



• © Н.В. Смирнова, канд. техн. наук, доцент (ХНАДУ)

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПРОЕКТА ДОРОГИ МОДЕЛИРОВАНИЕМ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ

Аннотация. Предложена математическая модель определения вероятностных характеристик движения транспортных потоков на двухполосных дорогах. Модель описывает типичные ситуации взаимодействия водителей в потоке по схеме марковского случайного процесса с дискретными состояниями и непрерывным временем. Приведены результаты моделирования.

Ключевые слова: автомобильная дорога, транспортные потоки, режимы движения, интенсивность движения, вероятность свободного движения в потоке, средняя скорость потока, графики скорости.

Анотація. Запропоновано математичну модель визначення характеристик руху транспортних потоків на двосмугових дорогах. Модель описує типові ситуації взаємодії водіїв у потоці за схемою марківського випадкового процесу з дискретними станами і безперервним часом. Наведені результати моделювання.

Ключові слова: автомобільна дорога, транспортні потоки, режими руху, інтенсивність руху, вірогідність вільного руху в потоці, середня швидкість потоку, графіки швидкості.

Annotation. A mathematical model for determining the probability characteristics of traffic flow on two-lane roads proposed. The model describes typical cases of drivers interaction in the flow according to Markov's processes scheme with discrete states and continuous time. The results of simulation presented.

Key words: road, traffic flows, driving modes, traffic intensity, probability of free movement in the flow, average flow velocity, velocity pattern.

Введение

В настоящее время проблема поиска оптимальных вариантов проектируемых автомобильных дорог практически не решена. С переходом на автоматизированное проектирование положение дел качественно не улучшилось в силу ряда причин. Сравнивая варианты проектных решений, зачастую игнорируют, во-первых, резкое изменение транспортно-эксплуатационного состояния дороги по периодам года в разрезе одного года эксплуатации дороги, и, во-вторых, игнорируют периодическое снижение транспортно-эксплуатационных характеристик дороги в межремонтные сроки и их восстановление серией ремонтов в течение её жизненного цикла от момента строи-

тельства до момента реконструкции. В результате такого подхода расчеты транспортных издержек содержат существенные ошибки, обоснования выбора варианта проектного решения следует признать недостаточно достоверными, и поэтому вполне весомы риски потери действительно оптимального решения. Решению проблемы оптимизации проектов автомобильных дорог способствует развитие методов моделирования движения транспортных потоков в конкурирующих вариантах проектных решений.

Основным результатом моделирования движения транспортных потоков в задачах обоснования оптимального варианта дороги при её проектировании или обоснования эксплуатационных мероприятий



в задачах эксплуатации дороги следует считать скорость как всего потока, так и основных его групп, например, таких: грузовые (малой, средней, большой, грузоподъемности), автопоезда, автобусы (малые, средние, большие) легковые (малые, средние, большие). Скорости отдельных групп автомобилей и потока в целом зависят от многих причин и нестабильных параметров и вследствие этого являются случайными величинами, что служит основанием при моделировании транспортных потоков использовать методы теории вероятности, а скорости характеризовать распределениями вероятностей ее различных значений в каждой точке траектории движения автомобилей вдоль дороги. Ситуации взаимодействия водителей в потоке для получения такого рода вероятностей анализируют методами теории исследования операций, [1].

Основная часть

Согласно методологии теории исследования операций исследуемый автомобиль типа v (желающий двигаться со скоростью v), в любой точке дороги II – IV категории – это некая система S , и типичные дискретные состояния S_1, S_2 и S_3 , в которых может находиться система S , определены следующим образом:

S_1 – движение с скоростью свободного движения v по своей полосе, когда до впереди идущего автомобиля дистанция достаточная, чтобы не снижать эту скорость;

S_2 – движение по своей полосе со скоростью $u < v$, то есть меньше желаемой, когда автомобиль типа v догнал впереди идущий автомобиль и водитель вынужден снизить скорость из-за невозможности обогнать его;

S_3 – движение автомобиля типа v по встречной полосе при обгоне.

