

ОТСУТСТВИЕ АВТОКОРРЕЛЯЦИИ ВРЕМЕННОГО РЯДА ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА КАК КРИТЕРИЙ ИЗОЛИРОВАННОСТИ РЕГУЛИРУЕМОГО ПЕРЕСЕЧЕНИЯ

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-3-54-60

Manuscript received 07 February 2025;
Accepted 11 March 2025

Андронов Роман Валерьевич,
Тюменский индустриальный университет
г. Тюмень, Россия, aroma7777@mail.ru

Леверенц Евгений Эдуардович,
Тюменский индустриальный университет
г. Тюмень, Россия

Чепур Петр Владимирович,
Тюменский индустриальный университет
г. Тюмень, Россия

Ключевые слова: изолированные регулируемые пересечения, стационарность транспортного потока, автокорреляция временного ряда транспортного потока, тест Бройша-Годффри, тест Дарбина-Уотсона, городские улицы

В существующих нормативных документах критерием изолированного регулируемого пересечения, является расстояние до ближайших регулируемых узлов в 1,6 км. Исходя из него, практически все пересечения в городе переводятся в разряд неизолированных с соответствующими управленческими решениями в плане организации движения. В реальности многие транспортные узлы с намного меньшими расстояниями между соседними светофорами можно считать изолированными как с жестким, так и с адаптивным регулированием. В статье предлагается гипотеза о том, что при наличии циклостационарности транспортного потока, будет наблюдаться автокорреляция 1-го порядка значений временного ряда транспортного потока. Предлагается проверить такую автокорреляцию по тестам Дарбина-Уотсона и Бройша-Годффри по коротким промежуткам времени $\tau=5$ сек. Проводится анализ на автокорреляцию транспортного потока на перегонах УДС г. Тюмени. В заключении приводится определение "изолированного" пересечения. Изолированным по параметрам транспортного потока будет считаться пересечение, входящий транспортный поток на которое будет подаваться без значимой автокорреляции значений по интервалам времени.

Информация об авторах:

Андронов Роман Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных дорог и аэродромов, Тюменский индустриальный университет г. Тюмень, Россия

Леверенц Евгений Эдуардович, старший преподаватель кафедры строительной механики, Тюменский индустриальный университет г. Тюмень, Россия

Чепур Петр Владимирович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой строительной механики, Тюменский индустриальный университет г. Тюмень, Россия

Для цитирования:

Андронов Р.В., Леверенц Е.Э., Чепур П.В. Отсутствие автокорреляции временного ряда транспортного потока как критерий изолированности регулируемого пересечения // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №3. С. 54-60.

For citation:

R. V. Andronov, E. E. Leverets, P. V. Chepur, "The absence of autocorrelation in the traffic flow time series as a criterion for the isolation of a controlled intersection," *T-Comm*, 2025, vol. 19, no.3, pp. 54-60. (in Russian)

Введение

При планировании организации дорожного движения на объектах улично-дорожной сети (УДС) или выбора управляющих воздействий в автоматизированной системе управления дорожным движением (АСУДД) требуется знать характер распределения интервалов между транспортными средствами в транспортном потоке, который формируется ранее по улице и учитывает наличие пересечений и съездов выше по движению. На временные интервалы между автомобилями влияют такие параметры как: общая интенсивность движения, состав потока, загрузка пересечений, расстояние между соседними узлами [1-7].

Общие стратегии по улучшению организации дорожного движения с использованием автоматизированных систем управления движением, такими как «Spectrum 2.0», SCOOT и UTOPIA [4, 8] можно сформировать в три вида:

- Жесткое светофорное регулирование;
- Координированное управление взаимосвязанными пересечениями;
- Адаптивное управление, подстраивающееся под входящий транспортный поток и работающее по принципам: поиска «разрыва в потоке», пропуска образовавшейся очереди, пропуска движущегося к пересечению общественного транспорта и др.

Отдельно выделяются т.н. *изолированные пересечения*, на которых при низкой интенсивности движения рекомендуется применять жесткое регулирование [6]. На таких же пересечениях с высоким уровнем загрузки методики дают рекомендации применять адаптивное управление транспортным потоком для возможности повысить таким образом пропускную способность и снизить общие задержки на 15-30% [4,9]. На близко расположенных узлах удобнее и эффективнее будет применять координированное регулирование (в том числе т.н. «зеленую волну») для синхронного прохода групп автомобилей [4]. «...Наличие «пачек» в потоках также является результатом малой изменчивости структуры потока при его прохождении смежных перекрестков, т.е. следствием инерционности в изменении интервалов между последовательными автомобилями. Инерционность объекта управления говорит о возможностях прогнозирования изменений его характеристик в небольших интервалах...» [8]. В случае отсутствия группового движения управление светофорными объектами может прогнозироваться вероятностными характеристиками интервалов между автомобилями на основании известных в теории транспортных потоков распределений.

