

ВЫБОР НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ СВЕТОФОРНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ В ГОРОДАХ

Рахмангулов А.Н.¹, Ломакина М.Г.²

¹Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Россия

²ООО «СтальПром», Россия

Аннотация

Ежегодно на дорогах России увеличивается число транспортных средств, возрастает интенсивность и плотность транспортных потоков и, как следствие, возрастает дорожно-транспортный травматизм и обостряется проблема загрязнения окружающей среды. Если рост травматизма связан, в основном, с несоблюдением скоростного режима, то загрязнение окружающей среды происходит из-за увеличения времени нахождения автотранспортных средств в заторах. Поэтому для снижения уровня дорожно-транспортного травматизма и выбросов в окружающую среду необходимо обеспечивать равномерное движение транспортных потоков в городах. Одним из эффективных современных способов обеспечения равномерного движения транспортного потока является использование систем транспортной телематики, в частности, систем управления дорожными знаками, дорожными табло и светофорной сигнализацией. В статье представлен анализ существующих систем и методов светофорного регулирования. Все проанализированные системы и методы основаны на использовании однородных данных – данных о стандартных параметрах транспортных потоков. Показана необходимость сбора и анализа дополнительных слабоструктурированных данных о факторах, оказывающих значимое влияние на параметры транспортных потоков в городах. В качестве инструментов анализа разнородных данных предложено использовать инструменты Big Data. Представлен алгоритм прогнозирования параметров транспортных потоков, основанный на оригинальной идее ресурсных потоков и сочетании методов Big Data («ближайшего соседа» и фильтра Калмана) с оптимизационным методом поиска минимального покрывающего дерева на ресурсных сетях, описывающих функциональные зависимости между фактическими и прогнозными значениями данных.

Ключевые слова: светофор, транспортный поток, равномерное движение, телематика, светофорное регулирование, перекресток, аварийность, загрязнение окружающей среды, метод Вебстера, метод Дарроха, TRANSYT, «зелёная волна», SCOOT, MOTION, Big Data, фильтр Калмана, метод «ближайшего соседа», минимальное покрывающее дерево.

Введение

Ежегодно на дорогах России увеличивается численность транспортных средств, вследствие этого увеличивается интенсивность и плотность транспортных потоков на дорогах. Это приводит к возникновению заторов, снижению скорости транспортного потока, усилению негативного влияния транспорта на окружающую среду [1], а также является потенциальной причиной дорожно-транспортных происшествий (ДТП), в том числе, со смертельным исходом. По данным доклада Всемирной Организации Здравоохранения [2] число смертельных случаев в результате ДТП с 2007 года в мире не меняется, что свидетельствует об эффективности различных мероприятий по улучшению глобальной безопасности дорожного движения. В России также наблюдается сокращение числа ДТП со смертельным исходом (рис. 1) [3]. По данным Госавтоинспекции России [4] за 2016 год произошло 142437 ДТП с пострадавшими, в которых пострадало 197627 человек, из них ранено 180861 человек, погибло 16766 человек. Тем не менее, травматизм на автодорогах России остаются высоким, по сравнению с большинством развитых стран.

Наметившаяся тенденция снижения числа ДТП со смертельным исходом в России предположительно связана с увеличением плотности транспортных потоков в городах и снижением средней скорости движения авто-

транспортных средств. Косвенно это подтверждается сравнительным анализом динамики объемов выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных и передвижных источников в РФ (рис. 2) [5], поскольку в режиме холостого хода и наборе скорости, что характерно для заторов, в атмосферу выделяются предельные объёмы выхлопных газов [6].

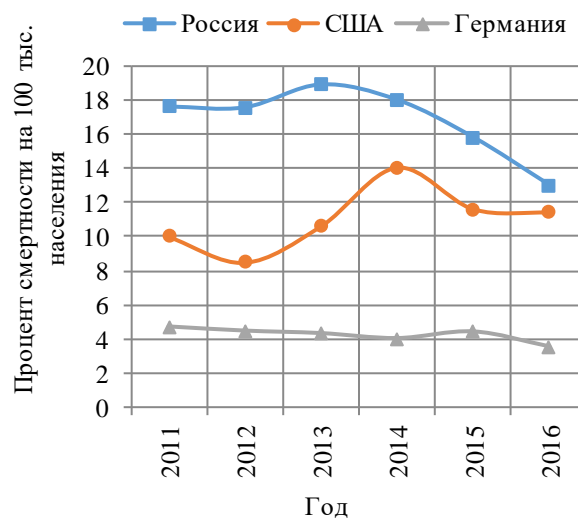


Рис. 1. Тенденция числа ДТП со смертельным исходом в России, США и Германия [3]

Из графика (рис. 2) видно, что в период наиболее интенсивного увеличения численности автотранспортных средств в РФ и, соответственно, плотности транспортных потоков в городах в период с 2000 по 2005 годы, наблюдается увеличение объемов выбросов загрязняющих веществ от передвижных источников.



Рис. 2. Динамика объемов выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных и передвижных источников в РФ за 1995-2012 гг. [5].

Общий объем выбросов снизился в период экономического кризиса, но в последние годы тенденция на увеличение доли выбросов загрязняющих веществ от передвижных источников сохраняется (рис. 3) [7].

Обеспечить снижение как дорожного травматизма, так и выбросов загрязняющих веществ от передвижных источников в результате регулирования скорости движения транспортного потока возможно в результате реализации двух основных групп мероприятий.



Рис. 3. Динамика объемов выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных и передвижных источников в РФ за 2011-2016 гг.

