Роман Валерьевич АНДРОНОВ[1]
Евгений Эдуардович ЛЕВЕРЕНЦ[2]
Татьяна Владимировна МАЛЬЦЕВА[3]

УДК 519.872.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ ПЕРЕСЕЧЕНИЙ ГОРОДСКИХ УЛИЦ С АДАПТИВНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

[1] кандидат технических наук,
доцент кафедры автомобильных дорог и аэродромов,
Тюменский индустриальный университет
aroma77777@mail.ru; ORCID: 0000-0001-6574-8456

[2] старший преподаватель кафедры строительной механики,
Тюменский индустриальный университет
leverentsee@tyuiu.ru; ORCID: 0000-0001-6574-8456

[3] доктор физико-математических наук,
профессор кафедры строительной механики,
Тюменский индустриальный университет
maltsevatv@tyuiu.ru; ORCID: 0000-0002-0274-0673

Аннотация

Внедрение систем автоматизированного регулирования дорожного движения на улично-дорожной сети позволит повысить эффективность ее работы. Это приведет к увеличению пропускной способности и улучшению равномерности параметров дорожного движения. Уменьшится количество остановок, торможений, износ ходовой части автомобилей, расход моторного масла и топлива, снизится экологическая нагрузка на окружающую среду.

Моделирование работы транспортных пересечений является одной из актуальных задач при исследовании функционирования городской улично-дорожной сети. Метод

Цитирование: Андронов Р. В. Моделирование транспортных пересечений городских улиц с адаптивным регулированием дорожного движения / Р. В. Андронов, Е. Э. Леверенц, Т. В. Мальцева // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2022. Том 8. № 1 (29). С. 144-160.
DOI: 10.21684/2411-7978-2022-8-1-144-160

© ФГАОУ ВО Тюменский государственный университет

моделирования используется как для последующей оптимизации дорожного движения, так и при обосновании работ, связанных с совершенствованием, реконструкцией и увеличением пропускной способности пересечений улиц.

Современные методики и программы транспортного моделирования позволяют смоделировать дорожное движение через участки улично-дорожной сети и спрогнозировать результаты моделирования на требуемый период времени (несколько лет). Это необходимо для технико-экономического обоснования мероприятий по оптимизации дорожного движения с индивидуальным гибким подходом к каждому транспортному узлу вместо использования общих рекомендаций нормативных документов, во многих случаях не учитывающих индивидуальный характер работы каждого элемента улично-дорожной сети.

В статье предлагается модель работы транспортного пересечения, в том числе с адаптивным управлением, опирающаяся на результаты экспериментальных исследований и учитывающая неравномерность пропускной способности по каждому светофорному циклу. Применительно к транспортному пересечению на показатель неравномерности пропускной способности влияют способы пропуска пешеходов (в отдельной фазе или нет) и возможности совершения поворотных маневров автомобилями. Всё вышеизложенное также влияет на общую величину пропускной способности пересечения, безопасность движения, длину очереди и величину задержек транспортных средств на пересечении. Введение параметра неравномерности пропускной способности позволит точнее прогнозировать величину транспортных задержек и очередей.

Предложенная модель может быть использована для задач организации и управления дорожным движением и при обосновании мероприятий по совершенствованию улично-дорожной сети крупных и крупнейших городов, принятии решения по переустройству транспортного пересечения или строительству развязки в разных уровнях.

Ключевые слова

Математическая модель, регулируемые пересечения, адаптивное регулирование, автоматизированная система управления дорожным движением, транспортные потоки, задержки и очереди транспортных средств, метод Монте-Карло.

DOI: 10.21684/2411-7978-2022-8-1-144-160

Введение

Моделирование транспортного пересечения должно учитывать характеристики транспортного потока, параметры пересечения, количество и сложность совершения маневров транспортных средств на пересечении. Для назначения характеристик светофорного регулирования эти параметры определяются натурными замерами при помощи полевых исследований или при использовании камер и детекторов проезда автомобилей на самих пересечениях. Для составления модели работы пересечения эти данные являются опорным фундаментом моделирования. После задания всех исходных параметров можно проигрывать большое количество розыгрышей модели с различными изменениями в самом пересечении

и в транспортном потоке, проходящем через него, с получением результатов необходимой достоверности (метод Монте-Карло). И там, где у пересечения набор параметров является постоянной величиной, у транспортного потока, наоборот, количество подходящих автомобилей является случайной величиной; характер подхода автомобилей тоже может быть разным в зависимости от времени суток, погодных условий, близости смежных транспортных пересечений.

Построение модели пересечения позволяет проводить численные эксперименты по изменению характера дорожного движения [2, 3], конфигурации пересечения и по режимам регулирования на них. Актуальность моделирования заключается в сложности проведения натурного эксперимента [8], т. к. для него потребуется полное возведение пересечения и пропуск потоков движения по нему. Что, во-первых, является дорогостоящим мероприятием, а во-вторых, не представляет полной картины формирования транспортного потока на нем.

Поэтому моделирование пересечений позволит оценить как уже работающее пересечение, так и эффективность планировочных решений и мероприятий по организации дорожного движения.

Постановка задачи

Задача заключается в построении модели транспортного пересечения с использованием адаптивного управления дорожным движением.

Для задания транспортного потока, подходящего к пересечению, требуется знать интенсивность движения автомобилей, но одного этого параметра будет недостаточно, т. к. автомобили подходят к пересечению неравномерно [1]: это напрямую влияет на пропускную способность пересечения, что, в свою очередь, ведет к увеличению заторных явлений [3] и снижает безопасность движения на пересечении [11].