В большинстве исследований, в частности [10-12], предлагается представлять пересечение как систему массового обслуживания с пуассоновским входящим потоком с показателем интервалом между заявками (марковский процесс), а время обслуживания либо детерминированным, либо полумарковским [12] процессом. При такой постановке возникает вопрос о моделировании заявок при нестационарном поступлении заявок.

Постановка задачи

На первый взгляд при кажущейся разумной обоснованности эвристического подхода о подходах к управлению светофорным регулированием, можно подметить недостаточную аргументированность и вольную интерпретацию исходных

данных о характере движения на пересечении. Хотя при схожей ситуации назначения типа и конфигурации пересечения [1, 2, 7] даются четкие технико-экономические обоснованные рекомендации по выбору типа пересечения (пересечение в одном уровне, круговое пересечение типа «roundabout»). Ситуацию запутывает также то, что под понятием «изолированное пересечение» понимают как пересечение, находящееся достаточно далеко от соседних, которые априорно на него не влияют [1], так работающее вне связи с соседними узлами по запрограммированному для этого пересечения алгоритму [4, 10], что равносильно синониму «жесткое» регулирование. В нормах [1] за критерий изолированности принято расстояние в 1,6 км, что равно 1 сухопутной миле. При применении данного критерия к улично-дорожной сети городов все городские регулируемые узлы автоматически становятся неизолированными. Данный критерий перешел в документ [7] и, на взгляд авторов статьи, не является информативным. Также наблюдаются ситуации, когда транспортный поток с близко расположенного пересечения может подаваться сравнительно равномерно из-за значительного количества поворачивающих транспортных средств с пересекаемых направлений.

Все вышесказанное позволяет сформулировать конечную цель исследования – уточнить формулировку понятия «*изолированное пересечение*» и рассмотреть возможность эффективного управления светофорным регулированием на регулируемых пересечениях, расположенных сравнительно близко друг к другу на расстояниях 200-1400 м при отсутствии синхронизации их работы. Можно предположить, что равномерность подхода будет обеспечиваться если будет наблюдаться стационарность транспортного потока в течении сравнительно коротких промежутков времени (30-60 мин).

В данном исследовании предлагается отделить работу т.н. «изолированных» пересечений, на которые существенно не влияют другие пересечения, расположенные ранее по улице от «неизолированных». Поставленную в статье задачу предполагается решать «продвижением» с постоянным шагом $\Delta t = 5 \text{ сек}$ [14] в отличие от дискретно-событийного моделирования. Интервал в 5 секунд выбран как наиболее удобный для моделирования работы адаптивного регулируемого пересечения [4, 8] и по которому принимается решение о переключении сигнала светофора.

В [13] был проведен анализ между периодическими структурами (т.н. «пачками») в транспортном потоке методом дисперсионного анализа. При всем достоинстве и простоте применение данного метода затруднено, т.к. перед его применением необходимо принудительно выделить различающиеся циклические паттерны во временном ряде транспортного потока. Ситуацию может осложнить отсутствие выраженной цикличности паттернов, если генератор заявок (согласно терминологии теории очередей) будет посылать пачки переменной продолжительности и цикличности, что может быть вызвано применением адаптивного управления.

Вопросами стационарности транспортного потока и ее влияние на способы управления дорожным движением, в т.ч. адаптивным, занимались ряд авторов [15-19].

В данном случае предлагается решить поставленную задачу анализом временного ряда транспортного потока на автокорреляцию значений, так как периодическое групповое движение автомобилей в определенные интервалы нарушит строгую стационарность временного ряда.

Исходя из вышеизложенного можно предложить определение изолированного пересечения – пересечение, на котором характеристики входящего потока не имеют значимой автокорреляции по количеству подходящих за короткое время интервалов (5 сек) или по временным интервалам между подходящими транспортными средствами.

Временные ряды подразделяются на стационарные и нестационарные. Так как наблюдаемые значения интенсивности движения являются повторяющимися с разной степенью периодичности, то нестационарные ряды в данном исследовании не рассматриваются.

