УДК 629.113.004.5

Уровень обслуживания как показатель надёжности улично-дорожной сети

Александр МИХАЙЛОВ
Alexander Yu. MIKHAILOV

Роман ГОРБУНОВ
Roman N. GORBUNOV

Зинаида ГОРБУНОВА
Zinaida V. GORBUNOVA

Михайлов Александр Юрьевич *– доктор технических наук, профессор Иркутского национального исследовательского технического университета (ИрНИТУ), Иркутск, Россия.*
Горбунов Роман Николаевич *– аспирант кафедры автомобильного транспорта ИрНИТУ, Иркутск, Россия.*
Горбунова Зинаида Васильевна *– кандидат экономических наук, доцент ИрНИТУ, Иркутск, Россия.*

Service Rate as an Indicator of Street and Road Network Reliability
(текст статьи на англ. яз.– English text of the article – p. 200)

В статье оцениваются понимание и трактовка научных категорий «надёжность», «отказ», «конгестия». Обосновывается возможность использования показателя уровня обслуживания как критерия надёжности функционирования улично-дорожной сети, имея в виду, что он отражает в комплексе данные об экономичности, удобстве и безопасности движения, а посредством этого и состояние транспортного потока. Приводятся разные подходы к определению уровня обслуживания, к классификации особенностей и признаков выполняемой работы. Формулируются дальнейшие направления совершенствования надёжности автомобильных дорог, поиска наиболее вариативного показателя безотказности городской транспортной сети.

Ключевые слова: улично-дорожная сеть, надёжность, конгестия, поток, отказ, уровень обслуживания, временной буфер, буферный индекс.

В условиях высокой загрузки движением дорог общего пользования и улично-дорожных сетей особо актуальной становится задача обеспечения надёжности их функционирования, что требует, в свою очередь, разработки соответствующих количественных критериев оценки надёжности.

В Российской Федерации трактовку термина «надёжность» в технике определяет ГОСТ 27.002-2015, устанавливающий основные понятия в этой области. Объектом применения ГОСТа может быть сборочная единица, деталь, компонент, элемент, устройство, функциональная единица, оборудование, изделие, система, сооружение [2].

Под надёжностью, согласно ГОСТу, понимается «свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования». Также дано примечание, что надёжность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта может включать в себя безотказность, ремонтопригодность, вос-

станавливаемость, долговечность, сохраняемость, готовность или определённые сочетания этих свойств [7].

Рассмотрим надёжность автомобильной дороги с этих позиций. По ГОСТу системой выступает объект, представляющий собой множество взаимосвязанных элементов, рассматриваемых в определённом контексте как единое целое и отделённых от окружающей среды, поэтому в рамках исследования будем исходить из таких системных признаков.

Автомобильная дорога, согласно [1], – это объект транспортной инфраструктуры, предназначенный для движения транспортных средств и включающий в себя земельные участки в границах полосы отвода и расположенные на них или под ними конструктивные элементы (дорожное полотно, дорожное покрытие и подобные элементы) и дорожные сооружения, являющиеся её технологической частью – защитные сооружения, искусственные дорожные сооружения, производственные объекты, элементы обустройства автомобильных дорог.

Существует ряд нормативных документов, которые определяют требования к автомобильным дорогам [3, 4, 6]. Предусмотренные в них стандарты и правила касаются не только конструктивных особенностей дорожного покрытия, материалов, но и предъявляют требования непосредственно к функционированию дорог.

Исходя из приведённой ранее формулировки, основной функцией автомобильной дороги как системы является обеспечение возможности движения по ней транспортных средств. Логичным было бы предположить, что движение должно осуществляться с определёнными параметрами, возникновение отказов (например, затор) означает невыполнение заданной функции, то есть нарушается свойство безотказности. А ГОСТ под безотказностью понимает свойство объекта непрерывно сохранять способность выполнять требуемые функции в течение некоторого времени или наработки в предусмотренных режимах и условиях применения [2].

Под отказом же в данном случае следует понимать событие, заключающееся в нарушении работоспособности состояния объекта. В зарубежной литературе для таких ситуаций используется термин «конгестия», под которым понимается то состояние загрузки улично-дорожной сети (УДС), когда объёмы дорожного движения приближаются к пропускной способности или превышают её. Конгестия может быть рекуррентной или нерекуррентной [9].

