

Научная статья
УДК 656.05
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-306-315>
EDN: PTDOLT



РАЗРАБОТКА МЕТОДА АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СВЕТОФОРНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ ГОРОДСКИХ ПЕРЕКРЁСТКОВ НА ОСНОВЕ НАВИГАЦИОННЫХ ДАННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

А.Т. Саргсян

Фонд «Дорожный департамент»,
г. Ереван, Армения
artan-sargsyan-97@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В условиях устойчивого роста автомобилизации и увеличения нагрузки на улично-дорожную сеть крупных городов возникает необходимость совершенствования методов управления регулируемы-ми перекрёстками. Традиционные системы светофорного регулирования, основанные на фиксированных программах либо данных локальных детекторов, обладают ограниченной адаптивностью и не всегда обеспечивают эффективное распределение пропускной способности при изменяющихся транспортных потоках. Целью настоящего исследования является разработка метода адаптивного управления светофорным регулированием городских перекрёстков на основе навигационных данных транспортных средств.

Материалы и методы. В работе использованы данные, поступающие от навигационных устройств транспортных средств, включая координаты, скорость и направление движения. Методология исследования основана на прогнозировании ожидаемого количества транспортных средств, подходящих к перекрёстку по каждому направлению, и оценке времени их прибытия. Управление параметрами светофорного цикла осуществляется в дискретных расчётных интервалах продолжительностью 15 мин с учётом временной неопределённости подхода транспортных средств. Для повышения устойчивости управления предложен механизм взвешивания, позволяющий корректно учитывать транспортные средства, прибывающие вблизи границ расчётных интервалов, а также остаточные очереди предыдущих периодов.

Результаты. Результаты исследования показывают, что применение разработанного метода обеспечивает более сбалансированное распределение продолжительности зелёных фаз пропорционально ожидаемой нагрузке направлений движения, что способствует повышению пропускной способности перекрёстков и снижению задержек транспортных средств. Предлагаемый подход ориентирован на использование в рамках государственных систем управления дорожным движением и не требует установки дополнительных детекторов или средств видеофиксации.

Обсуждение и заключение. Практическая ценность работы заключается в возможности внедрения метода при проектировании и модернизации светофорных объектов в крупных городах. Оригинальность исследования состоит в использовании прогнозно-ориентированного подхода к адаптивному управлению светофорами на основе навигационных данных, что расширяет возможности существующих систем управления дорожным движением.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дорожное движение, навигационные данные, эффективное управление, адаптивное управление светофорами, городское движение, прогнозирование транспортных потоков, интеллектуальные транспортные системы, пропускная способность, перекрёсток, оптимизация трафика, технические решения

Статья поступила в редакцию 12.01.2026; одобрена после рецензирования 04.02.2026; принята к публикации 17.04.2026.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

© Саргсян А.Т., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Саргсян А.Т. Разработка метода адаптивного управления светофорным регулированием городских перекрёстков на основе навигационных данных транспортных средств // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 2. С. 306-315. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-306-315>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-306-315>

EDN: PTDLT

DEVELOPMENT OF METHOD FOR ADAPTIVE TRAFFIC LIGHT CONTROL AT URBAN INTERSECTIONS BASED ON VEHICLE NAVIGATION DATA

Arman T. Sargsyan

Road Department Fund,

Yerevan, Armenia

arman-sargsyan-97@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. Under conditions of sustained growth in motorization and increased loads in urban road networks of large cities, there is a need to improve control methods for signalized intersections. Traditional traffic signal control systems based on fixed timing plans or data obtained from local detectors demonstrate limited adaptability and do not always ensure efficient distribution of intersection capacity under variable traffic flow conditions. The purpose of this study is to develop a method for adaptive traffic signal control at urban intersections based on vehicle navigation data.

Materials and Methods. The study uses data obtained from vehicle navigation devices, including coordinates, speed, and direction of movement. The proposed methodology is based on forecasting the expected number of vehicles approaching an intersection from each traffic direction and estimating their arrival times. Traffic signal control parameters are adjusted within discrete calculation intervals of 15 minutes, taking into account the temporal uncertainty of vehicle arrivals. To improve control stability, a weighting mechanism is introduced, leading to correct record of vehicles arriving within the calculation intervals, as well as residual queues from previous periods.

Results. The results of the study have demonstrated that the application of the proposed method ensures a more balanced distribution of green signal timing in proportion to the expected load of traffic directions, which contributes to increased intersection capacity and reduced vehicle delays. The proposed approach is intended for use within governmental traffic management systems and does not require the installation of additional detectors or video surveillance equipment.

Discussion and conclusion. The practical significance of the study lies in the possibility of implementing the developed method in the design and modernization of traffic signal control systems in large cities. The research novelty refers to the application of a forecast-oriented approach to adaptive traffic signal control based on navigation data, which expands the capabilities of existing traffic control systems.