Стационарные временные ряды делятся на стационарные в широком смысле и в узком смысле.

Ряд x_t называется *стационарным в узком смысле (строго стационарным)*, если $F(y_{t_1}, \dots, y_{t_m}) = F(y_{t_1+\tau}, \dots, y_{t_m+\tau})$ для любых моментов $t_1, \dots, t_m$ и любого сдвига τ [17].

То есть, вне зависимости от начала отсчета характеристик ряда, основные 2-х моментов ряда (математического ожидания μ и дисперсии σ^2) могут определиться на любом из отрезков ряда. Точность нахождения этих величин зависит только от размеров отрезка ряда, а не точки отсчета.

Ряд x_t называется *стационарным в широком смысле*, если $E(x_t) = \mu$ при всех t , $Var(y_t) = \sigma^2$ при всех t , ковариационная матрица $Cov(y_t, y_{t+\tau})$ зависит только от s (и не зависит от t). То есть наблюдается некоторая автокорреляция членов ряда, которая убывает с увеличением аргументов [17, 18].

К стационарным потокам в широком смысле относят т.н. *циклостационарные* потоки [17, 18]. По мнению авторов статьи, движение транспортных потоков по городским улицам (внутри относительного которого интервала времени 30-60 мин) будет представлять преимущественно циклостационарный процесс с пиками во время прохождения «пачек» автомобилей и локальными минимумами, где поток будет иметь только случайную компоненту.

Случайный процесс $Y(t)$ называют циклостационарным в широком смысле [17] в том случае, когда его математическое ожидание и автокорреляционная функция являются периодическими во времени функциями с периодом T :

$$\begin{aligned} m_Y(t+T) &= m_Y(t) \\ R_Y(s+T, u+T) &= R_Y(s, u) \end{aligned} \quad (1)$$

для всех t и u .

$$E(Y_t) = \mu < \infty, Var(Y_t) = \gamma_0, Cov(Y_t, Y_{t-\tau}) = \gamma_\tau, \quad (2)$$

$$\gamma_\tau = E((Y_t - \mu)(Y_{t-\tau} - \mu)). \quad (3)$$

Величина γ_τ называется автокорреляцией.

Совокупность значений γ_τ в зависимости от τ называется автоковариационной функцией. При $\tau = 0$ получаем дисперсию временного ряда $Var(Y_t) = \gamma_0$

Автокорреляционная функция (autocorrelation function, ACF):

$$r_\tau = \frac{Cov(Y_t, Y_{t-\tau})}{Var(Y_t)} = \frac{\gamma_\tau}{\gamma_0} \quad (4)$$

$$r = 1, |r_\tau| \leq 1 \quad (5)$$

Отличие циклостационарного процесса от стационарного в широком смысле заключается в том, что случайный процесс проявляет свойство циклостационарности в широком смысле тогда, когда имеет место корреляция между произвольно смещенными в частотной области версиями данного процесса. Стационарным в широком смысле случайный процесс можно

назвать тогда, когда не имеет места корреляция между произвольно смещенными версиями случайного процесса: $Ra(y_\tau) \equiv 0$ для всех $\alpha \neq 0$, где τ – временной лаг автокорреляции.

Для транспортных потоков, двигающихся по улично-дорожной сети это означает, что периодически транспортный поток, двигаясь «пачками» и имея локальные максимумы и минимумы через время T в целом сохраняет постоянную интенсивность движения (за время масштаба 30-60 минут). То есть циклостационарность можно рассматривать как частный случай стационарности в широком смысле, так как математическое ожидание при увеличении длины временного ряда стремится к искомому, но не будет наблюдаться окончательного затухания автокорреляционной функции с увеличением временного лага τ (рис. 1).

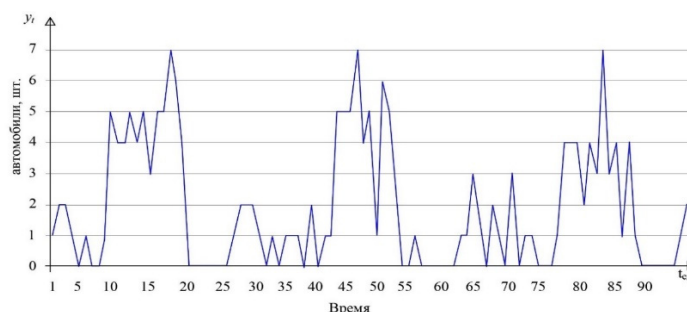


Рис. 1. Пример стационарного в широком смысле (циклостационарного) потока

Для этого требуется представить транспортный поток, проходящий через сечение городских улиц за 5 секунд ($t_{ед}$) как временной ряд и исследовать его на одну из важнейших характеристик – автокорреляцию 1-го порядка с лагом 1.