Пусть X — входящий поток автомобилей — случайная величина. Подсчет количества автомобилей велся по 5-секундным интервалам. На основании теории транспортных потоков и произведенного натурного эксперимента входящий поток описывается законом Пуассона, авт./с:

$$X = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t}, \tag{1}$$

где n — количество событий; λt — средняя интенсивность входящего потока за время t.

В рассматриваемой модели вводится понятие единичного времени, равного 5 с. Указанный промежуток (5 с) взят как интервал времени для переключения сигналов светофора, принятый в системе автоматизированного управления дорожным движением «Спектр-2.0» (так называемое «экипажное время»). Этот интервал появился исходя из необходимого интервала времени для движущегося автомобиля. При среднем пути торможения в 50 м время достижения полной остановки будет равно 5 с.

За Y был взят исходящий поток. Количество исходящих со стоп-линии пересечения автомобилей также считается по 5-секундным интервалам, которые складываются в фазы.

Исходящий поток Y (пропускная способность) — случайная величина, изменяемая по закону нормального распределения (авт./с). Нормальный закон позволяет исключить маловероятные события на проезжей части, такие как дорожно-транспортные происшествия, работу муниципальных служб, движение тихоходных транспортных средств.

$$Y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-a}{\sigma}\right)^2}, \tag{2}$$

где σ — среднеквадратичное отклонение; a — математическое ожидание случайной величины.

Для описания неравномерности пропускной способности параметр σ будем рассматривать в виде функции, зависящей от следующих факторов: количества полос движения, сложности пересечения, фактической пропускной способности.

Входящий поток — это автомобили, подходящие к стоп-линии, а исходящий поток — автомобили, уходящие со стоп-линии. Такое уточнение необходимо для моделирования входящего потока, проходящего через пересечение.

Для оценки неравномерности пропускной способности предложено определять среднеквадратичное отклонение в виде линейной зависимости:

$$\sigma = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3, \tag{3}$$

где x_1 — число полос движения; x_2 — сложность пересечения; x_3 — фактическая пропускная способность, авт./фаза. Постоянные a_0, a_1, a_2, a_3 — размерные константы, определяемые регрессионным анализом. Переменные x_1, x_2, x_3 являются переменными одного порядка.

Тип пересечения выбирается относительно количества маневров, совершаемых на пересечении. Рассмотрим классификацию, используемую в модели для анализа сложности узлов улично-дорожной сети:

— $x_2 = 1$ — пересечения, у которых поворачивающие направления и движение пешеходов запрещены или выделены в отдельные фазы. Нет помех для беспрепятственного проезда пересечения;
— $x_2 = 2$ — пересечения, у которых только поворачивающие налево направления выделены в отдельные фазы или запрещены. Правоповорачивающий поток движется с конфликтом с движением пешеходов;
— $x_2 = 3$ — пересечения, у которых движение пешеходов и/или левое поворачивающее направление осуществляется в общем потоке с конфликтом с дорожным движением по встречной полосе.

Коэффициенты a_i, $i = 0, \ldots 3$ определялись по результатам натурного эксперимента с применением метода наименьших квадратов и проверялись на значимость. Интервальные оценки получены по критерию Стьюдента с доверительной вероятностью 95%. Значения коэффициентов и полученный доверительный интервал приведены в таблице 1.

Анализируя данные в таблице 1, видим, что коэффициенты модели a_0 и a_1 статистически незначимы, поэтому в дальнейших расчетах ими можно пренебречь.

Пересчет коэффициентов a_2, a_3 при том же уровне значимости показали снижение относительной погрешности до 41 и 22% (таблица 2).

Чтобы в модели учесть сложность пересечения x_2, рассмотрим способ логарифмического нормирования $x_2 = \log(i)$ (i = 1; 2; 3), вместо линейной функции $\sigma = a_2 x_2 + a_3 x_3$ рассмотрим комбинацию двух функций: логарифмической и линейной — $\sigma = a_2 \ln(i) + a_3 y$.

Отметим, что первая сложность пересечения соответствует беспрепятственному проезду по пересечению, оказывая малое влияние на однородность пропускной способности, и это не влияет на величину среднего квадратичного отклонения. Введенный в формулу логарифм позволяет минимизировать это влияние на пресечениях первой сложности и увеличить его на пересечениях второй и третьей сложностей.

Не учитывая влияние коэффициентов, показавших низкую значимость, получаем выражение:

$$\sigma = 1{,}76 \ln i + 0{,}099\, y, \tag{4}$$

где $i = 1; 2; 3$ — сложность пересечения; $y = M(Y)$ — средняя пропускная способность.

Таблица 1

Проверка статистической значимости коэффициентов a_0, a_1, a_2, a_3

Table 1

Checking the statistical significance of the coefficients a_0, a_1, a_2, a_3

Коэффициент модели	Значение коэффициента	Доверительный интервал	Относительное значение доверительного интервала, %
a_0	−2,279271	±2,500355	−110
a_1	0,2511102	±0,822893	328
a_2	1,2288108	±0,680347	55
a_3	0,114471	±0,062684	55

Таблица 2

Проверка статистической значимости коэффициентов a_2, a_3 линейной функции

Table 2

Checking the statistical significance of the coefficients a_2, a_3 of a linear function

Коэффициент модели	Значение коэффициента	Доверительный интервал	Относительное значение доверительного интервала, %
a_2	0,726188	±0,295074	41
a_3	0,084321	±0,018403	22

Таблица 3

Проверка статистической значимости коэффициентов a_2, a_3

Table 3

Checking the statistical significance of the coefficients a_2, a_3

Коэффициент модели	Значение коэффициента	Доверительный интервал	Относительное значение доверительного интервала, %
a_2	1,764473	±0,631099	36
a_3	0,099352	±0,013336	13

Введение функции логарифма позволило повысить точность коэффициентов (таблица 3) и точность среднеквадратичного отклонения σ (рис. 1-3). Точность расчета среднеквадратичного отклонения для первого типа пересечения увеличилась на 6%, для второго типа — на 4%, для третьего типа — на 5%.

