D. V. Kapski, S. V. Bogdanovich, S. V. Skirkovsky // Problems of transport safety: Materials of the XII International Scientific and Practical Conference, dedicated to the 160th anniversary of the Belarusian Railway. In 2 parts, Gomel, November 24–25, 2022 / ed. Yu. I. Kulazhenko. Volume Part 2. – Gomel: Educational Institution «Belarusian State University of Transport», 2022. – pp. 119–121.

14. Kapski, D. V. Problems of urban logistics of symbiotic cities / D. V. Kapski // Road transportation and transport logistics: theory and practice: collection of scientific works of the department «Organization of transportation and management of transport» (with international participation) / ed. E. E. Vitvitsky. – Omsk: Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), 2021. – pp. 37–43.

УДК 656

САРАЖИНСКИЙ Д. С., канд. физ.-мат. наук,
доц. кафедры «Транспортные системы и технологии»
E-mail: sarazhinsky@mail.ru

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 21. 07.2023

ПРИВЕДЕНИЕ ТРАНСПОРТНОГО СПРОСА (НА РЕГУЛИРУЕМОМ ПЕРЕСЕЧЕНИИ) ПО ВАРИАЦИИ

Повседневная практика проектирования/реорганизации управления движением на регулируемом пересечении типично опирается на использование той или иной модели транспортного спроса. При выборе такой модели как правило руководствуются соображениями оптимального соотношения между сложностью модели и существенностью тех эффектов, которые с ее помощью могут быть учтены. Однако в некоторых ситуациях исследователи предпочитают брать упрощенные модели спроса даже в том случае, когда заведомо известно, что ее использование приведет к существенным отклонениям в результатах. Одним из таких примеров является задача выбора расчетной интенсивности транспортного спроса для проектирования/реорганизации светофорного регулирования. Типично здесь предпочитают опираться только на величину матожидания интенсивности спроса, в лучшем случае заведомо завышая ее для расчетов с помощью некоторого, как правило, довольно умозрительным образом выбранного способа. Однако, как видится, такая практика отсутствия должного внимания к специфике вариации транспортного спроса, не может рассматриваться как удовлетворительная по причине того, что, во-первых, наиболее типичными в настоящее время являются ситуации с высокой, близкой к максимально возможной пропускной способности пересечения, интенсивностью транспортного спроса, а значит, предположения о несущественности для уровня обслуживания специфики вариативности транспортного спроса перестают быть обоснованными. А во-вторых, типичное для городов близкое расположение регулируемых пересечений с разной длительностью циклов регулирования ведет к росту колебаний транспортного спроса, а значит, делает существенным их влияние на конечные результаты расчетов. Для решения этой проблемы без существенного усложнения существующих подходов и методик в данной работе предлагается, по аналогии с уже известными процедурами приведения транспортных потоков по различным характеристикам, введение естественного понятия приведения транспортного спроса по вариации. Также предлагается и конкретный вариант проведения процедуры такого приведения.

***Ключевые слова**: регулируемое пересечение, неравномерность транспортного спроса, математическое моделирование транспортного спроса, индекс дисперсии.*

Введение

Математическое моделирование работы регулируемого пересечения с необходимостью предполагает наличие той или иной модели транспортного спроса. Существует большое многообразие таких моделей [1–8] – от максимально общих, пытающихся в полной мере учесть специфику случайного характера спроса (и строящихся на основе общих моделей случайных процессов) до более специфических, с упрощенным описанием стохастического поведения (типично на основе моделей потоков случайных событий, таких как, например, пуассоновские) вплоть до полного его игнорирования как в модели равномерного спроса.