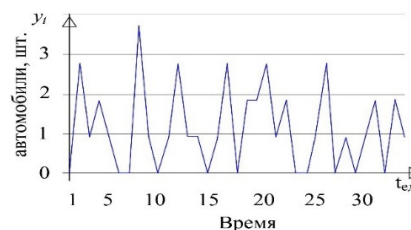


Рис. 2. Пример стационарного узком смысле потока

Предполагаемую зависимость значений y_t от y_{t-1} можно представить на рисунках 3 и 4.

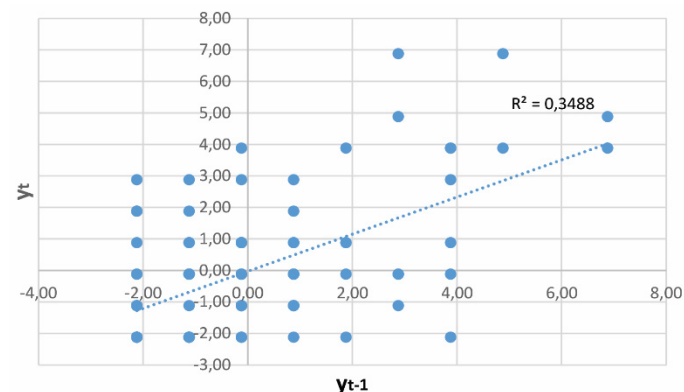


Рис. 3. Зависимость значений y_t от y_{t-1} для циклостационарного потока

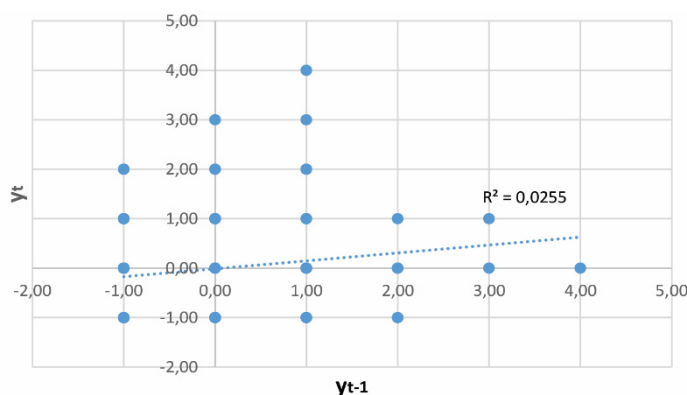


Рис. 4. Зависимость значений y_t от y_{t-1} для стационарного в узком смысле потока

Из рисунков 3 и 4 показывается некоторая автокорреляционная регрессия значений y_t от y_{t-1} с рассчитанным коэффициентом детерминации R^2 . На рисунке 3 визуально наблюдается автокорреляция значений. Таким образом необходимо проверить значения временных рядов транспортного потока на значимость автокорреляции.

Эксперимент

Для такого анализа существуют специализированные программные продукты, такие, например, как Eviews 10.0, имеющие также эконометрический характер, которые также можно использовать для анализа временных рядов транспортного потока. Также решения можно найти в приложениях программной среды R-4.0.3.

Описание процесса, скользящего среднего 1-го порядка (MA1):

$$y_i = \mu + r\varepsilon_{i-1} + \varepsilon_i, \quad (6)$$

Описание процесса авторегрессии 1-го порядка (AR1):

$$y_i = \mu + ry_{i-1} + \varepsilon_i, \quad (7)$$

Где μ – константа временного ряда, средняя интенсивность движения за Δt . Во временном ряде транспортного потока $\mu > 0$.

Далее, в работе было выбрано 25 различных перегона магистральных улиц в г. Тюмени с целью проведения исследований на автокорреляцию значений по дискретному времени $\text{тед}=5$ секунд. Выборка для проведения исследования составляла 100-120 значений.

ε_t – случайная составляющая временного ряда. Принимается в работах по описанию временных рядов за «белый шум» с нормальным распределением $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$;

r – коэффициент автокорреляции (для авторегрессии r -го порядка несколько коэффициентов r_i). При $r = 0$ автокорреляция отсутствует;

MA1 обозначает процесс скользящего среднего (Moving Average) 1-го порядка; AR1 – процесс авторегрессии 1-го порядка.