Таким образом, для пересечения с беспрепятственным проездом — пересечения первого типа сложности — модель среднеквадратичного отклонения будет иметь следующий вид:

$$\sigma = 0{,}099\, y. \tag{5}$$

Для разной интенсивности однородность пропускной способности будет меняться: чем больше интенсивность дорожного движения, тем меньше однородность пропускной способности пересечения (рис. 1).

Для пересечения второго типа сложности среднеквадратичное отклонение будет описываться формулой:

$$\sigma = 1{,}22 + 0{,}099\, y. \tag{6}$$

Визуализация результатов показана на рис. 2.

Для пересечений с максимальным количеством маневров (для третьего типа пересечения) среднеквадратичное отклонение описывается зависимостью:

$$\sigma = 1{,}93 + 0{,}099\, y, \tag{7}$$

что представлено на рис. 3.

Запишем общую формулу для определения среднеквадратичного отклонения на всех типах пересечений:

$$\sigma_i = a_i + a_3 y. \tag{8}$$

Из этого следует, что параметры пересечения определяются по комбинации двух функций: линейной и логарифмической. Для различных пересечений были получены закономерности среднеквадратичного отклонения, в которых параметры определялись из эксперимента.

Перейдем к среднеквадратичному отклонению $\hat{\sigma}$ для единичного времени:

$$\hat{\sigma} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \tag{9}$$

где n — количество единичных интервалов времени в промежутке t.

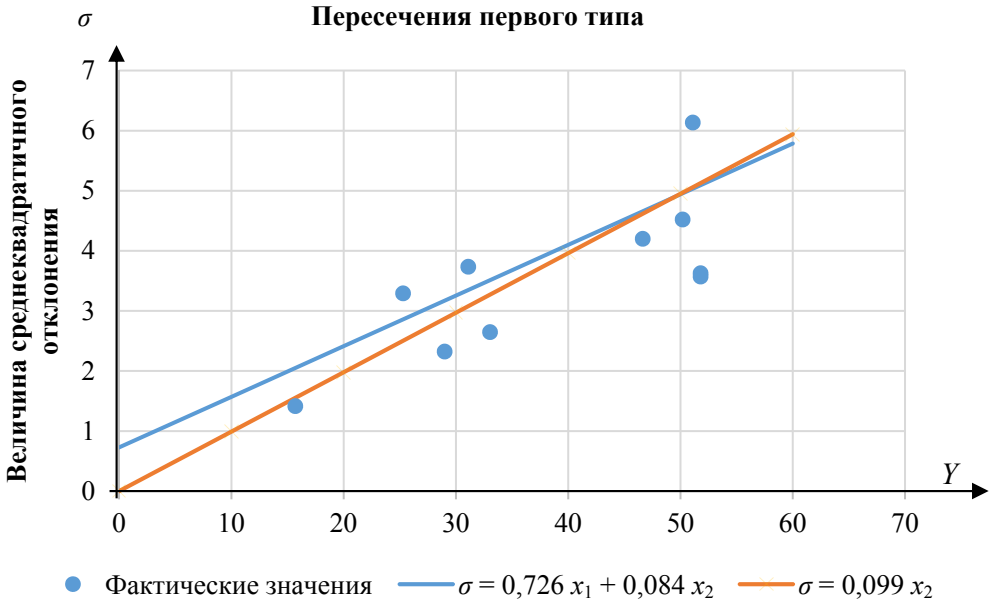

Рис. 1. Величина отклонения пропускной способности от интенсивности дорожного движения на пересечении первого типа сложности

Fig. 1. The value of the deviation of throughput from traffic intensity at the intersection of the first type of complexity

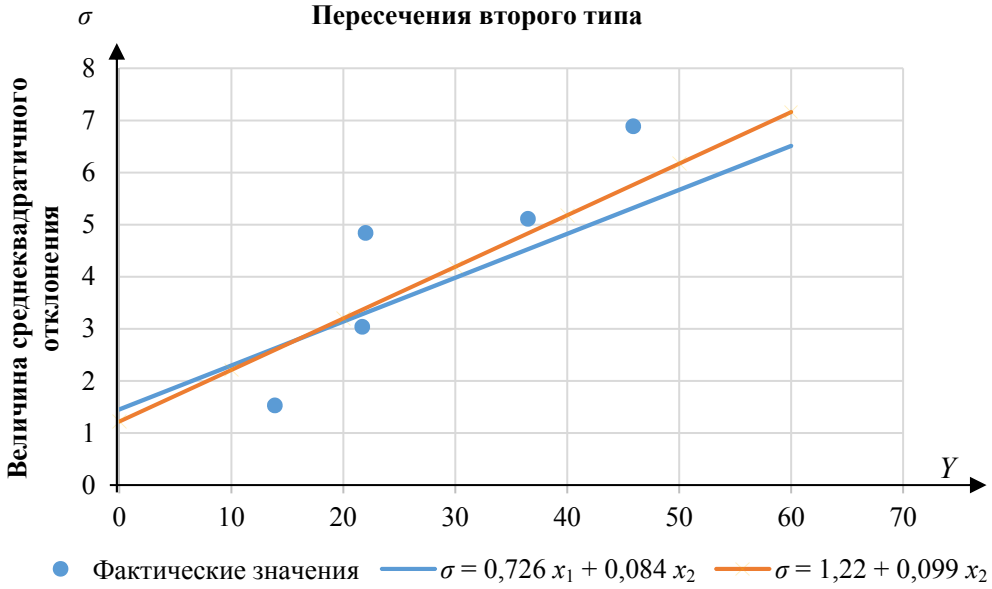

Рис. 2. Величина отклонения пропускной способности от интенсивности дорожного движения на пересечении второго типа сложности