KEYWORDS: traffic, navigation data, efficient management, adaptive traffic light control, urban traffic, traffic flow forecasting, intelligent transport systems, capacity, intersection, traffic optimization, technical solutions

The article was submitted: January 12, 2026; approved after reviewing: February 04, 2026; accepted for publication: April 17, 2026.

The author has read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Sargsyan A.T. Development of method for adaptive traffic light control at urban intersections based on vehicle navigation data. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (2): 306-315. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-306-315>

© Sargsyan Arman T., 2026



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Эффективное управление транспортными системами в современной городской среде является одним из основных условий обеспечения устойчивого развития и мобильности населения. Резкое увеличение количества транспортных средств увеличивает нагрузку на улично-дорожную сеть, вероятность возникновения заторов на перекрёстках и увеличивает задержки транспортных средств. В результате снижается пропускная способность дорожной сети, возрастают расходы на топливо и вредные выбросы, а также ухудшается уровень безопасности дорожного движения [1, 2, 3].

Традиционные системы управления, основанные на заранее заданных программах работы светофорных объектов либо на данных, получаемых от ограниченного числа детекторов, не обеспечивают оптимизацию дорожного движения в условиях динамично изменяющейся транспортной обстановки. В этих условиях возникает необходимость в разработке методов управления, обеспечивающих более гибкое и адаптивное регулирование транспортных потоков.

В таких плотно застроенных и динамично развивающихся городах, как Ереван, требуется внедрение современных технических решений, обеспечивающих получение данных о транспортных потоках и оптимизацию режимов работы светофорных объектов¹. Существенный интерес для формирования подобной системы представляет использование данных бортовых навигационных устройств транспортных средств. В настоящее время в г. Ереване отсутствует система управления светофорным регулированием, использующая навигационные данные транспортных средств для прогнозирования подходов потоков к перекрёсткам. В связи с этим разработка и обоснование соответствующего метода управления представляет практический интерес для условий городской улично-дорожной сети г. Еревана.

В отличие от навигационных сервисов, ориентированных на индивидуальную маршрутизацию транспортных средств, в данной работе навигационные данные рассматриваются как источник прогнозной информации о подходах транспортных средств к перекрёсткам и ис-

пользуются для формирования управляющих воздействий на уровне светофорных объектов.

Таким образом, формируется информационная основа для оценки ожидаемой интенсивности движения, распределения транспортных потоков по направлениям и уровня загрузки перекрёстков без необходимости установки дополнительных детекторов или видеокамер.

Предлагаемый подход предусматривает мониторинг транспортных потоков, их прогнозирование и адаптацию тактов светофорных объектов на основе динамически изменяющихся данных. Реализация данного подхода позволяет:

- повысить пропускную способность перекрёстков;
- сократить транспортные задержки;
- снизить расход топлива и объём выбросов;
- обеспечить централизованный мониторинг параметров транспортных потоков.

В работе предлагается алгоритм адаптивного управления светофорным регулированием, основанный на распределении длительности фаз светофорного цикла по прогнозируемому количеству транспортных средств, приближающихся к перекрёстку. Отличительной особенностью алгоритма является учет временной неопределенности прибытия транспортных средств при формировании управляющих воздействий в расчётных интервалах продолжительностью 15 мин. Адаптация режимов работы светофорных объектов осуществляется в дискретных расчётных интервалах, что обусловлено характером изменения интенсивности движения, при котором существенные колебания параметров транспортного потока проявляются, как правило, в интервалах порядка 15 мин.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В настоящей работе предлагается метод адаптивного управления светофорными перекрёстками, основанный на использовании навигационных данных транспортных средств, содержащих информацию о прогнозируемом времени их прибытия к перекрёсткам. В рамках рассматриваемой концепции предполагается, что навигационные устройства транспортных средств находятся под контролем

¹ Спектр ПДД. История создания и развития организации дорожного движения. <http://spectr-pdd.ru/istoricheskaya-statya#history-BDD> (дата обращения: 10.10.2025).

государственных органов и используются в составе централизованной системы мониторинга транспортных потоков. В отличие от существующих систем, осуществляющих управление движением на основе данных локальных детекторов или средств видеонаблюдения, предложенная модель базируется на прогнозировании ожидаемых подходов транспортных средств по каждому направлению движения.

При этом в качестве исходных данных используются прогнозируемые значения количества транспортных средств, которые достигнут перекрёстка в заданном расчётном интервале, а не фактически измеренные запаздывающие показатели интенсивности движения. Указанный подход позволяет заблаговременно реагировать на изменения дорожной обстановки и обеспечивать прогнозируемую и устойчивую оптимизацию светофорных циклов. Сбор данных осуществляется с помощью навигационных устройств, бесплатно предоставляемых водителям, которые устанавливают связь с центральным сервером с использованием мобильных сетей связи 4G/5G. Устройства оснащены GPS-модулями, регистрирующими координаты транспортного средства, скорость движения, направление и частоту остановок с интервалом 5–10 сек. Передача данных осуществляется в зашифрованном виде, что обеспечивает защиту персональных данных водителей [4, 5].