При выборе той или иной модели типично руководствуются соображениями оптимального соотношения между сложностью модели и существенностью (для цели исследования) тех эффектов, которые с ее помощью могут быть учтены. Однако зачастую можно наблюдать ситуацию, когда исследователи предпочитают брать упрощенные модели спроса даже в том случае, когда заведомо известно, что ее использование приведет к существенным отклонениям в результатах. Одним из таких ярких примеров является задача выбора расчетной интенсивности транспортного спроса для проектирования/реорганизации светофорного регулирования (на некоторый стационарный по транспортной ситуации период времени в течение суток). Типично здесь предпочитают опираться на величину математического ожидания интенсивности спроса, в лучшем случае заведомо завышая ее для расчетов с помощью некоторого довольно умозрительным образом выбранного способа – так, во многих руководствах наподобие [9; 10] предлагается проводить соответствующую процедуру путем умножения матожидания спроса на коэффициент, характеризующий отношение пиковой (максимальной) интенсивности к средней, что, очевидно, нельзя признать удачным, потому что таким образом может происходить значительное необоснованное завышение этой интенсивности. Еще одним встречающимся подходом [11] является предложение завысить интенсивность до верхней границы области, в границах которой происходит «большинство» случайных колебаний интенсивности. Однако обоснований, в каких случаях что принимать за «большинство», не дано. Вместо этого предлагаются «рецептурные» значения.

Причина распространенности такой ситуации, вероятно, кроется в том, что знания величины матожидания интенсивности спроса достаточно, чтобы адекватно оценить наиболее критичный для работы регулируемого пересечения показатель, коим выступает коэффициент загрузки движением (отношение матожидания транспортного спроса к пропускной способности). Кроме того, при не слишком высоких коэффициентах загрузок формулы, оценивающие такой распространенный показатель эффективности работы пересечения как задержки, типично становятся менее чувствительными к специфике вариативности транспортного спроса, а значит, опять-таки можно ожидать, что основной величиной, определяющей уровень обслуживания, будет коэффициент загрузки; как итог – специфику вариативности учитывать оказывается не обязательно, что обычно в итоге и выбирается, чтобы упростить расчеты и анализ.

Однако, как видится, такая практика не может рассматриваться как удовлетворительная по причине того, что, во-первых, наиболее типичными в настоящее время являются ситуации с высокой, близкой к максимально возможной пропускной способности, интенсивностью транспортного спроса, а значит, предположения о несущественности специфики вариативности транспортного спроса для уровня обслуживания перестают быть обоснованными. А во-вторых, типичное для городов близкое расположение регулируемых пересечений с разной длительностью циклов регулирования ведет к росту колебаний транспортного спроса, а значит, делает существенным их влияние на конечные результаты расчетов.

С одной стороны, для решения данной проблемы достаточно было бы начать напрямую использовать в расчетах величины, характеризующие специфику вариативности спроса (например, коэффициент дисперсии), однако с другой – это усложнило бы вычисления и анализ, плюс к тому шло бы в разрез с устоявшимися подходами и методиками. Данная статья – попытка найти компромисс между этими сторонами, а именно, предлагается по аналогии с учетом специфики транспортных средств путем процедуры приведения к легковому автомобилю проделать то же самое с транспортным спросом – свести его по характеристикам вариативности к некоторому «стандартному».

Процедура приведения по вариации

В общем случае под *приведением транспортной ситуации по вариации транспортного спроса* предлагается понимать выбор такого варианта транспортного спроса, при котором специфика случайного характера реального (фактического) спроса была бы несущественной в рассматриваемой ситуации исследования. Это вовсе не означает, что спрос при этом считается полностью неслучайным. Это означает, что нужные расчеты могут быть проведены уже на основе информации, ограниченной только данными о неслучайной составляющей транспортного спроса. В таком случае единственной специфической характеристикой ситуации остается только характеристика неслучайной составляющей спроса, а именно, некая «средняя» интенсивность.