Fig. 2. The value of the deviation of throughput from traffic intensity at the intersection of the second type of complexity

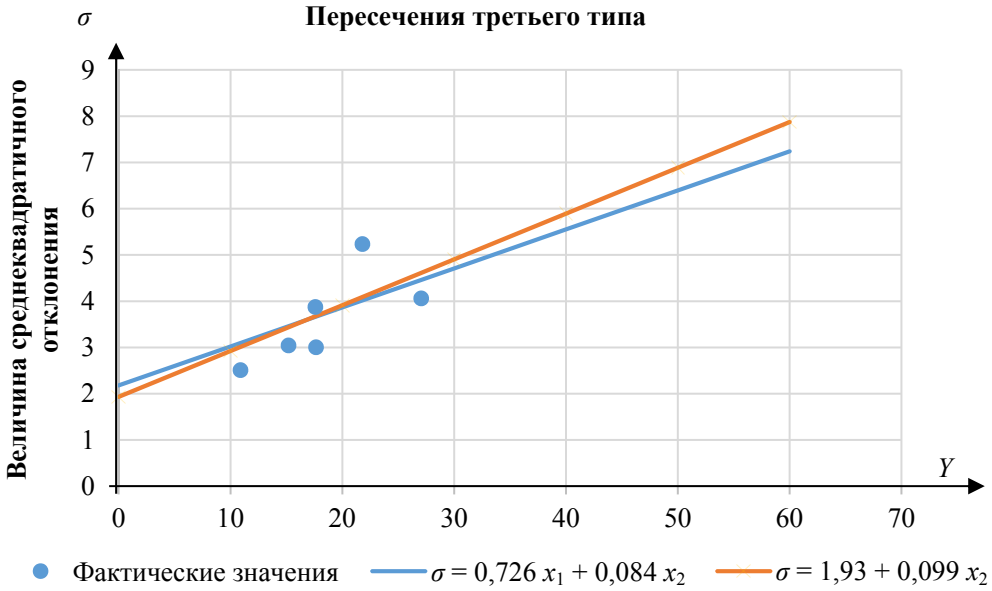

Рис. 3. Величина отклонения пропускной способности от интенсивности дорожного движения на пересечении третьего типа сложности

Fig. 3. The value of the deviation of throughput from traffic intensity at the intersection of the third type of complexity

Аналогичным образом моделируется транспортный поток для смежного направления. Режим светофорного регулирования позволит пропускать каждое из направлений в отведенную для него фазу. Продолжительность разрешающей фазы будет корректировать пропускную способность пересечения уже во времени (чем дольше горит зеленый свет, тем больше автомобилей проедет через стоп-линию направления). Продолжительность светофорного цикла является ограничением величины входящих в него фаз. Попеременно пропускаемые потоки автомобилей смежных направлений будут проезжать на зеленый свет и тормозить на красный, формируя автомобильные очереди. Растущие или убывающие длины очередей будут показывать эффективность работы всего транспортного пересечения (чем очереди меньше, тем эффективнее транспортное пересечение).

Для увеличения эффективности транспортного пересечения необходимо увеличить его пропускную способность. В результате увеличения пропускной способности больше автомобилей будут проходить через пересечение в единицу времени. И, рассматривая вопрос в статическом виде, единственным решением видится увеличение поперечного сечения смежных улиц, т. е. изменение геометрических характеристик транспортного пересечения. Но это однобокий и экстенсивный подход. Альтернативой ему является предложение увеличить время разрешающей фазы светофора. Но всё предложенное выше не может решить жесткий режим регулирования, а т. к. поток движется неравномерно, то и изменять длину фазы придется в динамическом режиме. В этом случае применение находит адаптивная

система регулирования дорожного движения: она позволяет в режиме реального времени подстраиваться под поток автомобилей, увеличивая или уменьшая разрешающую фазу для автомобильного потока.

Автоматизированная система регулирования дорожного движения позволяет оставлять неизменными геометрические характеристики пересечения, но перераспределяет запас времени, заложенный в длину светофорного цикла между автомобильными потоками. Для большего автомобильного потока отводится большая разрешающая фаза, для меньшего — меньшая [7]. Но автомобильный поток не имеет характерных точек начала и конца, поэтому их нужно задать параметром переключения фазы. При появлении разрыва в потоке происходит переключение фазы, за разрыв в потоке берется интервал более 5 с, в течение которого по данному направлению не подъезжают автомобили. Алгоритм поиска «разрыва потока» лежит в основе многих систем адаптивного регулирования дорожного движения, таких как СПЕКТР 2.0, SCOOT, UTOPIA [10].

Внедрение системы адаптивного регулирования позволяет повысить пропускную способность транспортного пересечения, не меняя его геометрические характеристики. Для демонстрации эффективности подобного решения также можно использовать моделирование транспортных пересечений, где будут сравниваться способы регулирования.