Первая группа мероприятий, связанная с улучшением технического состояния автотранспортных магистралей и улично-дорожной сети, требует значительных инвестиционных затрат. Кроме того, необходимо обеспечивать сбалансированное развитие всех элементов улично-дорожной сети. В противном случае заторы будут переноситься с одного на другой участок сети [8].

Вторая группа мероприятий по достижению равномерного движения транспортного потока основана

на использовании систем транспортной телематики [9]. Такие системы начали разрабатывать и внедрять на транспорте в 60-х годах прошлого века в Японии, Европе и США. Телематические системы являются комплексом взаимосвязанных автоматизированных систем, которые решают две основные задачи [10]: управление дорожным движением; мониторинг и управление работой всех видов транспорта.

Основные технологии, которые используются в системах транспортной телематики [10]:

- навигационные и координатно-временные технологии – используются для определения географического положения, направления движения и скорости транспортных средств;
- геоинформационные технологии – предусматривают автоматическое создание, сохранение и актуализацию картографических данных;
- телекоммуникационные технологии передачи данных и информационные технологии накопления, сохранения и переработки информации – используются в интеллектуальных транспортных системах.

К наиболее распространенным функциям, выполняемым системами транспортной телематики в городах следует отнести [11]:

- мониторинг дорожного движения с использованием детекторов интенсивности транспортного потока, накопление статистических данных о параметрах транспортных потоков;
- управление дорожным движением (интенсивностью, маршрутами транспортных потоков) с использованием динамических дорожных знаков, информационных табло, светофоров, анализируя параметры транспортных потоков и внешние, например, метеорологические, условия;
- контроль соблюдения правил дорожного движения с использованием средств фото-видео регистрации нарушений правил дорожного движения;
- информирование участников дорожного движения, а также пассажиров городского транспорта с использованием как разнообразных информационных табло, так и мобильных устройств;
- реализация платных транспортных услуг с использованием различных устройств автоматического сбора платы за пользование дорогами, парковочными местами или стоянками, за въезд на определенные территории.

Комплексная реализация представленных функций систем транспортной телематики позволяет повысить равномерность транспортных потоков в городах, уменьшить число и продолжительность заторов. Однако наиболее эффективным способом предотвращения заторов является применение систем управления дорожным движением [12], в частности, систем светофорного регулирования. В настоящей статье представлен обзор существующих видов светофорного регулирования, выполнен анализ достоинств и недостатков методов светофорного регулирования. На основе анализа определено перспективное направление совершенствования существующих систем и методов светофорного регулирования.

Обзор современных видов, методов и систем светофорного регулирования

В настоящее время выделяют два вида светофорного регулирования – постоянное и адаптивное. На (рис. 4) представлены виды светофорного регулирования с примерами методов и систем их реализации. При постоянном регулировании светофоры осуществляют работу независимо от времени суток, дня недели, показаний других светофоров и других параметров. Расчёт продолжительности цикла светофорного регулирования может производиться с целью обеспечения минимума задержек транспортного потока с использованием метода Вебстера [13], а также по результатам имитационного моделирования транспортного потока [14].



Рис. 4. Виды, методы и системы светофорного регулирования

Координация работы светофоров может производиться как с использованием графоаналитических методов [15], позволяющих строить планы координации светофоров «вручную», так и автоматизированных систем расчёта планов координации, например, системы TRANSYT [16]. Данная система реализует классические модели транспортных потоков, оптимизируя суммарное время задержек и количество остановок транспортных средств. Применение оптимизационных моделей для расчёта фаз светофорного цикла обеспечивает работу светофорной сигнализации в режиме «зеленая волна», что позволяет транспортным средствам двигаться через несколько перекрёстков подряд без остановок и задержек [17].

Более совершенный вид светофорного регулирования – адаптивный, основанный на анализе параметров транспортного потока и обеспечивающий скоординированную работу нескольких светофоров по согласованному управлению транспортными потоками на всей улично-дорожной сети [18].

При локальном адаптивном регулировании учитывается интенсивность транспортного потока непосредственно в месте размещения светофора. В этом случае при помощи разнообразных датчиков могут измеряться интервалы между подходящими к светофору автомобилями (метод Дарроха [19]) или длина очереди к светофору [20].

Сетевые системы адаптивного управления используют различные методы и алгоритмы для оперативной корректировки сигнальных планов на основе сбора и анализа, как правило, определённых наборов

данных. Например, система SCOOT разделяет контролируемую область на части и обеспечивает внутри каждой части сетевую координацию работы светофоров. По аналогии с системой TRANSYT, данная система основана на оптимизации сигнальных планов с использованием трехстадийной оптимизации, работающей в режиме online [21]. Критерием оптимизации в данной системе является время задержек и остановок транспортных средств [22, 23, 24].

Система MOTION идентифицирует транспортную ситуацию и применяет ранее выработанную стратегию управления с использованием экспертной системы [21, 23, 24]. Кроме того, в системе MOTION используется локальное оперативное управление перекрёстком, отделенное от адаптивного управления сетью, с целью более точной реакции на текущую ситуацию.

Для определения состава данных, используемых в рассматриваемых системах светофорного регулирования, выделим соответствующие основные расчётные формулы (табл. 1).

Типизация исходных данных для систем светофорного регулирования

Анализ представленных расчётных формул позволяет выделить следующие группы данных, используемых в системах светофорного регулирования:

- параметры транспортного потока – интенсивность, скорость потока, число транспортных средств в потоке (масса потока), число остановок потока, время задержки транспортного потока или транспортного средства (потери времени), моменты времени начала движения или остановки потока (транспортного средства);
- параметры светофорного регулирования – длительность цикла светофорного регулирования, длительность отдельных фаз цикла светофорного регулирования;
- оценки и коэффициенты – относительные или абсолютные оценки задержек, остановок транспортных средств и заторов на улично-дорожной сети;
- параметры улично-дорожной сети – пропускная способность, число и длина участков улично-дорожной сети.