Для выбора соответствующей интенсивности имеет смысл использовать следующие соображения:

1) поскольку необходимо избавиться от специфики случайных колебаний спроса, необходимо реальную ситуацию свести к некоторой эквивалентной «эталонной» с точки зрения характера случайных колебаний ситуации;

2) поскольку в случае, когда речь идет о регулируемых пересечениях, в первую очередь внимание уделяется отсутствию критических значений величин остаточных очередей (например, ситуация, когда к началу нового цикла регулирования от предыдущего остается очередь, превышающая двойную цикловую пропускную способность, воспринимается водителями уже как заторовая), то имеет смысл в качестве соответствующих эквивалентных рассматривать ситуации, расчеты по которым давали бы такие же или по крайней мере не заниженные прогнозные показатели для остаточных очередей, какие давали бы расчеты и по исходной ситуации;

3) типичной «эталонной» ситуацией является ситуация, при которой дисперсия случайных колебаний равна величине матожидания, или, что то же самое, при которой *коэффициент дисперсии* колебаний (как отношение дисперсии к матожиданию) равен единице (именно такое соотношение характерно для широко используемого в расчетах пуассоновского спроса).

С учетом этих соображений тогда задача выбора соответствующей эквивалентной ситуации будет выглядеть следующим образом.

Пусть

– T^o – опорный период времени для планируемого исследования (минимальное значение периода, меньше которого в данной ситуации исследования не имеет смысла рассматривать, поскольку колебания спроса на меньших промежутках несущественны для целей исследования);

– Q_{T^o} – объем транспортного спроса за промежуток T^o со стороны участников движения определенного типа на прохождение регулируемого пересечения по определенному геометрическому направлению движения.

Если рассматривать Q_{T^o} на разных периодах как независимые случайные величины, то при не слишком малых интенсивностях спроса эти величины можно рассматривать как распределенные по нормальному закону с матожиданием $\mathrm{M}\,Q_{T^o}$ и среднеквадратичным отклонением $\sigma(Q_{T^o})$.

Тогда с учетом соображений 1)–3) задачу можно сформулировать в следующем виде:

– заменить исходные случайные величины Q_{T^o} на некоторые $Q^{э}_{T^o}$ так, чтобы:

– величины остаточных очередей, рассчитанные по $Q^{э}_{T^o}$, были не меньше таковых, рассчитанных по Q_{T^o};

– индекс дисперсии $\sigma^2(Q^{э}_{T^o})\big/\mathrm{M}\,Q^{э}_{T^o}$ был равен единице (либо был меньше).

В качестве одного из возможных вариантов решения этой задачи имеет смысл рассматривать введение случайных величин $Q^{э}_{T^o}$, имеющих распределение вероятностей, представленное на рисунке 1 (закрашено сплошным цветом).

Действительно, во-первых, поскольку в этом случае матожидание m' такого распределения оказывается не ниже матожидания m исходного, то, как минимум, проектная пропускная способность, подготавлеваемая по m', заведомо не будет занижена. А во-вторых, поскольку распределение вероятностей колебаний, превосходящих матожидание m' у приведенного и исходного спроса совпадают, это значит, что проектная оценка остаточных очередей по приведенному спросу также не будет занижена.

Непосредственное выражение для матожидания m' соответствующего распределения может быть найдено из условия $\sigma'^2/m'=1$ с учетом того, что в силу симметрии распределения соответствующая дисперсия может быть вычислена с помощью выражения

$$\sigma'^2 = 2\int_{m'}^{+\infty}(Q-m')^2\cdot p_{m,\sigma}(Q)\,dQ\ .$$

Если для удобства положить $m'=m+\gamma\cdot\sigma$, $\gamma\geq 0$, то соответствующее условие может быть представлено в виде следующего компактного уравнения относительно неизвестного γ:

$$\left(1+\gamma^{2}\right)\cdot\left(1-\Phi(\gamma)\right)-\frac{e^{-\frac{\gamma^{2}}{2}}}{\sqrt{2\pi}}\cdot\gamma=\frac{1}{2\cdot VMR}, \qquad (1)$$

где Φ – функция распределения стандартного нормального закона,

VMR – индекс дисперсии исходного спроса.

График зависимости решения от индекса дисперсии представлен на рисунке 2.