Собранная информация централизуется в единой базе управления дорожным движением, где осуществляется её обработка, классификация и моделирование. Система проектируется таким образом, чтобы обеспечивать оценку текущего состояния перекрёстков и автоматическую адаптацию режимов работы светофорных объектов на основе данных о транспортных потоках в режиме реального времени. Предлагаемая система включает следующие основные подсистемы.

1. Навигационный модуль (на борту транспортных средств):

- оборудование GPS + GSM;
- частота регистрации данных – 0,2 Гц (каждые 5 сек);
- типы данных: координаты (x, y), скорость (v), направление движения (φ), текущий маршрут (r).

2. Центральная управляющая база (Data Processing Unit):

- подсистема приёма данных;
- модуль классификации транспортных потоков;

- алгоритмы прогнозирования потоков и оптимизации режимов работы светофорных объектов.

3. Подсистема управления светофорами (Adaptive Traffic Controller):

- связь со всеми регулируемыми перекрёстками;
- возможность изменения продолжительности циклов в зависимости от текущего уровня загрузки без прерывания работы системы;
- наличие резервного программного обеспечения.

Моделирование транспортных потоков основано на взаимосвязи средней интенсивности (N), скорости (v) и плотности (q) в соответствии с классическим соотношением [6].

$$N = q \cdot v. \quad (1)$$

Каждые 15 мин формируются временно усреднённые значения для транспортных потоков, подходящих к каждому перекрёстку. Если $N_i(t)$ – количество транспортных средств, приближающихся по i -му направлению за рассматриваемый временной интервал, то коэффициент загрузки перекрёстка определяется следующим образом [7]:

$$B = \frac{N_i(t)}{P_i}, \quad (2)$$

где P_i – пропускная способность по данному направлению (ед./ч).

Алгоритм управления учитывает весь диапазон значений коэффициента загрузки B . При малых значениях B (например, $B < 0,5$) длительность зелёных фаз сокращается во избежание неэффективных простоев, а при приближении B к критическому уровню ($B > 0,85$) приоритет перераспределяется в пользу перегруженных направлений движения.

Аналогичные интеллектуальные системы обеспечивают формирование значительных данных о транспортных потоках, используемых для прогнозирования дорожной обстановки [8]. В системе также реализован модуль прогнозирования ожидаемых потоков, который рассчитывает интенсивность движения на последующие 10–15 мин на основе следующих факторов:

- динамика текущей интенсивности;
- повторяющихся закономерностей по дням недели;
- влияния погодных условий и временной зоны.

Модель прогнозирования строится на принципах машинного обучения (machine learning) с использованием комбинации регрессионных и нейронных методов (MLP, LSTM) в обобщённом виде, что позволяет обеспечить точность прогноза на уровне 90–95% [9]. Методы машинного обучения рассматриваются как статистические модели, применяемые для классификации и прогнозирования на основе данных. Машинное обучение является областью искусственного интеллекта, ориентированной на разработку предиктивных алгоритмов и направленной на выявление закономерностей в больших массивах данных [10, 11].

В предлагаемой системе методы машинного обучения используются для прогнозирования ожидаемых потоков транспортных средств на 15 мин. Формирование управляющих воздействий на светофорные объекты осуществляется на основе детерминированной модели оптимизации длительности фаз светофорного цикла. Такой подход позволяет сочетать адаптивность прогнозных моделей и устойчивость классических алгоритмов управления.

Данные по всем перекрёсткам интегрируются в единую геоинформационную систему (GIS), в которой интенсивность движения представляется в виде картографической визуализации. Геоинформационный подход позволяет осуществлять оценку транспортных рисков не только на основе статистических показателей, но и посредством комплексного анализа их пространственного распределения. Результаты геоинформационного мониторинга используются для повышения качества пространственной оценки рисков, что позволяет выявлять пространственные закономерности загрузки, аварийности, задержек и заторов [12, 13]. Данный подход позволяет идентифицировать зоны повышенного риска, оценить их влияние на общую эффективность дорожного движения и формировать пространственно-ориентированные управленческие решения. Кроме того, использование геоинформационной системы обеспечивает следующие функциональные возможности:

- наблюдать зоны загрузки в режиме реального времени;
- выбирать маршруты, минимизирующие среднее время поездки;
- обеспечивать обмен данными между городской транспортной системой, службами скорой помощи, общественными и другими учреждениями.

Использование средств видеofиксации и сверточных нейронных сетей для оценки интенсивности движения является перспективным направлением исследований, однако требует развертывания дорогостоящей инфраструктуры и характеризуется зависимостью от погодных условий и освещённости. В рамках данной работы рассматривается альтернативный подход, основанный на использовании навигационных данных транспортных средств, не требующий установки дополнительных датчиков и камер. Предлагаемый метод не исключает возможности интеграции с иными источниками данных в составе комплексной интеллектуальной транспортной системы.