Добавим, что отказ может считаться ресурсным, если объект достигает предельного состояния, то есть затор, как уже говорилось, возникает именно вследствие недостаточной пропускной способности дороги, ниже расчётного потока. Внезапный отказ характеризуется скачкообразным переходом объекта в неработоспособное состояние, резким повышением риска дорожно-транспортного происшествия [2].

С точки зрения пользователей автомобильные дороги общего пользования, городские улицы и трассы должны обеспечивать комфортность, скорость и безопасность дорожного движения. Эти три показателя обязаны быть по возможности максимизированы. Например, движение может становиться разным: возможность движения автомобилей со средней скоростью не более 5 км/ч тоже движение, однако оно уже не будет удовлетворять обычным критериям со стороны пользователя и может считаться отказом.

По мере ухудшения условий для перемещения дорога переходит в предотказное состояние, характеризуемое повышенным риском. Такое состояние может возникнуть как в результате внутренних процессов, так и внешних воздействий на объект в процессе его функционирования. Изменение каких-либо параметров дорожной сети, снижение скорости, нарастающая интенсивность движения наверняка будут способствовать ухудшению ситуации. Дорожно-транспортное происшествие, которое существенно ограничивает пропускную способность дороги, также приводит её в предотказное состояние. Отказ произойдёт в случае, если последствия ДТП не устранят в кратчайшие сроки или, например, в случае ухудшения погодных условий (снегопад, подтопление в результате ливневых дождей, гололёд). Но более всего опасно возникновение чрезвычайных ситуаций [2].

Предотказное состояние способно сохраняться неопределённо долгое время, либо же перейти как в состояние отказа, так и в рабочее состояние. В случае, если обнаружен-

ный отказ со временем самоустранился, то он называется сбоем.

Для определения предотказного состояния ГОСТ предполагает использование критерия, отражающего некие реальные признак или совокупность признаков предотказного состояния объекта [2].

В дальнейшем, если характер движения продолжает не соответствовать требованиям, автомобильная дорога переходит в неработоспособное состояние, в котором она не может выполнять хотя бы одну положенную функцию.

Впрочем, такой критерий в отношении автомобильных дорог с точки зрения их функционала, надо признать, нормативно не установлен. То есть не определено, какого размера заторы допустимы, какая средняя скорость должна быть.

Следующее понятие, которое должно касаться автомобильной дороги, является наработка. Под наработкой понимается продолжительность или объём работы объекта.

Автомобильная дорога в рассматриваемом нами контексте может иметь неограниченный ресурс по времени, причём в некоторых случаях значение показателя наработки стремится к бесконечности, и это при том, что отказ дорожного полотна как физического объекта может произойти многократно за любой обозримый период. Такая ситуация возможна, если своевременный ремонт автодороги не будет приводить к заторам, в противном случае возникает зависимый отказ, когда невозможность перемещения по ней связана с износом дорожного полотна.

Тем не менее, если заторы возникают периодически, например, ежедневно в часпик, то возникает обратная картина, когда дорожное полотно находится в хорошем техническом состоянии, но при этом дорога не выполняет своих функций. В случае, если такая ситуация регулярна, можно говорить о цикличности отказов и равных промежутках наработки на отказ.

В любом варианте оценки и прогнозирования отказов следует определять их критерий и причину. Поскольку в технической документации не отражаются критерии отказа по потенциальной пропускной способности и, по существу, не оценивается данный параметр, то это значительно влияет на организацию транспортного сообщения.

При появлении перемежающихся и прочих видов отказа, возникновение которых можно спрогнозировать, пользуясь зарубежной терминологией, мы можем говорить о рекуррентной конгестии, а при внезапных отказах – о нерекуррентной.

Фактические значения параметров в определённый момент времени характеризуют степень готовности объекта к выполнению заданных функций в рассматриваемых условиях.

ГОСТом устанавливается классификация отказов по критичности:

1. Критический – это затор, когда скорость движения значительно ниже прогнозируемой (требуемой) пользователями.

2. Некритический – когда затруднено движение, но поток автомобилей сохраняет скорость, близкую к максимально разрешённой (оптимальной, комфортной).