В теории транспортных потоков в основном применяется различные вариации (смешанное, фазовое) пуассоновского потока и распределение Эрланга [18-23] из-за преимущественно экспоненциального характера интервала между транспортными средствами в потоке. Поэтому можно обозначить случайные остатки авторегрессии как $\varepsilon_i \sim iid(0, \sigma^2)$.

Данные временного ряда можно тестировать на автокорреляцию по следующим тестам:

1. Тест Дарбина-Уотсона (Darbin-Watson test);
2. Бройша-Годфри (Breusch-Godfrey test).

Тест Дарбина-Уотсона с проверкой автокорреляции 1-го порядка рассчитывается по формуле:

$$DW = \frac{\sum (e_t - e_{t-1})^2}{\sum e_t^2}, \quad (8)$$

где e_t – значение остатка в момент t , $e_t = \mu - y_t$.

Тест Дарбина-Уотсона (DW) имеет несколько ограничений. Он тестирует только уравнения типа 6 и имеет предположки нормального распределения остатков e_t .

Тест Бройша-Годфри (BG) рассчитывается по формуле:

$$e_t = e^T t + \sum_{i=1}^p r e_{t-i} + \varepsilon_t \quad (9)$$

Статистика BG сравнивается с критическим значением статистики хи-квадрат для 2-х степеней свободы.

Данные, полученные в ходе исследования, будут проверяться по обоим тестам. Так как в уравнение авторегрессии AR1 предполагаемое математическое ожидание содержится в предыдущем значении y_{t-1} , что мнению авторов является недопустимым искажением процесса описания движения автомобилей, так как остатки авторегрессии должны симметрично располагаться вокруг значения μ , предполагаемой моделью описания транспортного потока как временного ряда будет уравнение MA1 (формула 6). Т.е. процессы движения транспортных средств по проезжей части по мнению авторов статьи будут являться процессами скользящего среднего, а не процессами авторегрессии (формула 7), в которых данный тип критерия является неприменимым.

Результаты

Результаты приведены в таблице 1.

При значениях менее 1,65 по первому тесту и более 5,99 по второму (табл. 1) автокорреляция признавалась значимой. Большинство исследованных перегонов показали синхронные качественные значения критерия автокорреляции по обоим критериям. Это говорит о том, что для оценки автокорреляции можно применять критерий DW, несмотря на том, что он основан на предположках о нормальности распределения остатков.

Такой результат данного теста с тестом BG можно объяснить большим количеством проверяемых значений и асимптотически близкий результат к результату с «нормальностью» остатков. Но все равно, за основной критерий по мнению авторов статьи, необходимо брать BG тест.

Таблица 1

Полученные значения статистики Дарбина-Уотсона и Бройша-Годфри

Наименование перегона и направление движения	Количество полос движения в напр.	Статистика Дарбина-Уотсона			Статистика Бройша Годфри	
		Полученные значения	Критические значения для $n=100$		Полученные значения	Критические значения для вероятности 0,95
			dL	dU		
Ул. 50 лет Октября (от ул. Профсоюзной до ул. М.Горького)	3	1,56	1,65	1,69	4,42	5,99
Ул. 50 лет Октября (от ул. М.Горького до ул.Профсоюзной)	3	0,81	1,65	1,69	34,5	5,99
Ул. Мельникайте (от п/провода к ул. Республики)	3	0,5	1,65	1,69	55,2	5,99
Ул. Мельникайте (от ул. Республики к п/проводу)	3	0,7	1,65	1,69	41,6	5,99
Ул. Профсоюзная (от ул. Ленина до ул. Герцена)	4	0,51	1,65	1,69	54,5	5,99
Ул. Усадьбная (от ул. Щербакова)	1	1,82	1,65	1,69	0,58	5,99
Ул. Усадьбная (к ул. Щербакова)	1	1,85	1,65	1,69	0,44	5,99
Ул. Щербакова (от Велижанского тракта к ул. Безымянной)	2	1,85	1,65	1,69	0,47	5,99
Ул. Щербакова (от ул. Безымянной до Велижанского тракта)	2	1,68	1,65	1,69	2,52	5,99
Ул. Велижанский тракт (от ул. Мелиораторов к ул. Щербакова)	2	1,68	1,65	1,69	2,52	5,99
Ул. Велижанский тракт (от ул. Щербакова к ул. Мелиораторов)	2	1,24	1,65	1,69	13,7	5,99
Ул. Интернациональная (от ул. Восстания к ул. Амурской)	2	2,18	1,65	1,69	1,08	5,99
Ул. Интернациональная (от ул. Амурской к ул. Восстания)	2	1,82	1,65	1,69	0,73	5,99
Ул. Магнитогорская (к ул. Московский тракт)	1	1,56	1,65	1,69	4,19	5,99
Ул. Московский тракт (от ТЦ «Колумб» к ул. Магнитогорской)	3	0,72	1,65	1,69	40,6	5,99
Ул. Герцена (от ул. Челюскинцев)	2	1,13	1,65	1,69	17,8	5,99
Ул. Герцена (от ул. Грибоедова)	2	1,48	1,65	1,69	6,36	5,99
Ул. Первомайская (от ж/д вокзала)	2	1,71	1,65	1,69	6,06	5,99
Ул. Широтная (от ул. Федорова к ул. Пермякова)	3	0,61	1,65	1,69	48,0	5,99
Ул. Мельникайте (от ул. 30 лет Победы к ул. Широтной)	3	1,91	1,65	1,69	0,2	5,99
Ул. Мельникайте (от ул. Широтной к ул. Гнаровской)	3	1,46	1,65	1,69	6,54	5,99
Ул. Западносибирская (от ул. Юбилейной)	2	2,06	1,65	1,69	0,29	5,99
Ул. Западносибирская (от р.Тура)	1	1,72	1,65	1,69	1,81	5,99
Ул.Тобольский тракт (от ул. Ершова до ул. Судоремонтной)	2	1,14	1,65	1,69	4,43	5,99
Ул.Тобольский тракт (от ул. Судоремонтной до ул.Ершова)	2	1,54	1,65	1,69	16,7	5,99