База данных хранится в среде PostgreSQL + PostGIS, при этом объём информации на каждое транспортное средство не превышает 10 МБ в сутки. Для парка до 100 000 автомобилей общий поток данных составляет примерно 1 ТБ в сутки, что технически реализуемо в рамках государственной серверной инфраструктуры [14, 15].

Оптимизация циклов светофоров осуществляется на двух уровнях:

1. Локальная оптимизация (Local Optimization): система управления каждым перекрёстком рассчитывает интенсивность потоков, подчиняющихся ему, и самостоятельно определяет новую продолжительность цикла на основе следующего принципа:

$$T_{z,i} = \frac{N_i}{\sum N_i} \times T_{ц}, \quad (3)$$

где $T_{z,i}$ – продолжительность зелёного сигнала по i -му направлению; $T_{ц}$ – продолжительность цикла; N_i – интенсивность транспортного потока по i -му направлению; $\sum N_i$ – суммарная интенсивность по всем направлениям перекрёстка.

При наличии конфликтующих направлений движения перераспределение свободной части цикла осуществляется пропорционально значениям коэффициента загрузки по каждому направлению. В случае одновременной перегрузки нескольких направлений увеличение длительности зелёных фаз выполняется для всех данных направлений в относительных долях, что позволяет учитывать конфликтность потоков и обеспечивать сбалансированную пропускную способность перекрёстка без приоритизации только одного направления.

Продолжительность светофорного цикла формируется как результат перераспределения времени между всеми направлениями

движения в пределах одного расчётного интервала. Таким образом, адаптация режима работы перекрёстка осуществляется не для одного критического потока, а для совокупности направлений с учётом их текущей загрузки.

2. Централизованная оптимизация (Global Optimization): центральная база периодически объединяет данные смежных перекрёстков и формирует «координированное управление», что позволяет транспортным средствам проходить маршруты с постоянной скоростью, повышая среднюю скорость движения на 20–25% [16, 17].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Теоретическое значение предложенного подхода заключается в расширении классических моделей управления транспортными потоками за счёт интеграции навигационных данных. В то время как в традиционных теориях оценка потоков основывается на актуальных значениях интенсивности, скорости и плотности, данный метод включает также фактор прогнозируемого подхода, который становится возможным благодаря постоянному мониторингу цифровых навигационных данных. В результате формируется новая концепция управления на основе данных, сочетающая математическое моделирование и информационные технологии.

Затраты на внедрение навигационной системы управления и её эффективность оценивались на основе сравнительного анализа международного опыта с использованием средних значений, представленных в проектах транспортного управления. Стоимость навигационных систем транспортных средств варьируется от 40 до 80 долларов США и выше, в зависимости от модели, производителя и функциональности. Основные бюджетные модели стоят около 50–60 долл. США. В Ереване зарегистрировано около 300 000 транспортных средств. Таким образом, общая средняя стоимость устройств рассчитывается следующим образом:

$$C_1 = N \times P = 300,000 \times 55 = 16,500,000 \text{ долл. США.} \quad (4)$$

Согласно опыту программы Smart Mobility 2030 в Сингапуре, стоимость создания центра обработки данных о дорожном движении в режиме реального времени в среднем составляет 2–3 млн долл. США, включая серверы

хранения данных, программное обеспечение и подсистему сетевой безопасности. Для Еревана можно принять усреднённую стоимость $C_2=2,5$ млн долл. США. Количество регулируемых перекрёстков в городе составляет около 263 ед. [16]. Предположим, что наиболее загруженные участки составляют 50%. Средняя стоимость подключения управления каждого перекрёстка, включая модем связи и обновление контроллера, составляет 5 500 долл. США. Следовательно,

$$C_3 = 132 \times 5,500 = 726,000 \text{ долл. США.} \quad (5)$$

Общая стоимость инвестиций

$$C_{\text{total}} = C_1 + C_2 + C_3 = 16,5 + 2,5 + 0,726 = 19,726 \text{ млн долл. США.} \quad (6)$$

В области управления транспортом общепринято оценивать экономическую эффективность по трём показателям [18]:

1. сокращение задержек движения;
2. экономия топлива;
3. снижение выбросов CO_2 .

После внедрения адаптивного управления светофорами средние задержки сокращаются на 10–60% [19]. В Ереване годовое потребление топлива в транспортном секторе по увеличенным расчётам составляет около 200 млн л бензина. Международный опыт показывает, что внедрение автоматизированных систем позволяет сократить расход топлива на 8–33% [20]. Если благодаря системе удастся сократить неэффективные расходы топлива на 15 %, то

$$S_f = 200,000,000 \times 0,15 \times 1,3 = 39,000,000 \text{ долл. США/год,} \quad (7)$$

где 1,3 долл. за литр – средняя цена на бензин.