В качестве целевого параметра в системах светофорного регулирования выступает либо время задержки транспортного потока (транспортного средства), либо интегрированная оценка суммарного времени задержек и остановок транспортных средств.

К регистрируемым при помощи телеметрических систем параметрам относятся интенсивность, скорость, задержки потока, момент времени остановки и начала движения потока или отдельных транспортных средств.

Параметры светофорного регулирования являются управляемыми. Параметры улично-дорожной сети, также как различные коэффициенты и оценки используются в системах светофорного регулирования в качестве постоянных величин, либо изменяются относительно редко.

Основные расчётные формулы, используемые существующими методами и системами светофорного регулирования

Метод, система	Основная расчётная формула	Используемые данные
Метод Вебстера (упрощенная формула) [25]	$d = 0,9 \left[\frac{c(1 - g/c)^2}{2[1 - (g/c)x]} + \frac{x^2}{2q(1-x)} \right]$	<p>d – средняя задержка транспортных средств на светофоре в течение одного цикла регулирования, с; c – длительность цикла светофорного регулирования, с; g – эффективная длительность зелёного сигнала, с; q – интенсивность прибытия транспортных средств, ед./с; x – степень насыщения (отношение интенсивности движения к пропускной способности).</p>
Графо-аналитический метод [15]	$tg\alpha = \frac{V_p M_\Gamma}{3.6 M_B}$	<p>$tg\alpha$ – тангенс угла наклона прямой – графика движения транспортных средств на зеленый сигнал светофоров на всем протяжении участка улично-дорожной сети, состоящего из нескольких регулируемых перекрёстков; V_p – расчетная (рекомендуемая) скорость движения, км/ч; M_Γ – горизонтальный масштаб графика режимов работы светофоров, с/см; M_B – вертикальный масштаб графика режимов работы светофоров м/с.</p>
Метод «зелёная волна» [26]	$D = \sum_{i=1}^n [f(D_i) + \varphi(D_i)] \rightarrow \min,$ $\left\{ \begin{aligned} f(D_i) &= \int_0^{a_i} I_i(t - t_{C_i}) \left[t_{kpi} + \frac{1}{S_i} \int_0^t I_i(\tau - t_{C_i}) d\tau \right] dt, \\ \varphi(D_i) &= \int_0^{a_i} I_i'(t - T - t_{C_{i+1}}) \left[t_{kpi} + \frac{1}{S_i'} \int_0^t I_i'(\tau - T - t_{C_{i+1}}) d\tau - t \right] dt, \\ a_i - t_{kpi} &= \frac{1}{S_i} \int_0^{a_i} I_i(\tau - t_{C_i}) dt, \\ a_i' - t_{kpi} &= \frac{1}{S_i'} \int_0^{a_i'} I_i'(t - T + t_{C_{i+1}}) dt. \end{aligned} \right.$	<p>D – суммарное время задержки транспортного потока на участке улично-дорожной сети, включающего в себя n перекрёстков, с; $f(D_i), \varphi(D_i)$ – задержка транспортного потока на i-м перекрестке, соответственно, для прямого и встречного направлений, с; a_i, a_i' – моменты окончания разгрузки очереди на i-м перекрестке, соответственно, для прямого и встречного направлений, с; I_i, I_i' – интенсивность транспортного потока, прибывающего к i-му перекрестку, соответственно, в прямом и встречном направлениях, ед./с; S_i, S_i' – интенсивность разгрузки очереди на i-м перекрестке, соответственно, в прямом и встречном направлениях, ед./с; t_{kpi} – длительность красного сигнала светофора на i-м перекрестке, с; $t, t_{C_{i+1}}, \tau$ – длительность фаз светофорного цикла, с; T – длительность светофорного цикла, с.</p>
Система TRANSYT [24]	$PI = \sum_{i=1}^N (W w_i d_i + K k_i S_i) \rightarrow \min$	<p>PI – Performance Index – оценка затрат, возникающих из-за задержек и остановок транспортного средства на улично-дорожной сети; N – число улиц в составе оптимизируемой улично-дорожной сети; W – средняя стоимость одного часа задержки транспортного средства (в эквиваленте легкового автомобиля); w_i – весовой коэффициент задержки на i-й улице; d_i – задержка на i-й улице; K – средняя стоимость одной остановки транспортного средства (в эквиваленте легкового автомобиля); k_i – весовой коэффициент остановки на i-й улице; S_i – число остановок на i-й улице.</p>