Движущиеся по автодороге экипажи в то же время являются частью логистической системы (цепи). Отказ дороги выполнять свои функции по перемещению автомобилей приводит к отказу в логистической цепи, что в свою очередь влияет на следующие звенья системы. В данном случае, если такой отказ возникает циклически, то он рассматривается уже как систематический, однозначно вызванный определённой причиной, которая может быть устранена только модификацией проекта или производственного процесса, правил эксплуатации и содержания документации.

С точки зрения устранения отказов автомобильная дорога может быть отнесена к объектам со способностью к самовосстановлению, то есть по мере снижения транспортного спроса затор постепенно исчезает и восстанавливается нормальное функционирование объекта. Рассмотрев автомобильную дорогу как такую систему, мы приходим к выводу, что она выступает техническим объектом, на который распространяются терминология по надёжности в технике и все доступные и применимые в системе смыслы.

Критерии отказа (надёжности) могут быть определены на основе комплексного показателя, представляющего качественную меру, описывающую эксплуатационные условия транспортных средств в потоке. Этот показатель присутствует в виде шкалы, имеющей градацию для состояния отказа, предотказного и рабочего состояний.

Требования к надёжности формируются

преимущественно на основе спроса пользователей. Ожидаемые показатели закладываются в нормы проектирования и должны быть отражены в технической документации.

Снижение скорости обслуживания или отказ вызывают ухудшение целого ряда эксплуатационных показателей: снижают производительность подвижного состава, усиливают экологическое воздействие, поскольку увеличивается продолжительность работы двигателей, влияют на психофизическое состояние людей, у которых возрастают затраты времени на передвижения, вызванные пробками.

Долгое время в нашей стране не возникало необходимости в оценке подобных показателей из-за низкого уровня автомобилизации. За рубежом, а особенно в США, этим вопросом были вынуждены заниматься ещё с середины XX века, когда было подготовлено руководство Highway Capacity Manual.

В последние годы для оценки надёжности функционирования автомобильных дорог предлагается использовать уровень обслуживания (Level of service), рассчитываемый на основе показателя временного индекса (*TTi*) [9].

Наряду с показателем временного индекса есть ещё ряд показателей, которые могут применяться для такой оценки: временной буфер (T_b), буферный индекс (I_b), двухжидкостная модель Хермана–Пригожина (T_s, T_r) [8, 10–13], TOMTOM traffic index (I_n)) [15], INRIX Travel Time Index (I_{inrix}) [14].

TTi определяется как отношение:

$$TTi = \frac{Tp}{T_{15\%}}, \quad (1)$$

где T_p – затраты времени на передвижение в пиковый период; $T_{15\%}$ – затраты времени на передвижение 15% обеспеченности, наблюдаемые во внепиковые периоды суток.

$$T_b = T_n - \overline{T}, \quad (2)$$

где T_n – продолжительность передвижения n% обеспеченности; $\overline{T}$ – средняя продолжительность передвижения.

$$I_b = \frac{T_b}{\overline{T}} \bullet 100\ \%, , \quad (3)$$

$$T_r = T_m^{\frac{1}{1+n}} \bullet T^{\frac{n}{n+1}}, \quad (4)$$

$$T_s = T - T_m^{\frac{1}{1+n}} \bullet T^{\frac{n}{n+1}}, \quad (5)$$

где T_m – минимальные удельные затраты времени на движение в свободных условиях, мин/км; n – показатель, характеризующий качество функционирования рассматриваемого участка УДС; T_s – удельное время простоя, мин/км; T_r – удельное время движения, мин/км; T – удельные затраты времени, мин/км.

$$I_{tt} = \frac{\overline{T}}{T_{ff}} - 1, \quad (6)$$

где $\overline{T}$ – среднее время движения; с, T_{ff} – время движения в свободных условиях, с.

$$I_{inrix} = \frac{T_p - T_{ff}}{T_{ff}}. \quad (7)$$

В России для оценки функционирования дорог были подготовлены ОДМ 218.2.020–2012 «Методические рекомендации по оценке пропускной способности автомобильных дорог» [5]. В документе содержатся указания по расчётам, в том числе уровня обслуживания. Термин «уровень обслуживания» в данных рекомендациях означает комплексный показатель экономичности, удобства и безопасности движения, характеризующий состояние транспортного потока.