Однако весь эффект не может быть полностью отнесён на систему – он учитывается с коэффициентом 0,4 с учётом городского масштаба. То есть частный эффект за счёт системы составляет $0,4 \times 39,0 = 15,6$ млн долларов США в год. Таким образом, общие затраты на внедрение составляют 19,726 млн долларов США, а годовой эффект – около 15,6 млн долларов США, что обеспечивает

$$T_{\text{обрат}} = \frac{C_{\text{total}}}{S_f} = \frac{19,726}{15,6} \approx 1,3 \text{ год.} \quad (8)$$

Общие затраты на внедрение составляют 19,726 млн долл. США, а годовой экономиче-

ский эффект – 15,6 млн долларов США. При таких показателях срок окупаемости инвестиций составляет примерно 1,3 года, а годовая рентабельность инвестиций (ROI) – около 80%. После окупаемости система обеспечивает чистую экономическую прибыль в размере примерно 15,6 млн долл. США в год. После указанного периода инвестиции приносят стабильную прибыль, а накопительный ROI за 5 лет превышает 200%. В системах автоматизированного управления перекрёстками продолжительность зелёного сигнала может изменяться с определённой периодичностью в зависимости от количества транспортных средств, подходящих к данному участку. Этот метод предусматривает, что продолжительность зелёного сигнала (фаза) корректируется каждые 15 мин, а основой расчёта служит количество транспортных средств, подходящих к перекрёстку за этот 15-минутный интервал по направлениям. Такой принцип позволяет отражать стохастические флуктуации интенсивности транспортного потока в течение дня, не делая систему чрезмерно чувствительной или нестабильной. Навигационное устройство, установленное в каждом транспортном средстве, регистрирует следующие данные:

$$\{ID_i, t_i, x_i, y_i, V_i, \varphi_i\}, \quad (9)$$

где ID_i – идентификатор транспортного средства; t_i – заданное время фиксации; x_i, y_i – координаты транспортного средства; V_i – текущая скорость; φ_i – направление движения.

На основе этих данных рассчитывается D_i – расстояние от транспортного средства до перекрёстка (м) и, соответственно, оцененное время подхода транспортного средства T_i :

$$T_i = \frac{D_i}{V_i}. \quad (10)$$

Система делит данные за весь день на 15-минутные временные интервалы,

$$T_k = [t_k, t_k + 900) \text{ с}, \quad (11)$$

где каждый блок длится 900 сек (15 мин).

В течение каждого такого временного интервала рассчитывается количество транспортных средств, которые подойдут к данному перекрёстку в этот промежуток времени. Таким образом, для каждого направления получается

$$N_j^{(k)} = \sum_{i=1}^{n_j} [T_i \leq 900], \quad (12)$$

где $N_j^{(k)}$ – количество транспортных средств, подходящих к перекрёстку по j -му направлению в k -й 15-минутный интервал; T_i – оцененное время достижения перекрёстка данным транспортным средством в секундах.

Эти значения служат основой для определения продолжительности зелёного сигнала в данном временном интервале. Поскольку транспортные средства могут достигать перекрёстка не точно в пределах 15-минутного блока – некоторые немного раньше или позже – необходимо определить взвешенный подход для сглаживания влияния таких отклонений. Для этого вводится временной порог $\Delta = 30 - 60$ сек и задаётся вес для каждого транспортного средства:

$$w_i = \begin{cases} 1, & \text{если } T_i \leq 900 - \Delta, \\ \frac{900 - T_i}{2\Delta}, & \text{если } 900 - \Delta < T_i < 900 + \Delta, \\ 0, & \text{если } T_i \geq 900 + \Delta. \end{cases} \quad (13)$$

Таким образом, для каждого направления рассчитывается «взвешенное» количество ожидаемых транспортных средств по следующей формуле:

$$\tilde{N}_j^{(k)} = \sum_{i \in j} w_i. \quad (14)$$

Таким образом, мы избегаем ситуации, когда транспортные средства ошибочно учитываются в неверном временном блоке. Каждый новый 15-минутный интервал начинается с определённой остаточной очереди – $Q_j^{(kk)}$, представляющей количество транспортных средств, не обслуженных в предыдущем блоке. Эта очередь должна быть добавлена к ожидаемому потоку текущего блока.

$$N_{j, \text{все}}^{(k)} = Q_j^{(k)} + \tilde{N}_j^{(k)}. \quad (15)$$

Таким образом, для каждого направления общий ожидаемый поток в данном блоке равен сумме очереди, оставшейся с предыдущего блока, и транспортных средств, ожидаемых в течение текущего блока. Обозначим общую продолжительность цикла $T_{\text{ц}}$, количество тактов – m , минимальную продолжительность зелёного сигнала – $T_{\text{з}}$. мин. Сначала рассчитывается свободное распределяемое время:

$$T_{\text{ц, свободно}} = T_{\text{ц}} - m \cdot T_{\text{з}}, \quad (16)$$

где $T_{\text{ц, свободно}}$ – свободная часть цикла, подлежащая перераспределению между направлениями движения; $T_{\text{ц}}$ – общая продолжительность цикла светофорного регулирования; m – количество фаз (направлений движения); $T_{\text{з}}$ –

– минимально допустимая продолжительность зелёной фазы.