Методы

При решении задач статьи используются методы статистического моделирования (метод Монте-Карло), регрессионного анализа.

Сравнение вариантов происходит исходя из представленной модели, многократно проигранной в программном комплексе, который в первом приближении будет иметь вид двух несвязанных блоков, моделирующих разные типы регулирования дорожного движения. Этот комплекс представлен на рис. 4.

Рис. 4. Алгоритм взаимодействия исполняющих блоков регулирования дорожного движения

Fig. 4. Algorithm for the interaction of executing traffic control units

Как было сказано выше, при любом способе регулирования дорожного движения будут появляться очереди автомобилей после переключения светофорных фаз. Выделим накопление очереди в отдельное условие:

$$q(x,y) = \begin{cases} x = f^{-1}(r,\lambda), \\ y = F^{-1}(s,a,\sigma), \end{cases} \quad (10)$$

где s, r — генераторы случайных чисел; λ — интенсивность подхода автомобилей к стоп-линии; a — математическое ожидание ухода со стоп-линии автомобилей за $t_{ед}$ (пропускная способность на данный момент); σ — среднеквадратичное отклонение пропускной способности за $t_{ед}$; x — подходящее число автомобилей за $t_{ед}$; y — уходящее со стоп-линии количество автомобилей за $t_{ед}$; f^{-1} и F^{-1} — функции случайной величины по принятому в модели закону распределения в зависимости от генерируемых равномерно распределенных случайных величин: от генератора r — на отрезке [0; 1), от генератора s — на отрезке (0; 1); q — накопленная очередь за $t_{ед}$.

При выполнении условия

$$q + x - y = 0 \quad (11)$$

фаза светофора меняется, при наличии пешеходного движения в цикле переключение осуществляется на него.

Таким образом, математическая модель движения транспортных потоков через регулируемое пересечение представлена системой уравнений (1)-(3), (10), (11).

Для моделирования адаптивного регулирования дорожного движения требуется задать изменяемый параметр: это будет длина разрешающей фазы светофора. Для переключения фазы требуется разрыв в потоке. Алгоритм работы адаптивного регулирования показан на рис. 5, где $t_{ед}$ — интервал, равный 5 с; x_i — пропускная способность, авт./с; i — сложность пересечения; λ_i — интенсивность движения, авт./с; S — общее количество $t_{ед}$ в фазе $S \leq T_{max}/t_{ед}$; r — случайная величина; a — математическое ожидание ухода автомобилей за единичное время; σ_b — среднеквадратичное отклонение пропускной способности за $t_{ед}$; $t_{зел}$ — максимальная продолжительность разрешающей фазы (зеленого света светофора); q — размер очереди за $t_{ед}$; $q_{ср}$ — средняя величина очереди за период S; $t_{ср}$ — средняя задержка 1 автомобиля за 1 с.

Результаты

Результаты моделирования сравниваются по достижению заданного числа итераций. По предложенному алгоритму проводится расчет длины автомобильной очереди на пересечении при разных режимах регулирования (рис. 5). Сравнение осуществляется по сводным ведомостям, в которых хранится вся информация о работе транспортного пересечения.

На примере пересечения двух тюменских улиц — Тимофея Чаркова и Верхнетарманской [4] — проводилось сравнение по основным показателям эффективности работы транспортного пересечения. На рис. 6 представлено сравнение по средневзвешенной задержке на пересечении.

Также сравнение проводилось по средней длине очереди автомобилей, скопившейся при переключении светофорных фаз (рис. 7).