Выводы

Таким образом, по результатам исследования можно сделать вывод о том, что те перегоны, которые не показали значимой автокорреляции, можно считать изолированными и моделировать транспортный поток и работу средств регулирования и управления на основе теории транспортных потоков.

В противном случае автокорреляция показывает синхронный групповой характер движения автомобилей (в том числе «пачками») и моделирование должно производиться раздельно. При подборе организации движения или введения адаптивного светофорного регулирования по типу поиска разрыва в потоке, рекомендуется проверить данное направление пересечения на *изолированность* по критерию Бройша-Годфри или Дарбина-Уотсона.

Как результат исследования можно предложить определение «изолированного пересечения»: изолированным по параметрам транспортного потока будет считаться пересечение, входящий транспортный поток на которое будет подаваться без значимой автокорреляции значений по интервалам времени $t_{ед}$.

Если регулируемое пересечение будет являться изолированным по параметрам транспортного потока, то вопросы светофорного регулирования и управления им (адаптивное) можно рассматривать вне контекста взаимодействия с другими узлами, даже если соседние перекрестки будут находиться на сравнительно близком расстоянии (менее 200-300 м).

Литература

1. Руководство по пропускной способности автомагистралей (НСМ 2000) // Под ред. национального исследовательского совета. Вашингтон: TRB, 2000.
2. Справочник по определению размеров систем дорожного движения (HBS 2001) // Под ред. исследовательского общества дорог и транспорта №299. Кельн: FGSV Verlag GmbH, 2001.
3. Руководство по пропускной способности для сигнальных перекрестков // Институт инженеров транспорта. Третье издание. Канада: Округ 7.
4. Кременец Ю.А., Печерский М.П., Афанасьев М.Б. Технические средства организации дорожного движения : учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности "Организация и безопасность движения (автомобильный транспорт)" направления подготовки дипломированных специалистов "Организация перевозок и управление на транспорте". М.: Академкнига, 2005. 279 с.
5. Петров В.В. Автоматизированные системы управления дорожным движением в городах. Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2007. 105 с.
6. Руководство по проектированию и внедрению автоматизированных систем управления дорожным движением на базе АСУДД / под общ. ред. Г.Я. Волошина. М.: ВНИИБД МВД СССР, 1981. 232 с.
7. Методические рекомендации по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения. Организация дорожного движения на регулируемых пересечениях. М.: ФДА «Росавтодор», 2017. 91 с.
8. Петров Е.А., Вольф Д. Адаптивная система управления дорожным движением в составе городской ИТС // Дорожная Держава. 2012. № 40. С. 46-49.
9. Andronov R., Leverents E. Effectiveness of adaptive control of traffic light intersection on isolated multi-lane intersections // E3S Web of Conferences : 2018 International Science Conference on Business Technologies for Sustainable Urban Development, SPbWOSCE 2018, St. Petersburg, 10-12 декабря 2018 г. Vol. 110. St. Petersburg: EDP Sciences, 2019. P. 02107. DOI 10.1051/e3sconf/201911002107. EDN DGRBRB
10. Пильгейкина И.А., Власов А.А., Скорикова И.А. Методика формирования многопрограммного управления изолированным перекрестком // XV Международная научно – практическая конференция ITS Forum-Razan, 21.09 – 24.09.2020 года, г. Санкт-Петербург.
11. Минина Д.Н. Моделирование в Matlab движения автомашин на регулируемом перекрестке // Политехнический молодежный журнал. 2022. № 2(67). DOI 10.18698/2541-8009-2022-2-774.
12. Mukhopadhyay S., M. J., P., Kumar A. Approximate Mean Delay Analysis for a Signalized Intersection With Indisciplined Traffic // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017 no. 18(10), pp. 2750-2762. doi:10.1109/tits.2017.2665121
