposed method for calculating the optimal duration of the traffic light cycle depending on the intensity of automobile and pedestrian traffic and the length of the queue.*

**Keywords:** pedestrian flow, traffic light cycle, adaptive traffic light, intelligent traffic light, traffic intensity, traffic light cycle model.

УДК 656.1 + 004.94

ББК 39.37

*Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии А.К. Погодаевым.*

*Поступила в редакцию 16.10.2024.*

*Опубликована 31.01.2025.*