Для оценки уровня обслуживания предложено сравнивать фактические показатели транспортного потока с расчётными или максимально возможными.

$$z = \frac{N}{P}, \quad (8)$$

где z – коэффициент загрузки; N – интенсивность движения, авт./ч; P – практическая пропускная способность участка дороги, авт./ч.

$$c = \frac{v_z}{v_o}, \quad (9)$$

где с – коэффициент скорости движения; v_z – средняя скорость движения при рассматриваемом уровне удобства, км/ч; v_o – скорость движения в свободных условиях при уровне удобства А, км/ч.

$$\rho = \frac{q_z}{q_{\max}}, \quad (10)$$

где ρ – коэффициент насыщения движением; q_z – средняя плотность движения, авт./км;

Таблица 1

Уровень обслуживания по ОДМ 218.2.020–2012

Уровень обслуживания движения	z	c		Характеристика потока автомобилей	Состояние потока	Эмоциональная загрузка водителя	Удобство работы водителя	Экономическая эффективность работы дороги
A	<0,2	>0,9	<0,1	Автомобили движутся в свободных условиях, взаимодействие между автомобилями отсутствует	Свободное движение одиночных автомобилей с большой скоростью	Низкая	Удобно	Неэффективная
B	0,2–0,45	0,7–0,9	0,1–0,3	Автомобили движутся группами, совершается много обгонов	Движение автомобилей малыми группами (2–5 шт.). Обгоны возможны	Нормальная	Малоудобно	Малоэффективная
C	0,45–0,7	0,55–0,7	0,3–0,7	В потоке ещё существуют большие интервалы между автомобилями, обгоны запрещены	Движение автомобилей большими группами (5–14 шт.). Обгоны затруднены	Высокая	Неудобно	Эффективная
D	0,7–0,9	0,4–0,55	0,7–1,0	Сплошной поток автомобилей, движущихся с малыми скоростями	Колонное движение автомобилей с малой скоростью. Обгоны невозможны	Очень высокая	Очень неудобно	Неэффективная
E	0,9–1,0	<0,4	1,0	Поток движется с остановками, возникают заторы, режим пропускной способности	Плотное	Очень высокая	Очень неудобно	Неэффективная
F	>1,0	0,3	1,0	Полная остановка движения, заторы	Сверхплотное	Крайне высокая	Крайне неудобно	Неэффективная

Источник [5].

q_{max} – максимальная плотность движения, авт./км.

В таблице 1 согласно ОДМ приведены показатели соответствия тому или иному уровню обслуживания.

Рассмотрев методику оценки уровня обслуживания, можно отметить, что, во-первых, используемые параметры (интенсивность движения, скорость движения и плотность потока) взаимосвязаны, согласно (11), то есть измерение трёх параметров для оценки уровня обслуживания является избыточным.

$$q = \frac{N}{v}, \qquad (11)$$

где q – плотность движения, авт./км; N – интенсивность движения, авт./ч; v – скорость, км/ч.

Во-вторых, проведение измерения плотности и (или) интенсивности – более дорогостоящая и трудозатратная процедура, чем измерение скорости (времени), поскольку для её измерения достаточно наличие простых часов или получения информации с навигационного оборудования в автомобиле (навигатор, смартфон и т.п.), движущемся по дороге, параметры которой мы хотим измерить.

В-третьих, имеется противоречие, когда плотность потока используется при расчётах и одновременно является характеристикой уровня обслуживания, что было приведено в графе 6 таблицы 1.

В-четвёртых, параметр c является обратным временному индексу: поскольку замеры производятся на одном и том же участке дороги, то длина этого участка остаётся неизменной (12).

$$c = \frac{v_z}{v_o} = \frac{\frac{S_z}{t_z}}{\frac{S_o}{t_o}} = \frac{S_z \cdot t_o}{S_o \cdot t_z},$$
$$S_z = S_o \cdot c = \frac{t_o}{t_z} = \frac{1}{TTi}, \qquad (12)$$

где S_z – протяжённость участка, на котором производятся замеры, км; t_z – про-

должительность движения при рассматриваемом уровне удобства, ч; S_o – протяжённость участка, на котором производятся замеры в свободных условиях, км; t_o – продолжительность движения в свободных условиях, ч.