13. Андронов Р.В., Леверенц Е.Э., Доманский В.О., Елькин Б.П. Исследование транспортных потоков городской улично-дорожной сети на стационарность методом дисперсионного анализа // Научно-технический вестник Поволжья. 2022. № 9. С. 7-11.
14. Трухин М.П. Моделирование сигналов и систем. Система массового обслуживания : учебное пособие; под научной редакцией С.В. Поршнева. Санкт-Петербург: Лань, 2022. 232 с.
15. Wang Q., Su C. Examining the Stationarity and Ergodicity of Traffic Flow on Highway Bridges // Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition). 2015. Т. 9. № 4. С. 24-30.
16. Дидковская Л.С. Обоснование области эффективного функционирования адаптивных методов светофорного регулирования – рез оценку параметров транспортного потока // Научные заметки – 2014. №46. С. 137-146.
17. Ефимов Е.Н., Шевзунов Т.Я. Оценка времени задержки циклоstationарных радиосигналов // Гагаринские чтения. 2017. Т. 2017. С. 621-622.
18. Гарднер У.А. Циклоstationарность в коммуникациях и обработке сигналов. Том 1. Нью-Йорк: IEEE press, 1994. 90 с.
19. Slimani N., Amghar M., Sbiti N. Deep learning and time series analysis application on traffic flow forecasting // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 2022. № 5. С. 18.
20. Петров В.В. Автоматизированные системы управления дорожным движением в городах. 3-е издание, стереотипное. Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2021. 99 с.
21. Дрю Д. Теория транспортных потоков и управление ими. М.: Транспорт, 1972. 424 с.
22. Сильянов В.В. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения. М.: Транспорт, 1977. 303 с.
23. Завалицин Д.С., Тимофеева Г.А. Исследование математической модели регулируемого перекрестка // Труды института математики и механики УрО РАН. 2009. Т. 15, № 4. С. 108-119.
24. Швецов В.И. Математическое моделирование транспортных потоков // Автоматика и телемеханика. 2003. № 11. С. 3-46.
25. Ахмадинуров М.М., Тимофеева Г.А. Модели массового обслуживания в задаче оптимизации работы светофора // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. Т. 3, № 1(57). С. 217-227.

THE ABSENCE OF AUTOCORRELATION IN THE TRAFFIC FLOW TIME SERIES AS A CRITERION FOR THE ISOLATION OF A CONTROLLED INTERSECTION

Roman V. Andronov, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia
 Evgeny E. Leverets, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia
 Petr V. Chepur, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia

Abstract

In the existing regulatory documents, the criterion of an isolated controlled intersection is the distance to the nearest controlled nodes of 1.6 km. Based on it, almost all intersections in the city are transferred to the category of non-isolated with the corresponding management decisions in terms of traffic organization. In reality, many transport nodes with much smaller distances between neighboring traffic lights can be considered isolated with both rigid and adaptive regulation. The article proposes a hypothesis that in the presence of cyclostationarity of the traffic flow, there will be a 1st-order autocorrelation of the values of the time series of the traffic flow. It is proposed to check such autocorrelation using the Durbin-Watson and Breusch-Godfrey tests for short time intervals $\Delta t = 5$ sec. An analysis of the autocorrelation of the traffic flow on the sections of the Tyumen road network is carried out. In conclusion, a definition of an "isolated" intersection is given. An intersection will be considered isolated in terms of traffic flow parameters if the incoming traffic flow is supplied to it without significant autocorrelation of values over time intervals.