Приближенное аналитическое решение соответствующего уравнения, достаточно хорошо согласующееся с решением, представленном на графике, можно получить, если аппроксимировать левую часть уравнения многочленом Тейлора третьей степени, после чего решить получившееся кубическое уравнение. Результатом этого будет следующее выражение:

$$\gamma\approx\frac{1}{\sqrt{2}}\left(\sqrt{\pi}+\frac{4-\pi}{A}-A\right),\quad \text{где}$$
$$A=\left(B+\sqrt{B^{2}+(4-\pi)^{3}}\right)^{1/3}, \qquad (2)$$
$$B=\sqrt{\pi}\left(\frac{3}{VMR}-(\pi-3)\right).$$

Примечание. При расчете по приближенным формулам (2) не исключены ситуации, когда результирующее значение γ будет отрицательным. Для исключения таких случаев имеет смысл делать постобработку результата расчета по схеме $\gamma\to\max\{\gamma,0\}$.

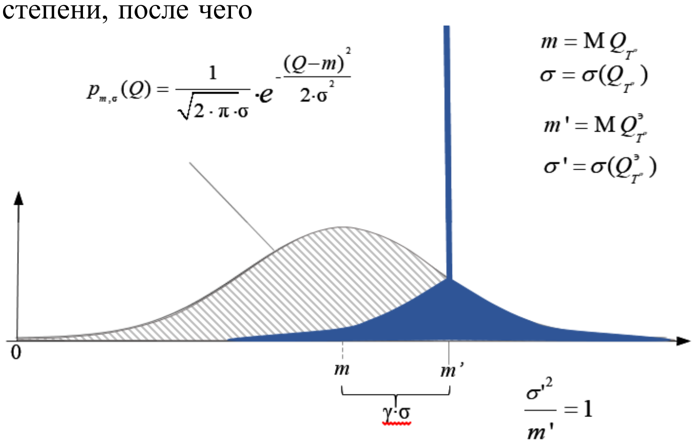

Рисунок 1 – Распределения вероятностей величин $Q_{T^{o}}$ исходного спроса (заштриховано) и $Q^{э}_{T^{o}}$ приведенного (закрашено сплошным)

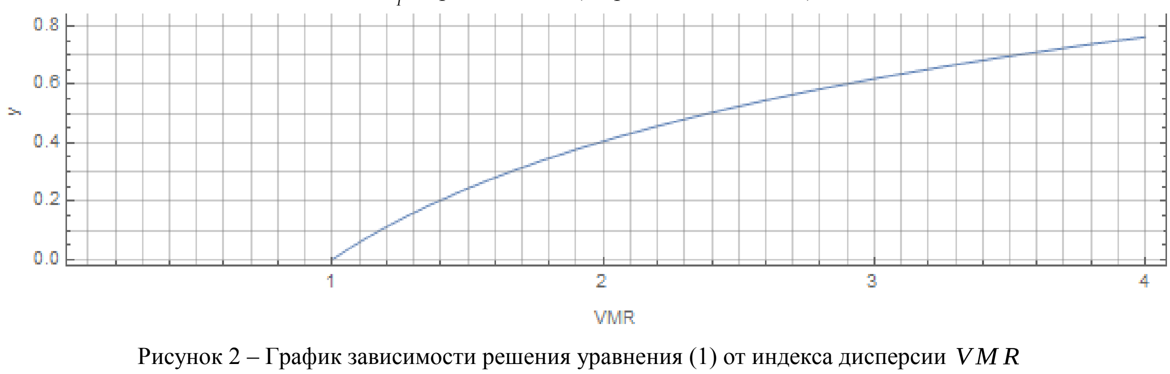

Рисунок 2 – График зависимости решения уравнения (1) от индекса дисперсии VMR

С учетом сказанного и того, что имеют место быть очевидные соотношения $\mathrm{M}\,Q_{T^{o}}=\mathrm{M}\,q\cdot T^{o}$, $\sigma(Q_{T^{o}})=\sqrt{VMR\cdot\mathrm{M}\,q\cdot T^{o}}$, где $\mathrm{M}\,q$ – матожидание фактической интенсивности спроса, окончательно получаем выражение для приведенных величин:

$$\mathrm{M}\,q^{э}=\mathrm{M}\,q+\gamma\cdot\sqrt{VMR\cdot\frac{\mathrm{M}\,q}{T^{o}}},$$
$$VMR^{э}=1,$$

где γ выбирается как решение уравнения (1) (в качестве которого можно использовать приближение (2)).