Предлагаемые ОДМ значения параметров *z, c, p* не дают возможности вариации в зависимости от различных параметров движения и УДС, хотя в [9] приводится информация о том, что значение показателя уровня обслуживания может варьироваться в зависимости от разных факторов, например, от протяжённости маршрута.

Исходя из этого, исключим показатели, рекомендуемые ОДМ, из числа рассматриваемых в нашем исследовании.

ВЫВОДЫ

Анализ показал, что существует множество показателей, которые могут быть взяты как критерий оценки надёжности функционирования автомобильных дорог (уровень обслуживания). Следующей задачей проводимого исследования является выявление показателя, который лучше всего подходит для определения надёжности функционирования УДС, то есть оценки уровня обслуживания в городских условиях. Для этого необходимо:

1. Осуществить запись ГЛОНАСС/GPS треков на обследуемых участках.
2. Выполнить обработку треков.
3. Выгрузить характеристики треков.
4. Провести расчёты всех показателей на основе собранной информации.
5. Провести статистическую обработку данных (с применением пакетов статистических программ) для выявления наиболее вариативного показателя.

Выполнение поставленной задачи позволит определить наиболее вариативный показатель, который может быть использован для оценки надёжности функционирования УДС. Также в ходе проведения исследования можно будет определить минимальный объём выборки (минимальное количество треков), достаточный для достоверной оценки уровня обслуживания в городских условиях. Собранный массив данных может быть использован для определения зависимости уровня обслуживания от различных параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федеральный закон «Об автомобильных дорогах и о дорожной деятельности в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 08.11.2007 № 257-ФЗ.
2. ГОСТ 27.002-2015. Надёжность в технике. Термины и определения.
3. ГОСТ 33220-2015. Дороги автомобильные общего пользования. Требования к эксплуатационному состоянию и другие.
4. ГОСТ Р 50597-93. Автомобильные дороги и улицы. Требования к эксплуатационному состоянию, допустимому по условиям обеспечения безопасности дорожного движения.
5. ОДМ 218.2.020-2012. Методические рекомендации по оценке пропускной способности автомобильных дорог.
6. СП 34.13330.2012. Автомобильные дороги.
7. Беридзе В. А., Колчин В. С., Колчина З. В., Маломыжев О. Л. Основы теории надёжности: Учеб. пособие. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2014.– 124 с.
8. Блинкин М. Я., Ткаченко Б. А. Системная оценка условий движения на базе модели Хермана–Пригожина // Социально-экономические проблемы развития транспортных систем городов и зон их влияния.– 2009. [Электронный ресурс]: http://www.waksman.ru/Russian/Org&B/2008/blinkin1.htm. Доступ 18.06.2018.
9. Горбунов Р. Н., Михайлов А. Ю., Пиров Ж. Т. Оценка уровня обслуживания на основе критериев надёжности // Вестник Иркутского государственного технического университета.– 2017.– № 10. – С. 188–194.
10. Румянцев Е. А. Оценка условий дорожного движения на основе критерия Германа // Наука. Технологии. Инновации: Сб. науч. трудов Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – С. 321–325.
11. A toolbox for alleviating traffic congestion and enhancing mobility // Institute of Transportation Engineers, Publication IR-054B, 1997. – 119 p.
12. Herman R., Ardekani S. A. Characterizing traffic conditions in urban areas // Transportation Science, 1984, Vol. 18 (2), pp. 101–140.
13. Herman R., Prigogine I. A two-fluid approach to town traffic // Science, 1979, Vol. 204, pp. 148–151.
14. INRIX Traffic Scorecard 2015. [Электронный ресурс]: http://www.inrix.com/wp-content/uploads/2016/11/INRIX_2015_Traffic_Scorecard.pdf. Доступ 18.06.2018.
15. TomTomTraffic Index. [Электронный ресурс]: https://www.tomtom.com/en_gb/trafficindex/about. Доступ 18.06.2018.

Координаты авторов: **Михайлов А. Ю.** – rumikhaylovay@gmail.com, **Горбунов Р. Н.** – gorbunow@list.ru, **Горбунова З. В.** – flocean@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 21.05.2018, принята к публикации 18.06.2018.