Окончание таблицы 1

<p>Метод Дарроха [19]</p>	$E\{W_1\} = \frac{q_1}{2(1-p_1)} \left[(E\{R_j\} + L)^2 + Var\{R\} \right]$ $E\{W_2\} = \frac{q_2}{2(1-p_2)} \left[(E\{G_j\} + L)^2 + Var\{G\} \right]$ $Var\{R\} = \frac{p_2 L \left[(1-p_1)^2 L_2 + p_1 p_2 L_1 \right]}{q_{M2} (1-p_1-p_2)^2 (1-p_1-p_2+2p_1 p_2)}$ $Var\{G\} = \frac{p_1 L \left[(1-p_2)^2 L_1 + p_1 p_2 L_2 \right]}{q_{M1} (1-p_1-p_2)^2 (1-p_1-p_2+2p_1 p_2)}$	<p>$E\{W_1\}, E\{W_2\}$ – средняя суммарная задержка транспортных средств на регулируемом перекрёстке, соответственно, на дороге (направлении) 1 и 2, с; q_1, q_2 – интенсивность прибытия транспортных средств, соответственно, на направлении 1 и 2, ед./с; q_{M1}, q_{M2} – интенсивность отправлений – пропускная способность дорог 1 и 2, ед./с; p_1, p_2 – относительная интенсивность движения, соответственно, на направлении 1 и 2, определяемая как отношение интенсивности прибытия к интенсивности отправления транспортных средств на направлении ($p=q/q_M$); L_1, L_2 – потерянное время, соответственно, для направлений 1 и 2 (потерянное время в цикле приближенно принимается равным сумме промежуточных тактов, входящих в состав цикла [27]), с; L – суммарное потерянное время (принимается $L = L_1 = L_2$), с; $E\{R_j\}, E\{G_j\}$ – средние величины продолжительности горения, соответственно, красного (R) и зелёного (G) сигналов светофора в течение j-го цикла регулирования, с; $Var\{R\}, Var\{G\}$ – дисперсия продолжительности горения, соответственно, красного (R) и зелёного (G) сигналов светофора в стационарном режиме.</p>
<p>Система SCOOT [21]</p>	$PI = \sum_{i=1}^N (w_{di} d_i + K w_{Si} S_i) + QP \rightarrow \min$	<p>PI – Performance Index – оценка затрат, возникающих из-за задержек и остановок транспортного средства на улично-дорожной сети; N – число улиц в составе оптимизируемой улично-дорожной сети; w_{di}, w_{Si} – весовые коэффициенты, соответственно, задержки и остановки транспортного средства на i-й улице; d_i – задержка на i-й улице; K – коэффициент, определяющий важность остановки относительно задержки; S_i – число остановок на i-й улице; QP – оценка важности возникновения заторов (очередей) на улично-дорожной сети.</p>
<p>Система MOTION (для случая насыщенного движения [28])</p>	$d = \frac{1}{A(t)} \cdot \int_0^T Q(t) dt \rightarrow \min,$ $\begin{cases} Q(t) = Q(0) - A(t) - D(t), \\ A(t) = \int_0^t q(t) dt, \\ D(t) = \int_0^t S(t) dt. \end{cases}$	<p>d – средняя задержка транспортных средств, в течение периода $[0, T]$; $A(t)$ – число транспортных средств, прибывших в систему в течение периода $[0, t]$; $Q(t)$ – количество транспортных средств в системе на момент времени t; $q(t)$ – интенсивность прибытия транспортных средств в момент времени t; $D(t)$ – число транспортных средств, выбывших из системы в течение периода $[0, t]$; $S(t)$ – интенсивность убытия транспортных средств из системы в момент времени t.</p>

Типизация данных, используемых современными системами светофорного регулирования, позволяет говорить о недостаточном учёте этими системами факторов, оказывающих значимое влияние на параметры транспортного потока. Например, в работах [29, 30] выполнен анализ таких факторов, в результате которого предложено их группировка на регулярные (инфраструктурные) и нерегулярные (временные).

К регулярным отнесены факторы, определяющие пропускную способность улично-дорожной сети: типы перекрёстков, число нерегулируемых пешеходных переходов, число остановочных пунктов городского пассажирского транспорта, число нерегулируемых пересечений со второстепенными улицами или выездами с парковок, конструкционное сужение проезжей части.

К нерегулярным факторам отнесены факторы, определяющие интенсивность транспортных потоков: ДТП, остановки транспортных средств из-за аварий или для высадки-посадки пассажиров на остановочных пунктах пассажирского транспорта, погодные условия (состояние дорожного покрытия, условия видимости), сужение проезжей части из-за припаркованных автомобилей или снега на обочинах, структура потока (наличие в потоке транспортных средств с различными скоростями движения, например, транспортных средств пассажирского транспорта), массовые мероприятия.

В настоящее время имеется техническая возможность получать часть данных, характеризующих перечисленные факторы, из открытых источников, например, данные о погодных условиях. Другие дан-

ные собираются и накапливаются в рамках различных информационных систем, например, данные о движении и загрузке пассажирских транспортных средств. Третьи данные, такие как вероятность возникновения ДТП, сужение проезжей части из-за припаркованных автомобилей или появление в потоке транспортных средств с различной скоростью движения, возможно получать только в результате прогнозирования.

Таким образом, повышение точности светофорного регулирования с целью обеспечения равномерного продвижения транспортных потоков в городах требует использования как текущих, так и накопленных данных из различных источников. Предполагается, что в условиях равномерного движения транспортного потока будет достигаться снижение выбросов вредных веществ и сокращение ДТП. Использование для прогнозирования и управления параметрами транспортных потоков разнородных данных, полученных из различных источников, требует разработки нового инструментария. На взгляд авторов, в основу такого инструментария могут быть положены алгоритмы Big Data.

Метод и алгоритм прогнозирования параметров транспортных потоков на основе ресурсных сетей

Понятие ресурсных сетей, а также сущность метода оптимизации транспортных потоков на их основе представлены в работах [31, 32]. В задаче прогнозирования параметров транспортных потоков под ресурсной сетью понимается совокупность накопленных и текущих данных, связанных между собой функциональными зависимостями, или объединённых в кластеры [33]. В качестве потоков, протекающих в ресурсных сетях, представляются данные, используемые для прогнозирования. Отклонения прогнозных значений транспортных потоков от фактических являются ошибкой прогнозирования. Задача прогнозирования в этом случае сводится к оптимизационной задаче минимизации разницы между прогнозными и фактическими значениями этих параметров, регистрируемыми системами телематики. Решением данной задачи является комбинация значений факторов, при которых достигается минимум отклонений прогнозных параметров транспортных потоков от фактических. Идея оптимизирующего алгоритма заключается в выборе на ресурсных сетях подграфов, определяющих комбинацию регрессионных моделей или классов данных, позволяющих найти наилучший результат прогнозирования.