Полезно отметить, что в ситуации, когда характер генерации транспортного спроса таков, что объем спроса Q_{T} растет пропорционально величине промежутка T (что обычно естественно ожидать от транспортных потоков, согласно теории (см., например, [12]), такую ситуацию, действительно, можно во многих случаях ожидать для промежутков с

$MQ_T >> 1$), то поскольку тогда (как следует из свойств матожидания и дисперсии) MQ_T, и DQ_T растут пропорционально T, отсюда вытекает, что Mq и VMR не будут зависеть от величины этого промежутка. Таким образом, в этом случае появляется дополнительная свобода в выборе опорного промежутка.

Заключение

Таким образом, как показывают полученные в данной работе результаты, в общем случае удается ввести содержательное понятие «приведения транспортного спроса по вариации» и получить достаточно простые аналитические выражения для непосредственного проведения соответствующей процедуры.

Литература

1. ALFA, ATTAHIRU SULE, and MARCEL F. NEUTS. «Modelling Vehicular Traffic Using the Discrete Time Markovian Arrival Process» Transportation Science 29, no. 2 (1995). – P. 109–17. http://www.jstor.org/stable/25768678.

2. Buckley DJ (1968) A semi-Poisson model of trac flow. Transportation Science 2(2). – P. 107–133.

3. Cowan, R. J. (1975). Useful headway models. Transp Res 9. – P. 371–375.

4.Иносэ, Х. Управление дорожным движением / Х. Иносэ, Т. Хамада; пер. с англ. – М.: Транспорт, 1983. – 248 с.

5. Дрю Д. Теория транспортных потоков и управление ими. – М.: Транспорт, 1972. – 424 с.

6. Хейт Ф. Математическая теория транспортных потоков. – М.: Мир,1966. – 280 с.

7. Буслаев А. П., Новиков А. В., Приходько В. М. и др. Вероятностные и имитационные подходы к оптимизации автодорожного движения. – М.: Мир, 2003. – 368 с.

8. Kerner BS, Rehborn H (1996) Experimental features and characteristics of trac jams. Physical Review E: Statistical, nonlinear and soft matter physics 53. – P. 1297– 1300.

9. Highway Capacity Manual 5th Edition (HCM 2010) Vol 2 (https://ebin.pub/highway-capacity-manual-5th-edition-hcm-2010-vol-2-2-97803091 60773. html).

10. Методические рекомендации по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения на регулируемых пересечениях. – М. 2017. – 91 с.

11. Врубель Ю. А., Капский Д. В., Кот Е.Н., Определение потерь в дорожном движении. – Мн. 2006. –242 с.

12. Rajdl K, Lansky P, Kostal L. Fano Factor: A Potentially Useful Information. Front Comput Neurosci. 2020 Nov 20;14:569049. doi: 10.3389/fncom.2020.569049. PMID: 33328945; PMCID: PMC7718036.

UDK 656

SARAZHINSKY Denis S., Ph.D. in Eng., Ass. Prof.,
Associate Profesor
E-mail: sarazhinsky@mail.ru

Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

Received 21. 07.2023

REDUCING TRAFFIC DEMAND BY VARIATION (AT SIGNALIZED INTERSECTION)

The day-to-day practice of designing/reorganizing traffic management at a controlled intersection typically relies on the use of a traffic demand model. The selection of such a model is usually guided by considerations of the optimal balance between the complexity of the model and the significance of the effects that can be accounted for. However, in some situations, researchers prefer to use simplified demand models even when it is known that its use will lead to significant deviations in the results. One of such examples is the problem of selecting a design value of traffic demand intensity for designing/redesigning of traffic light control. Typically, here one prefers to rely only on the expectation value of the demand intensity, at best knowingly overestimating it for calculations by means of some, as a rule, rather speculatively