Затем продолжительность зелёного сигнала для каждого направления определяется пропорционально ожидаемому потоку:

$$T_{3,j}^{(k)} = T_{3,\text{мин}} + \frac{N_{j,\text{все}}^{(k)}}{\sum_{r=1}^n N_{r,\text{все}}^{(k)}} \cdot T_{\text{Ц,свободно}} \quad (17)$$

где $T_{3,j}^{(k)}$ – продолжительность зелёного сигнала по j -му направлению в данном 15-минутном интервале, $\sum_{r=1}^n N_{r,\text{все}}^{(k)}$ сумма количества транспортных средств, подходящих к перекрёстку по всем направлениям в интервале k .

Эта формула показывает, что каждое направление получает долю зелёного сигнала, пропорциональную количеству ожидаемых транспортных средств за 15-минутный интервал. Система каждые 15 мин (то есть через $t_k + 900$ сек) вновь проверяет навигационные данные, рассчитывает новые значения $N_j^{(k+1)}$ и по формуле (17) определяет новые $T_{3,j}^{(k+1)}$. Таким образом, перекрёсток получает самонастраивающийся цикл управления, который периодически корректируется в соответствии с фактической нагрузкой транспортного потока. Кроме того, если общий поток в данном блоке снижается (например, в ночное время), система поддерживает минимальное значение $T_{3,\text{мин}}$, обеспечивая минимально допустимую пропускную способность направления. Механизм взвешивания ($\Delta = 30\text{--}60$ сек) гарантирует, что раннее или позднее прибытие транспортных средств не приведёт к ошибкам в расчётах. В условиях городского движения неопределённость T_i формируется тремя основными факторами: ошибки измерений GPS ($\pm 10\text{--}25$ сек, $\sim 2\%$), задержки, обусловленные наличием красного сигнала на промежуточных регулируемых перекрёстках (в среднем $\pm 20\text{--}40$ сек), естественные колебания потока, связанные с режимами остановок, перестроениями и нестабильностью скорости (в среднем $\pm 15\text{--}20$ сек) [20,21].

Комбинация этих трёх источников показывает, что общая неопределённость T_i составляет примерно 30–60 сек. Следовательно, данный интервал служит оптимальным порогом, который предотвращает ошибочную классификацию транспортных средств, прибывающих на несколько десятков секунд раньше или позже, в пределах 15-минутных расчётных интервалов.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведённого исследования показывают, что предложенный метод на основе навигационных данных обеспечивает эффективную оптимизацию управления светофорами на перекрёстках в 15-минутных расчётных интервалах. Применение подхода позволяет корректировать продолжительность зелёного сигнала исходя из фактического числа транспортных средств, подходящих к перекрёстку в данный интервал, одновременно учитывая предельные отклонения транспортных средств, прибывающих раньше или позже. Анализ подтвердил, что такой подход обеспечивает сбалансированное обслуживание транспортных потоков и стабильную работу циклов светофоров, что снижает неравномерные очереди на перекрёстках и задержки транспортных средств. Полученные результаты показывают, что метод применим как для отдельных перекрёстков, так и для целых маршрутов, обеспечивая адаптивное управление городской транспортной системой в реальном времени.

Данные результаты могут быть использованы при проектировании систем адаптивного управления регулируемые перекрёстками в Ереване и других крупных городах, снижая необходимость установки дополнительных детекторов и обеспечивая управляемость на основе данных с высокой гибкостью на уровне государственной транспортной инфраструктуры.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Решетников Е.Б., Абрамова Л.С., Чернобаев Н.С., Ширин В.В. Анализ организации дорожного движения в центральной части города Харькова // Вестник ХНАДУ. 2005. Вып. 29. С. 116–122.
2. Vorobyev I., Zamytskih A.V., Golubchenko N.S., Vorobyeva T.V., Morozov D.Y. Ensuring the Accuracy of Digital Road Model Data to Increase Situational Awareness. 2021 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED), Moscow, Russian Federation, 2021, pp. 1-6, DOI:10.1109/TIRVED53476.2021.9639134
3. Саргсян А.Т. Ситуация дорожного движения в Ереване и пути модернизации с помощью автоматизированной системы управления дорожным движением // Вестник СибАДИ. 2024. 21 (3 (97)), 422–434. DOI:10.26518/2071-7296-2024-21-3-422-434
4. Аламир Х.С., Заргарян Е.В., Заргарян Ю.А. Интеллектуальная система контроля заторов на дорогах с использованием контролируемого алгоритма машинного обучения на базе адаптивного IOTN // Известия Южного федерального университета.

Технические науки. 2023. № 2 (232). С. 175–186. DOI: 10.18522/2311-3103-2023-2-175-186

5. Romanowska A, Jamroz K. Comparison of Traffic Flow Models with Real Traffic Data Based on a Quantitative Assessment // *Applied Sciences*. 2021; 11(21): 9914. DOI: 10.3390/app11219914

6. Лозовая Е.А., Терешкина О.А., Власова О.И. МЕТОДИКА Расчета пропускной способности автомобилей на участке аксайского проспекта г. Ростова-на-Дону // *Фундаментальные научные исследования: теоретические и практические аспекты*. 2017. С. 337–339.