Разработанный алгоритм метода прогнозирования параметров транспортных потоков основан на комбинации методов «ближайшего соседа», «фильтра Калмана» и оптимизационного метода поиска минимального покрывающего дерева [33].

1. Для каждого фактора формируется вектор $Q_i(j)$, содержащий исторические значения данного фактора, где j – порядковый номер измерения, i – номер вершины ресурсного графа, в данном случае, номер фактора. Формируется ресурсная сеть в виде полного замкнутого графа. Дуги графа соответствуют

функциональным связям между значениями векторов.

2. Для каждой вершины транспортной сети формируется вектор, содержащий значения затрат времени на движение элементов транспортного потока по дуге транспортной сети $TF_i(j)$.

3. Для каждого j -го значения вектора $TF_i(j)$ рассчитываются оценки рёбер (функциональных связей) ресурсной сети как вероятность возникновения каждой связи.

4. В качестве начальной вершины ресурсного графа принимается элемент вектора прогнозных значений $TP_i(j+1)$. На данном графе ищутся оптимальные маршруты или минимальное покрывающее дерево.

5. Производится измерение фактических значений наблюдаемых факторов и формируются соответствующие вектора Q_i . Методом «ближайшего соседа» из маршрутов минимального покрывающего дерева выбирается комбинация элементов векторов $Q_i(j)$, значение которых максимально соответствуют текущей ситуации, а из вектора TF_i – значение k , максимально соответствующее комбинации элементов векторов $Q_i(j)$. Выбранное значение запоминается в качестве прогнозной величины: $TP_i(j+1) = TF_i(k)$.

6. На шаге измерения $j+1$ фиксируется фактическое значение $TF_i(j+1)$, которое сравнивается с полученным прогнозом $TP_i(j+1)$. С использованием фильтра Калмана производится корректировка значений вероятности возникновения связей между значениями измеряемых факторов.

7. Полученные данные накапливаются и используются для расчёта как величин вероятности возникновения связей между значениями факторов, так и для повышения точности выбора элементов векторов $Q_i(j)$ методом «ближайшего соседа».

Предлагаемый алгоритм относится к разряду самообучаемых. Свёртка исходных данных путём поиска минимального покрывающего дерева на сети связей между значениями факторов позволяет сократить число рассматриваемых вариантов, снизить вычислительную сложность задачи, что делает данный алгоритм приемлемым для оперативного прогнозирования параметров транспортных потоков и использования в системах светофорного регулирования.

Заключение

Представленный в статье обзор основных методов и систем светофорного регулирования, а также результаты типизации данных, используемых в большинстве современных систем дорожной телематики, позволяет сделать вывод о недостаточном учете факторов, оказывающих значимое влияние на параметры транспортных потоков в городах. К таким факторам, значение которых необходимо регистрировать или прогнозировать в оперативном режиме, следует отнести случаи ДТП, остановки конкретных транспортных средств по различным причинам, погодные условия, сужение проезжей части, структуру транспортного потока, разнообразные массовые мероприятия.

Повышение эффективности светофорного регулирования возможно в результате как регистрации, так и прогнозирования параметров транспортных потоков на основе данных, накапливаемых различными ин-

формационными системами. Для обеспечения точных прогнозов параметров транспортных потоков предложен алгоритм, основанный на оригинальной идее ресурсных потоков и сочетании методов Big Data («ближайшего соседа», фильтра Калмана) с оптимизационным методом поиска минимального покрывающего дерева на ресурсных сетях, описывающих функциональные зависимости между фактическими и прогнозными значениями данных.

Использование предлагаемого метода и алгоритма позволит повысить точность адаптивного управления транспортными потоками в городах, повысит равномерность этих потоков, что, в свою очередь, будет способствовать уменьшению числа ДТП и снижению выбросов загрязняющих веществ от автотранспорта.

Список литературы

1. Кобарь Е.В., Полетаikin А.Н., Шира Г.В. Концепция автоматизированной системы управления дорожным движением на участке улично-дорожной сети // Автомобильный транспорт. 2011. №28. С.91-96.
2. Global status report on road safety 2015. Geneva: World Health Organization, 2015. 323 p.
3. Статистика по безопасности дорожного движения в РФ. Режим доступа: <http://transspot.ru/2016/02/27/statistika-po-bezopasnosti-dorozhnogo-dvizheniya-v-rf-2015/>
4. Госавтоинспекция: сведения о показателях состояния безопасности дорожного движения. Режим доступа: <http://stat.gibdd.ru>
5. Постников В.П. Анализ загрязнения атмосферного воздуха: национальный и региональный аспекты // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 3: Экономика. Экология. 2014. №1(24). С. 117-124.
6. Загрязнение атмосферы автотранспортом в России. Режим доступа: http://www.dishisvobodno.ru/avto_zagryaznenie.html
7. Федеральная служба государственной статистики: охрана атмосферного воздуха. Режим доступа: http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/environment/#
8. Беккер У., Лебедев В.М., Шотт Н. Ускорение транспортного потока // Экология транспорта. Типография ТУ Дрездена. С. 67-73.
9. Абрамов Л.С., Ширин В.В. Способ повышения пропускной способности регулируемых перекрестков // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2010. №3(46). С. 62-65.
10. Власов В.М., Ефименко Д.Б., Богумил В.Н. Транспортная телематика в дорожной отрасли: учебное пособие. М.: МАДИ, 2013. 80 с.
11. Левашев А.Г. Повышение эффективности организации дорожного движения на регулируемых перекрестках: дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. Иркутск: Иркутский государственный технический университет, 2004. 197 с.
12. Малюгин П.Н. Конспект лекций по дисциплине «Теория и моделирование транспортных потоков и систем». Омск: СибАДИ.2012. 45с.
13. Алферова И.Д., Городокин В.А. О проблемах применения методики Ф. Вебстера при расчете цикла работы светофорного объекта на перекрестках // Журнал Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. 2015. №1. С. 183-188.
14. Ахмадинуров М.М. Оптимизация светофорного регулирования с помощью программы моделирования транспортных потоков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Компьютер-