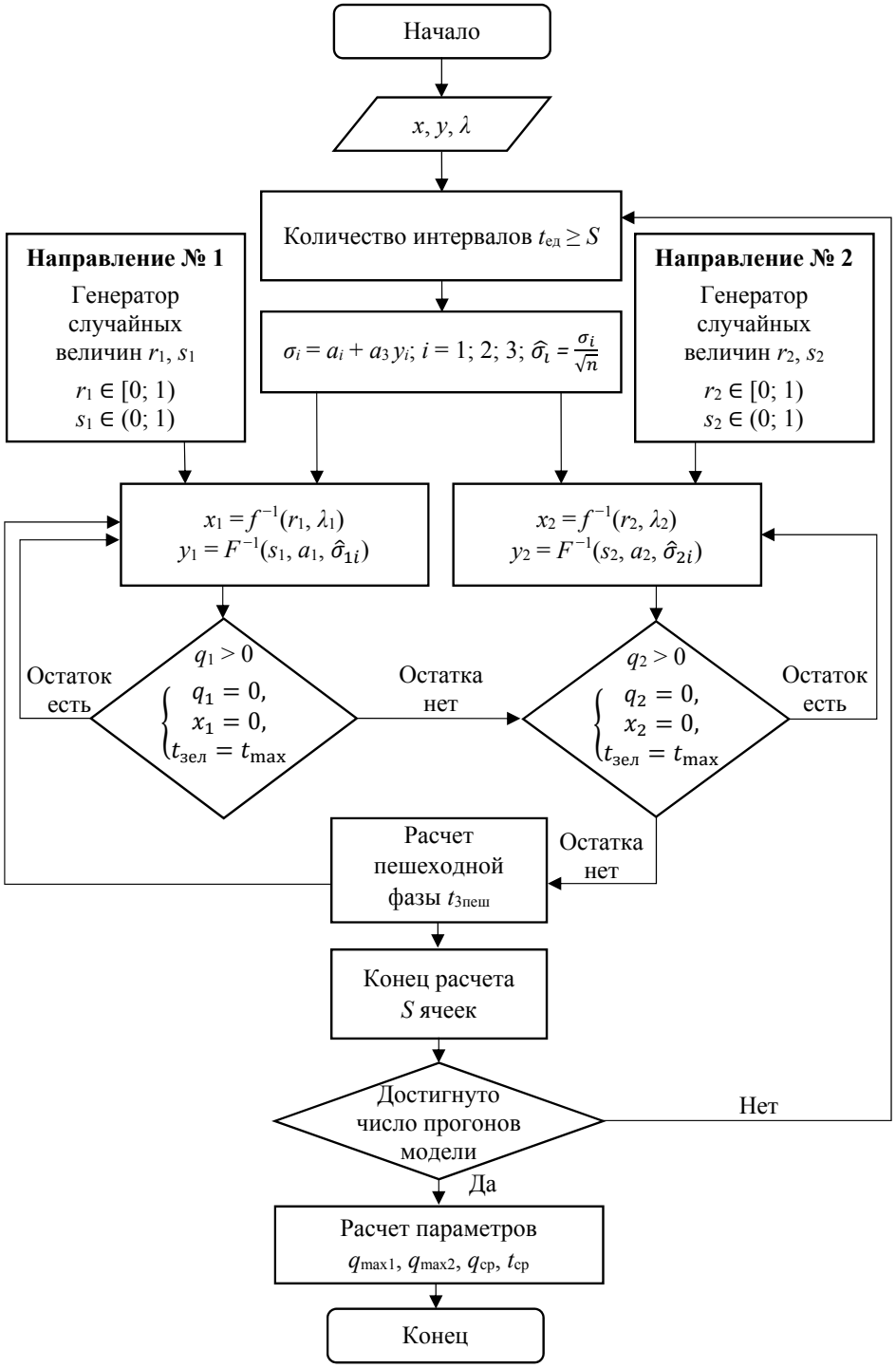

Рис. 5. Алгоритм адаптивного регулирования дорожного движения

Fig. 5. Algorithm for adaptive traffic control

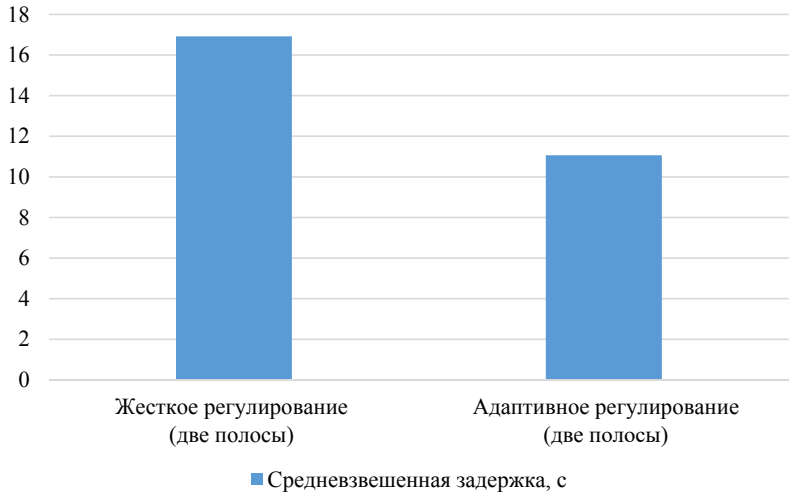

Рис. 6. Сравнение по средневзвешенной задержке автомобилей по обоим направлениям

Fig. 6. Comparison by weighted average delay of vehicles in both directions

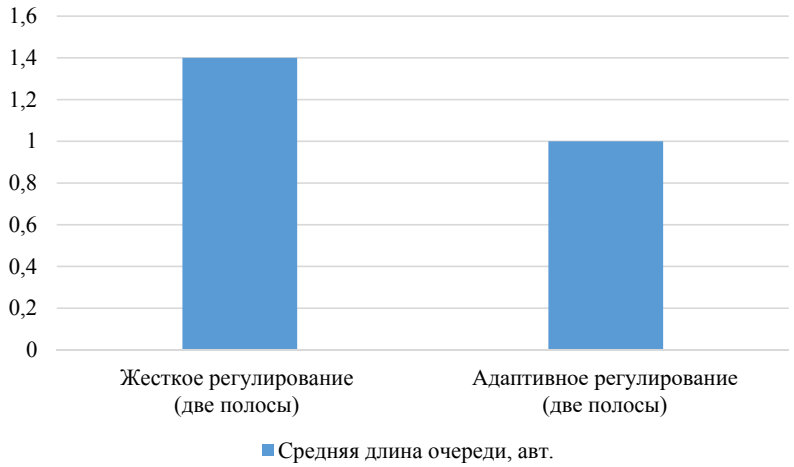

Рис. 7. Сравнение по средней накопленной длине очереди

Fig. 7. Comparison by the average accumulated queue length

Обсуждение

Полученные результаты позволяют сравнить режимы регулирования транспортного пересечения [6]. По результатам сравнения осуществляется выбор наиболее эффективного режима регулирования. Но даже если оба предложенных режима регулирования не являются оптимальными для рассматриваемого участка, на основании полученных данных можно выстроить стратегию совершенствования узла более радикальными способами (увеличение количества полос движения, устройство развязки в разных уровнях и др.).

Существующие программные продукты, применяемые в смежной сфере, работают без учета специфики климатических зон и сложившегося характера дорожного движения. Такие программные комплексы, как Vissim и AnyLogic, имеют закрытый программный код, и внесение необходимых корректировок не представляется возможным. Также имеются региональные особенности движения по всему миру, что создает сложности для составления единой модели движения транспортных потоков [5, 9]. Такой подход позволяет делать укрупненные расчеты для составления общей картины и визуализировать движение автомобильных потоков. На уровне отдельных транспортных пересечений долговременный прогноз будет неточным, и отсутствие учета региональной специфики помешает в построении стратегии развития улично-дорожной сети.