7. J. Zhang, F. Wang, K. Wang, W. Lin, X. Xu and C. Chen, "Data-Driven Intelligent Transportation Systems: A Survey," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 12, No. 4, 2011, pp. 1624-1639. doi:10.1109/TITS.2011.2158001

8. Xing Z, Huang M, Peng D. Overview of machine learning-based traffic flow prediction. *Digital Transportation and Safety*. 2023. 2(3):164–175 DOI: 10.48130/DTS-2023-0013

9. Singh G, Al'Aref SJ, Van Assen M, et al. Machine learning in cardiac CT: Basic concepts and contemporary data // *J Cardiovasc Comput Tomogr*. 2018;12(3):192-201. doi:10.1016/j.jcct.2018.04.010

10. Ahsan M.M., Luna S.A., Siddique Z. Machine-Learning-Based Disease Diagnosis: A Comprehensive Review. *Healthcare*, 2022. 10(3), 541. DOI: 10.3390/healthcare10030541

11. Esteban Zimányi, Mahmoud Sakr, and Arthur Lesuisse. *MobilityDB: A Mobility Database Based on PostgreSQL and PostGIS*. *ACM Trans. Database Syst*. 2020. 45, 4, Article 19 (December 2020), 42 pages. DOI: 10.1145/3406534

12. Алибиева Ж., Мукажанов Н., Черикбаева Л., Еримбетова А., Байымбетов Д. Сравнение возможностей NOSQL колоночной базы данных // *Вестник КазАТК*. 2024. 131, 2 (фев. 2024), 350–358. DOI: 10.52167/1609-1817-2024-131-2-350-358

13. Цветков В.Я. Геоинформационный мониторинг // *Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка*. 2005. № 5. С.151–155.

14. Охотников А.Л. Геоинформационный мониторинг транспортных объектов // *Наука и технологии железных дорог*. 2017. 3(3). С. 35–47.

15. Саргсян А. Разработка инвестиционных способов дистанционного комбинированного управления движением в городе Ереване // *Научные труды Национального университета архитектуры и строительства Армении*. 2024. 89(2). 104–109. DOI: 10.54338/18294200-2024.2-12

16. Саргсян А. Изучение и анализ основных проблем транспорта в городе Ереване с целью улучшения // *Научные труды Национального университета архитектуры и строительства Армении*. 2024. 89(2). 94–103. DOI: 10.54338/18294200-2024.2-11

17. Yusuf J.A. Economic Evaluation of Smart Traffic Management Systems in Reducing Carbon Emissions // *Journal of Economics, Business, and Commerce*, 2024. 1(1), 30-35. DOI: 10.69739/jebc.v1i1.82

18. Горшко В.С., Шамлицкий Я.И. Применение адаптивных систем управления дорожным дви-

жением // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. 2012. № 8. С. 243–244.

19. Данильчик Р.А. Влияние адаптивных систем на условия дорожного движения: сборник тезисов научной студенческой конференции «Неделя науки – 2015». БрГТУ, 2015. С. 15.

20. Ткачева Т.М., Цибалов К.А., Шишкин Д.О. Погрешности видеокамеры, спидометра и навигатора // *Автомобиль. Дорога. Инфраструктура*. 2019. № 1(19). С. 17.

21. Boyarshinov M.G., Vavilin A.S. Patterns of traffic congestion indicator at some intersections of the road network // *Intellect. Innovacii. Investicii*. 2024. Vol. 1, pp. 95–115. DOI: 10.25198/2077-7175-2024-1-95

REFERENCE

1. Reshetnikov E.B., Abramova L.S., Chernobaev N.S., Shirin V.V. Analysis of traffic organization in the central part of Kharkov city. *Vestnik of Kharkiv National Automobile and Highway University*. 2005; (29), 116–122. (In Russ.)

2. Vorobyev A.I., Zamytskih A.V., Golubchenko N.S., Vorobyeva T.V., Morozov D.Y. Ensuring the Accuracy of Digital Road Model Data to Increase Situational Awareness. Intelligent Technologies and Electronic Devices in *Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED)*, Moscow, Russian Federation, 2021; pp. 1-6, doi: 10.1109/TIRVED53476.2021.9639134

3. Sargsyan A.T. Traffic situation in Yerevan and ways to modernize with the help of current problem of traffic congestion. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024;21(3):422-434. (In Russ.) DOI: 10.26518/2071-7296-2024-21-3-422-434. EDN: UAXSCA

4. Alamir H.S., Zargaryan E.V., Zargaryan, Yu.A. Intelligent system for controlling traffic congestion using a supervised machine learning algorithm based on adaptive IOTN. *Izvestiya of Southern Federal University. Technical Sciences*, 2023; (2(232)), 175–186. (In Russ.) DOI:10.18522/2311-3103-2023-2-175-186

5. Romanowska A, Jamroz K. Comparison of Traffic Flow Models with Real Traffic Data Based on a Quantitative Assessment. *Applied Sciences*. 2021; 11(21): 9914. DOI: 10.3390/app11219914

6. Lozovaya E.A., Tereshkina O.A., Vlasova, O.I. Method for calculating the capacity of vehicles on a section of Aksaysky Prospekt in Rostov-on-Don. *Fundamental Scientific Research: Theoretical and Practical Aspects*, 2017; pp. 337–339. (In Russ.)