Keywords: isolated regulated intersections, stationarity of traffic flow, autocorrelation of traffic flow time series, Breusch-Godfrey test, Durbin-Watson test, urban streets

References

- [1] Manual, Highway Capacity. "Highway capacity manual," Washington, DC 2.1 (2000).
- [2] Handbuch für die Bemessung von Strassenverkehrsanlagen (HBS 2001), Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Nr. 299, FGSV Verlag GmbH, Köln (2001).
- [3] Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections, Institute of Transportation Engineers District 7 – Canada, Third Edition, 2008.
- [4] Y.A. Kremenets, M.P. Pechersky, M.B. Afanasiev, "Technical means of road traffic organization," 2005.
- [5] V.V. Petrov, "Automated systems of road traffic control in cities," 2021.
- [6] Guidelines for the design and implementation of automated traffic control systems on the basis of automated traffic control systems, edited by G. Y. Voloshin. USSR, 1981.
- [7] Guidelines for the development and implementation of measures for the organization of traffic, 2007.
- [8] E.A. Petrov, D. Wolf, "Adaptive traffic control system as part of urban ics," [Electronic resource] 2012, E. A. Voytenkov-Mode of access: <http://old.ptvision.ru/assets/Uploads/publications/ITS.pdf>.
- [9] R. Andronov, E. Leverets, "Effectiveness of adaptive control of traffic light intersection on isolated multi-lane intersections," *E3S Web of Conferences*, 2019. Vol. 110, p. 02107. EDP Sciences.
- [10] I.A. Pilgeikina, A.A. Vlasov, I. A. Skorikova, "Methodology of formation of multiprogram control of an isolated intersection," *Computer Research and Modeling*, 2021, no. 13(2), pp. 295-303.
- [11] D.N. Minina, "Modeling in Matlab of car traffic at a regulated intersection," *Polytechnic Youth Journal*. 2022. No. 2 (67). DOI 10.18698/2541-8009-2022-2-774.
- [12] S.M.J., P. Mukhopadhyay, A. Kumar, "Approximate Mean Delay Analysis for a Signalized Intersection With Indisciplined Traffic," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, no. 18(10), pp. 2750–2762. DOI:10.1109/tits.2017.2665121
- [13] R. Andronov, E. Leverets, V. Domanskii, B. Yelkin, "Study of traffic flows of urban street-road network for stationarity by the method of dispersion analysis," *Nauchno-tekhnicheskii vestnik povolzhya*, no. (9), pp. 7-11.
- [14] M.P. Trukhin, "Modeling of signals and systems," Mass service system: textbook, edited by S. V. Porshnev. St. Petersburg: Lan, 2022.
- [15] Q. Wang, C. Su, "Examining the Stationarity and Ergodicity of Traffic Flow on Highway Bridges. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*," (English Edition), 2015, no. 9(4), pp. 24-30.
- [16] L.S. Didkovskaya, "Justification of the area of effective functioning of adaptive methods of traffic light regulation through the estimation of traffic flow parameters," *Scientific Notes*, 2014, no. (46), p. 137.
- [17] E.N. Efimov, T.Y. Shevgunov, "Estimation of delay time of cyclostationary radio signals," *Gagarin Readings*, 2017, pp. 621-622.
- [18] W.A. Gardner, (Ed.), "Cyclostationarity in communications and signal processing," Vol. 1, 1994. New York: IEEE press.
- [19] N. Slimani, M. Amghar, N. Sbiti, "Deep learning and time series analysis application on traffic flow forecasting," *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 2022. No. 5, pp. 18.
- [20] V.V. Petrov, "Automated systems of road traffic control in cities," 2021.
- [21] D. Drew, "Theory of transportation flows and their management," Moscow: Transport, 1972, 424 p.
- [22] V.V. Silyanov, "Theory of traffic flows in road design and traffic organization," 1977.
- [23] D.S. Zavalishchin, G.A. Timofeeva, "Investigation of the mathematical model of a regulated intersection," *Proceedings of the Institute of Mathematics and Mechanics*, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2009, no. 15(4), pp. 108-119.
- [24] V.I. Shvetsov, "Mathematical modeling of transport flows," *Automatics and Telemekhanics*, 2003, no. (11), pp. 3-46.
- [25] M.M. Akhmadinurov, G.A. Timofeeva, "Mass service models in the task of optimization of traffic light operation," *Bulletin of Saratov State Technical University*, 2011, no. 3(1 (57)), pp. 217-227.