- ные технологии, управление, радиоэлектроника.2010.№22.С. 26-30.
15. Основы координированного управления. Режим доступа: https://studopedia.ru/2_100813_osnovi-koordinirovannogo-upravleniya.html
16. TRANSYT. Режим доступа: https://trlsoftware.co.uk/products/junction_signal_design/transyt
17. Петров В.В. Автоматизированные системы управления дорожным движением в городах. Омск: Изд-во СибАДИ, 2007. 104 с.
18. Шуть В.Н., Войцехович О.Ю. Оптимизация и координация управления светофорными объектами // Социально-экономические проблемы развития и функционирования транспортных систем городов и зон их влияния. Научные материалы XVI междуна. науч.-практ. конф. 16-17 июня 2010 года. Екатеринбург, 2010. С. 201-204.
19. Daroch J.N., Newell G.F. Queues for a vehicle-actuated traffic light. 1964. vol.12, no 6, pp. 882-895.
20. Титов А.Ю. Сравнительный анализ аппаратно-программных средств управления дорожным движением // XXII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. Москва, 16-19 июня 2014 г. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. С. 8864-8870.
21. Власов А.А., Орлов Н.А., Чушкина К.А. Методика расчета режимов работы светофорных объектов в условиях насыщенного движения // Интернет - журнал Науковедение. 2014. № 2 (21). С. 99.
22. SCOOT – A Traffic Responsive Method of Coordinating Signals / P.B. Hunt, D.I. Robertson, R.D. Bretherton, R.I. Winton // Report TRRL 1014 – Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, U.K., 1981. 44 p.
23. MOTION-a new on-line traffic signal network control system / Bielefeldt, C. Busch, F. // Road Traffic Monitoring and Control, Seventh International Conference on London. 1994. pp. 55-59.
24. Пржибыл П, Свитек М. Телематика на транспорте. М.: МАДИ (ГТУ), 2003. 540 с.
25. Игнатов А.В. Совершенствование управления перевозками с учётом риска возникновения транспортного затора на улично-дорожной сети города: Автореферат дисс. ... канд. техн. наук. Волгоград: Саратовский государственный университет им. Ю.А. Гагарина. 2015. 18 с.
26. Михеева Т.И. Моделирование движения в интеллектуальной транспортной системе // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2004. №2. С. 118-126.
27. Методические рекомендации по проектированию светофорных объектов на автомобильных дорогах ОДМ 218.6.003-2011. М.: Федеральное дорожное агентство (Росавтодор). 2013. 69 с.
28. Орлов Н.А., Власов А.А., Чушкина К.А. Синхронизация работы светофорных объектов в условиях насыщенного движения // Современные проблемы науки и образования. 2014. №2. С. 51.
29. Пыталова О.А. Обоснование параметров маршрутной сети городского наземного пассажирского транспорта: дис. ... канд. техн. наук / УрГУПС. Екатеринбург: УрГУПС, 2010. 160 с.
30. Корнилов С.Н., Рахмангулов А.Н., Пыталова О.А. Повышение безопасности и качества пассажирских перевозок в г. Магнитогорске // Автотранспортное предприятие. 2009. №7. С. 41-44.
31. Багинова В.В., Рахмангулов А.Н. Адаптивная организация вагонопотоков // Мир транспорта. 2011. Т.9. №3(30). С.132-138.
32. Багинова В.В., Рахмангулов А.Н., Аутов Е.К. Модель логистической интеграции собственников и операторов железнодорожного подвижного состава // РИСК: Ресурсы, информация, снабжение, конкуренция. 2014. № 4. С. 78-84.
33. Рахмангулов А.Н., Юань Т. Исследование методов «Big Data» для прогнозирования параметров транспортных потоков: Отчёт о НИР РФФИ №Ор-15-37-51307\15. Магнитогорск: 2015. 78 с.