Разработанные модели транспортных пересечений или участков улично-дорожных сетей на данный момент широко представлены как в Российской Федерации, так и за рубежом. Основой разработки модели являются программные инструменты Vissum, AniLogic. Они имеют закрытый программный код, зависимость от удаленного администратора, ограниченность лицензии на площадь сети моделирования, возможный санкционный запрет, поэтому возникают сложности их применения. В плане развития собственных систем моделирования улично-дорожной сети подход использования зарубежных ПО не представляется оптимальным.

Заключение

На основании анализа полученных данных можно сделать следующие выводы:

1. В виде линейной функции построена математическая модель, описывающая неравномерность фактической пропускной способности регулируемого пересечения от схемы организации и условий дорожного движения.
2. В параметрах модели значимыми параметрами, влияющими на неравномерность, являются: сложность пересечения по способу организации движения и фактическая пропускная способность за время цикла/фазы светофорного регулирования.
3. Предложенная модель может быть использована при оптимизации организации дорожного движения на улично-дорожной сети с дальнейшей целью снижения нестабильности потока, приводящей к увеличению длины очередей, увеличению задержек и снижению безопасности дорожного движения, т. к. проводится анализ жесткого и адаптивного режимов регулирования транспортного пересечения.
4. Предложенную модель можно использовать в имитационных моделях работы регулируемого пересечения, вычисляемых по методу Монте-Карло, для адаптации эталонной модели работы пересечения к реальным условиям движения.
5. Программная реализация модели может быть использована для моделирования реальных узлов на улично-дорожной сети с целью оптимизации управления движением или планирования мер по реконструкции (совершенствованию) пересечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андронов Р. В. Влияние организации движения на регулируемом пересечении на равномерность пропускной способности / Р. В. Андронов, Е. Э. Леверенц, Д. А. Гензе, Е. Н. Легостаева // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 6 (83). С. 179-185.
2. Андронов Р. В. Моделирование очередей на регулируемых пересечениях улично-дорожной сети крупного города в условиях плотного транспортного потока: дис. канд. техн. наук / Р. В. Андронов. Тюмень, 2007. 187 с.
3. Андронов Р. В. Понятие затора и формирование очередей на регулируемом пересечении в условиях плотного транспортного потока / Р. В. Андронов, Б. П. Елькин, Д. А. Гензе // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 1. С. 39-41.
4. Андронов Р. В. Применение статистического моделирования для оценки эффективности адаптивного регулирования и реконструкции пересечений улично-дорожной сети / Р. В. Андронов, Е. Э. Леверенц // Архитектура, строительство, транспорт. 2021. № 3. С. 40-49.
5. Тестешев А. М. Дистанционный мониторинг транспортных потоков г. Тюмени при различных состояниях дорожного покрытия на основе спутникового наблюдения / А. М. Тестешев, А. А. Тестешев, И. Е. Лощинина // Актуальные проблемы архитектуры, строительства, энергоэффективности и экологии — 2016: сб. материалов международной научно-практической конференции: в 3 томах (Тюмень, 27-29 апреля 2016 г.). Тюмень: Тюм. индустр. ун-т, 2016. Том 1. С. 167-173.
6. El Zarwi F. A discrete choice framework for modeling and forecasting the adoption and diffusion of new transportation services / F. El Zarwi, A. Vij, J. L. Walker // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2017. Vol. 79. Pp. 207-223. DOI: 10.1016/j.trc.2017.03.004
7. Hongsheng Qi. Monte Carlo Tree Search-based intersection signal optimization model with channelized section spillover / Hongsheng Qi, Xianbiao Hu // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2019. Vol. 106. Pp. 281-302. DOI: 10.1016/j.trc.2019.07.017
8. Lidén T. An optimization model for integrated planning of railway traffic and network maintenance / T. Lidén, M. Joborn // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2017. Vol. 74. Pp. 327-347. DOI: 10.1016/J.TRC.2016.11.016
9. Nyantakyi E. K. Synchronization of signalised intersections: A case study of three major intersections on the 24th February Road, Kumasi, Ghana / E. K. Nyantakyi, C. A. Adams, J. K. Borkloe, D. Pobee // International Journal of Engineering Research and Applications. 2013. Vol. 3. Iss. 4. Pp. 2566-2590.
10. Seunghyeon Lee. Integrated deep learning and stochastic car-following model for traffic dynamics on multi-lane freeways / Seunghyeon Lee, Dong Ngoduy, M. Keyvan-Ekbatani // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2019. Vol. 106. Pp. 360-377. DOI: 10.1016/j.trc.2019.07.023
11. Tiancheng Ruan. Stability of heterogeneous traffic considering impacts of platoon management with multiple time delays / Tiancheng Ruan, Linjie Zhou, Hao Wang // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2021. Vol. 583. P. 126294. DOI: 10.1016/j.physa.2021.126294

Roman V. ANDRONOV[1]
Evgeniy E. LEVERENTS[2]
Tatyana V. MALTSEVA[3]

UDC 519.872.6

MODELING TRANSPORT INTERSECTIONS OF CITY STREETS WITH ADAPTIVE TRAFFIC CONTROL

[1] Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor,
Department of Automobile Roads and Airfields,
Tyumen Industrial University
aroma77777@mail.ru; ORCID: 0000-0001-6574-8456

[2] Senior Lecturer, Department of Structural Mechanics,
Tyumen Industrial University
leverentsee@tyuiu.ru; ORCID: 0000-0001-6574-8456

[3] Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor,
Department of Structural Mechanics,
Tyumen Industrial University
maltsevatv@tyuiu.ru; ORCID: 0000-0002-0274-0673

Abstract

The introduction of automated traffic control systems on the road network will improve the efficiency of its work. This will lead to an increase in throughput and improve the uniformity of traffic parameters. The number of stops, braking, wear of the undercarriage of cars, consumption of engine oil, fuel will decrease, and the environmental burden on the environment will be reduced.