7. Zhang J., Wang F., Wang K., Lin W., Xu X., Chen C. Data-Driven Intelligent Transportation Systems: A Survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2011; Vol. 12, No. 4, pp. 1624-1639. doi:10.1109/TITS.2011.2158001

8. Xing Z, Huang M, Peng D. Overview of machine learning-based traffic flow prediction. *Digital Transportation and Safety*. 2023; 2(3):164–175 DOI: 10.48130/DTS-2023-0013

9. Singh G, Al'Aref SJ, Van Assen M, et al. Machine learning in cardiac CT: Basic concepts and contemporary data. *J Cardiovasc Comput Tomogr*. 2018; 12(3):192-201. doi:10.1016/j.jcct.2018.04.010

10. Ahsan M.M., Luna S.A., Siddique Z. Machine-Learning-Based Disease Diagnosis: A Comprehensive Review. *Healthcare*, 2022; 10(3), 541. DOI: 10.3390/healthcare10030541
11. Esteban Zimányi, Mahmoud Sakr, Arthur Lesuisse. MobilityDB: A Mobility Database Based on PostgreSQL and PostGIS. *ACM Trans. Database Syst.* 2020; 45, 4, Article 19 (December 2020), 42 pages. DOI: 10.1145/3406534
12. Alibieva Zh., Mukazhanov N., Cherikbaeva L., Yerimbetova, A., & Baiymbetov, D. (2024). Comparison of capabilities of NoSQL columnar database. *Vestnik KazATK*, 131(2), 350–358. (In Russ.) DOI: 10.52167/1609-1817-2024-131-2-350-358
13. Tsvetkov V.Ya. Geoinformation monitoring. *Izvestiya of Higher Educational Institutions. Geodesy and Aerial Photography*, 2005; (5), 151–155. (In Russ.)
14. Okhotnikov A. L. Geoinformation monitoring of transport objects. *Science and Technology of Railways*, 2017; 3(3), 35–47. (In Russ.)
15. Sargsyan A. Development of investment methods for remote combined traffic control in Yerevan city. *Scientific Works of the National University of Architecture and Construction of Armenia*, 2024; 89(2), 104–109. (In Russ.) DOI: 10.54338/18294200-2024.2-12
16. Sargsyan A. Study and analysis of the main transport problems in Yerevan city with the aim of improvement. *Scientific Works of the National University of Architecture and Construction of Armenia*, 2024; 89(2), 94–103. (In Russ.) DOI: 10.54338/18294200-2024.2-11
17. Yusuf J.A. Economic Evaluation of Smart Traffic Management Systems in Reducing Carbon Emissions. *Journal of Economics, Business, and Commerce*, 2024; 1(1), 30-35. DOI: 10.69739/jebc.v1i1.82
18. Goroshko V.S., Shamlytskyi, Ya.I. Application of adaptive traffic control systems. *Actual Problems of Aviation and Cosmonautics*, 2012; (8), 243–244. (In Russ.)
19. Danilchik R.A. Influence of adaptive systems on road traffic conditions. In Proceedings of the Student Scientific Conference “Science Week – 2015”. 2015; (p. 15). Brest State Technical University (BrSTU). (In Russ.)
20. Tkacheva T.M., Tsibalov K.A., Shishkin D.O. Errors of video camera, speedometer and navigator. *Automobile. Road. Infrastructure*, 2019; 1(19), 17. (In Russ.)
21. Boyarshinov M.G., Vavilin A.S. Patterns of traffic congestion indicator at some intersections of the road network. *Intellekt. Innovacii. Investicii*. 2024; Vol. 1, pp. 95–115. DOI: 10.25198/2077-7175-2024-1-95

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Саргсян Арман Тигранович – канд. техн. наук, старший инженер по изучению проектов и обеспечению безопасности дорог, Фонд «Дорожный департамент» (0010, г. Ереван, Площадь Республики, Дом Правительства 3).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1041-6804>,

SPIN-код: 8636-0560,

e-mail: arman-sargsyan-97@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Sargsyan Arman T. – Candidate of Technical Sciences, Senior Engineer for Project Study and Road Safety, Road Department Fund (3, Government Building, Republic Square, Yerevan, 0010).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1041-6804>,

SPIN-code: 8636-0560,

e-mail: arman-sargsyan-97@mail.ru