Материал поступил в редакцию 23.03.2017

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

SELECTING THE DIRECTION OF IMPROVING THE TRAFFIC LIGHT SYSTEM OF URBAN TRAFFIC FLOWS MANAGEMENT

Rakhmangulov Aleksandr Nelevich – D.Sc. (Eng.), Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: +7-3519-29-85-16. E-mail: ran@magtu.ru

Lamakina Maria Gennadievna – Engineer

LLC «Stal'Prom», Russia. Phone: + +7-965-928-12-97. E-mail: lomackina.marya2015@yandex.ru

Abstract

The number of vehicles has been increasing annually, the number of vehicles increases, the intensity and density of traffic flows increase as well, hence, the rate of road traffic injuries becomes important. If growth of an injury rate is connected, generally with non-compliance with the high-speed mode, then environmental pollution happens because of increased time of vehicles in traffic jams. Therefore, it is necessary to provide uni-

form promotion of traffic flows in the cities for decreasing the level of road traffic injuries and emissions in the environment. One of effective modern methods of ensuring uniform motion of traffic flow is the application of systems of a transport telematics, in particular, the management of systems of traffic signs, road boards and the traffic light alarm system. The analysis of the existing systems and methods of traffic light regulation is provided in the article. All analysed systems and methods are based on application

of uniform data – data on standard parameters of traffic flows. Need of collection and the analysis of additional semistructured data on the factors exerting significant impact on parameters of traffic flows in the cities is shown in paper. As instruments of collection and the analysis of diverse data, it is offered to use the Big Data tools. The algorithm of forecasting parameters of traffic flows based on the original idea of resource flows and a combination of the Big Data methods is proposed ("the closest neighbor" and Kallman's filter) with an optimization method for searching the minimum covering tree on the resource networks describing functional dependences between the actual and forecast values of data.

Keywords: traffic light, traffic flow, uniform movement, telematics, traffic light system., intersection, traffic accidents, environmental pollution, Webster's method, Darroh's method, TRANSYT, «green wave», SCOOT, MOTION, Big Data, Kalman's filter, neighbourhood method, minimum spanning tree.

References

1. Kobzar E.V., Polietyaykin A.N., Shira G.V. Konceptiya avtomatizirovannoy sistemy upravleniya dorozhnym dvizheniem na uchastke ulichno-dorozhnoy seti [Conception of automated road traffic control system on road network section] // Zhurnal Avtomobilnyy transport [Journal of Road Transport]. 2011. no. 28, pp. 91-96. (In Russ.)
2. Global status report on road safety 2015. Geneva: World Health Organization, 2015. 323 p. ISBN 978-92-4-156506-6.
3. Statistika po bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya v RF [Statistics on traffic safety in Russian Federation]. (In Russ.) Available at: <http://trasspot.ru/2016/02/27/statistika-po-bezopasnosti-dorozhno-dvizheniya-v-rf-2015/>
4. Gosavtoinspektsiya: svedeniya o pokazatelnykh sostojaniya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya [Traffic police: information on indicators of road safety]. (In Russ.) Available at: <http://stat.gibdd.ru>
5. Poshtnikov V.P. Analiz zagryazneniya atmosfery vozduha: natsionalnyy i regionalnyy aspekty [The analysis of atmospheric air pollution: national and regional aspects] // Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 3: Ekonomika. Ekologiya [Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 3. Ekonomika. Ekologiya]. 2014. no. 1(24), pp. 117-124. (In Russ.)
6. Zagryaznenie atmosfery avtotransportom v Rossii [Air pollution by motor transport in Russia]. (In Russ.) Available at: http://www.dishivobodno.ru/avto_zagryaznenie.html
7. Federalnaya sluzhba gosudarstvennoy statistiki: ohrana atmosfery vozduha [The Federal State Statistics Service: protection of atmospheric air]. (In Russ.) Available at: http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/environment/#
8. Becker U., Lebedew W.M., Schott N. Uskorenie transportnogo potoka [Speeding traffic]. Printing house TU Dresden. p. 76. (In Russ.)
9. Abramov L.S., Shirin V.V. Sposob povysheniya propusknoy sposobnosti reguliruemyykh perekrestkov [The way of increase of traffic capacity of signaled crossing] // Vostochno-Evropeskij zhurnal peredovykh tekhnologiy [Eastern-European Journal of Enterprise Technologies]. 2010. no. 3(46), pp. 62-65 (In Russ.)
10. Vlasov V.M., Efimenko D.B., Bogumil V.N. Transportnaya telematika v dorozhnoy otrasli [Transport telematics in the road sector]. M.: MADI. 2013. 80 p. (In Russ.)
11. Levashov A.G. Povyshenie effektivnosti organizatsii dorozhnogo dvizheniya na reguliruemyykh perekrestkakh [Increase in efficiency of the organization of traffic at adjustable intersections] Irkutsk. 2004. 197 p. (In Russ.)
12. Malugin P.N. Konspekt lektsii po discipline «Teoriya i modelirovanie transportnykh potokov i sistem» [Lectures on the subject "Theory and modeling of traffic flows and systems"]. Omsk, 2012. p. 45. (In Russ.)
13. Alferova I.D., Gorodokin V.A. O problemakh primeneniya metodiki F. Vebstera pri raschete tsikla raboty svetofornogo obekta na perekrestkakh [The problems of application F. Webster methodology when calculating the cycle of traffic lights at the crossroads] // Zhurnal Modernizatsiya i nauchnye issledovaniya v transportnom komplekse [Magazine Modernization and research in the transport sector]. 2015. no.1, pp. 183-188. (In Russ.)
14. Ahmadinurov M.M. Optimizatsiya svetofornogo regulirovaniya s pomosh'ju programmy modelirovaniya transportnykh potokov [Optimization of traffic light control using the program of traffic flow modeling] // Vestnik Juzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta [Vestnik of South Ural State University]. 2010. no. 22, pp. 26-30. (In Russ.)
15. Osnovy koordinirovannogo upravleniya [Bases of coordinate management]. (In Russ.) Available at: [https://studopedia.ru/2_100813_osnovi-](https://studopedia.ru/2_100813_osnovi-koordinirovannogo-upravleniya.html)