Modeling transport intersections is one of the fundamental methods for studying the functioning of the road network. This method is used in all types of work related to the improvement, modification, reconstruction, and expansion of the road network. Modern techniques for modeling traffic intersections allow recreating the movement of all road users through them, and predicting the results for many years to come, considering changes in both external factors (number of users for crossing) and internal (crossing configuration).

Citation: Andronov R. V., Leverents E. E., Maltseva T. V. 2022. “Modeling transport intersections of city streets with adaptive traffic control”. Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 8, no. 1 (29), pp. 144-160.
DOI: 10.21684/2411-7978-2022-8-1-144-160

© University of Tyumen

To evaluate the efficiency of the intersection, the initial data are taken from field observations. These include a random value of the traffic flow; pedestrian flows; traffic light cycle length; proximity to other intersections; the length of the transport queue when a permissive traffic light signal is given. The analysis of the obtained data makes it possible to assess the current situation on the road network and does not allow to make a forecast for the future when the parameters of the transport intersection change. This is where intersection modeling comes in handy. The intersection model allows predicting the operation of a traffic intersection, considering changes in both the entire road network and particular changes in the traffic intersection itself.

The article proposes a transport intersection model based on experimental data obtained during a full-scale experiment, as well as taking into account the uneven throughput. In relation to a traffic intersection, the capacity unevenness index affects the overall capacity of the intersection, traffic safety through the intersection, the magnitude of traffic delays, the magnitude of traffic losses, and the number of maneuvers in the stream. In addition, the introduction of the non-uniformity parameter will make it possible to predict the magnitude of transport delays and queues more accurately.

The proposed model can be used to create a set of measures to improve the road network of large and major cities, a decision to rebuild a transport intersection, or build an interchange in its place.

Keywords

Mathematical model, controlled intersections, adaptive control, automated traffic control system, traffic flows, delays and queues of vehicles, Monte-Carlo method.

DOI: 10.21684/2411-7978-2022-8-1-144-160

REFERENCES

1. Andronov R. V., Leverents E. E., Genze D. A., Legostaeva E. N. 2020. “Influence of the organization of traffic at the controlled intersection on the uniformity of traffic capacity”. Bulletin of Civil Engineers, no. 6 (83), pp. 179-185. [In Russian]
2. Andronov R. V. 2007. “Modeling queues at controlled intersections of the road network of a large city in a dense traffic flow”. Cand. Sci. (Tech.) diss. Tyumen. 187 p. [In Russian]
3. Andronov R. V., Elkin B. P., Genze D. A. 2015. “The concept of congestion and the formation of queues at a controlled intersection in a dense traffic flow”. Scientific and technical bulletin of the Volga region, no. 1, pp. 39-41. [In Russian]
4. Andronov R. V., Leverents E. E. 2021. “Application of statistical modeling to assess the effectiveness of adaptive regulation and reconstruction of intersections of the street-road network”. Architecture, construction, transport, no. 3, pp. 40-49. [In Russian]
5. Testeshev A. M., Testeshev A. A., Loshchinina I. E. 2016. “Remote monitoring of traffic flows in Tyumen under various conditions of the road surface on the basis of satellite observation”. Actual problems of architecture, construction, energy efficiency and ecology — 2016: Collection of materials of the international scientific and practical conference: in 3 volumes (Tyumen, 27-29 April 2016), vol. 1, pp. 167-173. [In Russian]

6. El Zarwi F., Vij A., Walker J. L. 2017. "A discrete choice framework for modeling and forecasting the adoption and diffusion of new transportation services". Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 79, pp. 207-223. DOI: 10.1016/j.trc.2017.03.004
7. Hongsheng Qi, Xianbiao Hu. 2019. "Monte Carlo Tree Search-based intersection signal optimization model with channelized section spillover". Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 106, pp. 281-302. DOI: 10.1016/j.trc.2019.07.017
8. Lidén T., Joborn M. 2017. "An optimization model for integrated planning of railway traffic and network maintenance". Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 74, pp. 327-347. DOI: 10.1016/J.TRC.2016.11.016
9. Nyantakyi E. K., Adams C. A., Borkloe J. K., Pobee D. 2013. "Synchronization of signalised intersections: A case study of three major intersections on the 24th February Road, Kumasi, Ghana". International Journal of Engineering Research and Applications, vol. 3, iss. 4, pp. 2566-2590. [In Russian]
10. Seunghyeon Lee, Dong Ngoduy, Keyvan-Ekbatani M. 2019. "Integrated deep learning and stochastic car-following model for traffic dynamics on multi-lane freeways". Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 106, pp. 360-377. DOI: 10.1016/j.trc.2019.07.023
11. Tiancheng Ruan, Linjie Zhou, Hao Wang. 2021. "Stability of heterogeneous traffic considering impacts of platoon management with multiple time delays". Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, vol. 583, p. 126294. DOI: 10.1016/j.physa.2021.126294