16. TRANSYT. Available at: https://trsoftware.co.uk/products/junction_signal_design/transyt
17. Petrov V.V. Avtomatizirovannyye sistemy upravleniya dorozhnym dvizheniem v gorodakh [Automated control systems for traffic in the cities]. Omsk: Iz-vo SibADI, 2007. 104 p. (In Russ.)
18. Shut V.N., Vojtechovich O.Ju. Optimizatsiya i koordinatsiya upravleniya svetofornymi obektami // Socialnoekonomicheskie problemy razvitiya i funkcionirovaniya transportnykh sistem gorodov i zon ih vliyaniya [Social and economic problems of the development and functioning of the transport systems of towns and areas of their influence]. 2010. pp. 201-204. (In Russ.)
19. Darroh J.N., Newell G.F. Queues for a vehicle-actuated traffic light. 1964. no.12, pp. 896-912.
20. Titov A.U. Sravnitel'nyy analiz apparatno-programmnykh sredstv upravleniya dorozhnym dvizheniem [Comparative analysis of hardware and software for traffic management] // XXII All-Russian meeting on problems of management VSPU-2014. Moscow, on June 16-19, 2014: Works M.: Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN [V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences]. 2014. pp. 8864-8870. (In Russ.)
21. Vlasov A.A., Orlov N.A., Chushkina K.A. Metodika rascheta rezhimov raboty svetofornyykh obektov v usloviyakh nasyshchennogo dvizheniya [Design procedure of traffic light signals in the conditions of the saturated movement] // Internet - zhurnal Naukovedenie [Internet magazine Naukovedenie]. 2014. no. 2(21). (In Russ.)
22. SCOOT – A Traffic Responsive Method of Coordinating Signals / P.B. Hunt, D.I. Robertson, R.D. Bretherton, R.I. Winton // Report TRRL 1014 – Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, U.K., 1981. 44 pp.
23. MOTION-a new on-line traffic signal network control system / Bielefeldt C. Busch F. // Road Traffic Monitoring and Control, Seventh International Conference on London, 1994. pp. 55-59.
24. Przhibyl P., Svitek M. Telematika na transporte [Transport telematics]. Moscow: MADI (GTU). 2003. 540 p. (In Russ.)
25. Ignatov A.V. Sovershenstvovanie upravleniya perevozkami s uchotom riska vozniknoveniya transportnogo zatora na ulichno-dorozhnoy seti goroda [Improvement of transportation management taking into account risk of the traffic jam on urban network]: Abstract yew. ... Cand.Tech.Sci., Volgograd: Yuri Gagarin State Technical University of Saratov. 2015. 18 p. (In Russ.)
26. Miheeva T.I. Modelirovanie dvizheniya v intellektualnoy transportnoy sisteme [Traffic modelling in intellectual transport system] // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta [Vestnik of Samara University]. 2004. no.2, pp.118-126. (In Russ.)
27. Metodicheskie rekomendatsii po proektirovaniyu svetofornyykh obektov na avtomobilnykh dorogakh [Methodical recommendations about designing traffic light objects on highways] ODM 218.6.003-2011. Moscow: Federal Highway Agency (Rosavtodor). 2013. 69 p. (In Russ.)
28. Orlov N.A., Vlasov A.A. Chushkina K.A. Sinhronizatsiya raboty svetofornyykh obektov v usloviyakh nasyshchennogo dvizheniya [Synchronization of traffic light objects' operation in the conditions of congested traffic] // Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya [Modern problems of science and education]. 2014. no.2, p.51. (In Russ.)
29. Pytaleva O.A. Obosnovanie parametrov marshrutnoy seti gorodskogo nazemnogo passazhirskogo transporta [Justification of parameters of route network of urban land passenger transport]: Cand.Tech.Sci. Ekaterinburg: UrGUPS, 2010. 160 p. (In Russ.)
30. Kornilov S.N., Rakhmangulov A.N., Pytaleva O.A. Povyshenie bezopasnosti i kachestva passazhirskikh perevozkov v g. Magnitogorske // [Increase in safety and quality of passenger transportation in Magnitogorsk] // Avtotransportnoe predpriyatie [Motor transportation entity]. 2009. no.7, pp. 41–44. (In Russ.)
31. Baginova V.V., Rakhmangulov A.N. Adaptivnaya organizatsiya vagonopotokov [Adaptive System of Freight Traffic Operation] // Mir transporta [World of Transport]. 2011. vol.9, no.3(30), pp.132-138. (In Russ.)
32. Baginova V.V., Rakhmangulov A.N., Autov E.K. Model logisticheskoy integratsii sobstvennikov i operatorov zheleznodorozhnogo podvzhnogo sostava [Logistic integration model of the railway rolling stock owners and operators] // RISK: Resursy, informatsiya, snabzhenie, konkurentsya [RISK: Resources, Information, Supply, Competition]. 2014. no.4, pp.78-84. (In Russ.)
33. Rakhmangulov A.N., Yuan T. Issledovanie metodov «Big Data» dlya prognozirovaniya parametrov transportnykh potokov [Research on the "Big Data" methods for forecasting the parameters of traffic flows]: Report on research of RFFR №Op-15-37-51307/15. Magnitogorsk: NMSTU, 2015. 78 p. (In Russ.)

Received 23/03/2017

Рахмангулов А.Н., Ломакина М.Г. Выбор направления совершенствования систем светофорного регулирования транспортных потоков в городах // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2017. Т.7. №1. С. 27-34

Rakhmangulov A.N., Lomakina M.G. Selecting the direction of improving the traffic light system of urban traffic flows management // *Sovremennyye problemy transportnogo kompleksa Rossii* [Modern Problems of Russian Transport Complex]. 2017, vol.7, no.1, pp. 27-34