Вероятности того, что на дороге в точке x система S находится в состоянии S_1, S_2, S_3 обозначены как p_1, p_2, p_3 ; очевидно, что $p_1 + p_2 + p_3 = 1$. Из состояния в состояние исследуемый автомобиль переходит в соответствии с типичными ситуациями взаимодействия водителей в транспортном потоке. Эти ситуации формируются самими водителями в соответствии с разнообразными целями поездки, существенно зависят от характеристик автомобиля и дорожных условий и в любой точке дороги в любой момент времени возникают случайным образом, то есть происходят в заранее не спланированные моменты времени и в заранее не назначенных точках дороги.

Все переходы в реальном потоке происходят с ускорениями (замедлениями) примерно до $2 - 3 \text{ м/с}^2$ (служебные ускорения и замедления) [2].

С повышением скорости выполняются обгоны “с ожиданием”; обгоны “с ходу” – практически без снижения скорости. В предложенной модели принято, что обгон выполняется в среднем со скоростью свободного движения, [3].

С учетом изложенных особенностей движения транспортного потока и принятых допущений для его математической модели приемлемо применить схему марковского случайного процесса с дискретными состояниями и непрерывным временем – непрерывной цепью Маркова [1]. В процессе с непрерывным временем вероятности перехода P_{12} из состояния 1 в состояние 2 или перехода P_{23} из состояния 2 в состояние 3 и т.д. точно в точке x равны нулю. Поэтому согласно методологии марковских цепей вместо этих вероятностей введены плотности вероятностей переходов $\lambda_{12}, \lambda_{23}$ и т.д. Плотность вероятности перехода определяется как предел отношения вероятности перехода системы на участке дороги Δx , например, из одного состояния в другое к длине промежутка Δx [1].

Таким образом, $P_{12}(\Delta x) \approx \lambda_{12}\Delta x$.

Аналогично $P_{13}(\Delta x) \approx \lambda_{13}\Delta x, P_{23}(\Delta x) \approx \lambda_{23}\Delta x, P_{31}(\Delta x) \approx \lambda_{31}\Delta x$.

С учетом принятых допущений составлена система дифференциальных уравнений Колмогорова для вероятностей p_1, p_2, p_3 состояний S_1, S_2, S_3 любого автомобиля в потоке:

$$\begin{cases} p_1' = -\lambda_{12}p_1 - \lambda_{13}p_1 - \lambda_{31}p_3 \\ p_2' = -\lambda_{23}p_2 + \lambda_{12}p_1 \\ p_3' = -\lambda_{31}p_3 + \lambda_{13}p_1 + \lambda_{23}p_2 \end{cases} \quad (1)$$

Отличительной особенностью уравнений (1) заключается в том, что ими можно описать режим движения транспортного потока для любых дорожных условий на дорогах II-IV категорий [3]. На таких дорогах выделены следующие друг за другом участки с присущими им режимами движения потока: 1) стационарный, на котором обгоны ограничены только встречным потоком, 2) переходный без обгонов, на котором обгоны ограничены разметкой или дорожными знаками, 3) переходный с обгонами, который устанавливается сразу же после окончания второго участка. Решая систему (1), вероятность $P(v)$ движения с скоростью v находят как сумму $p_1 + p_2$. Для нахождения p_1 и p_3 целесообразно численное решение системы (1). При известной вероятности $P(v)$ средняя скорость потока при интенсивности N :

$$v_N = \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} (1 - \Phi(v)) dv \quad (2)$$



Характеристики потоку при піковій інтенсивності 600 авт/ч

ПК	Прямо								Обратно							
	Возм. обгона	Режим потоку	$V_{св}$, км/ч	V_{max} , км/ч	R , авт/км	V_N , км/ч	Обгон, обг/ч	V_{85} , км/ч	Возм. обгона	Режим потоку	$V_{св}$, км/ч	V_{max} , км/ч	R , авт/км	V_N , км/ч	Обгон, обг/ч	V_{85} , км/ч
20	нет	2	82	121	4,2	72	0	114	нет	2	96	121	3,7	82	0	110
21	нет	2	80	114	4,4	68	0	108	нет	2	96	121	3,6	82	0	111
22	нет	2	75	103	4,8	63	0	95	да	3	95	120	3,6	83	38	111
23	нет	2	69	91	5,0	60	0	81	да	3	96	124	3,7	81	26	106
24	нет	2	74	80	4,7	64	0	80	нет	2	77	80	4,3	70	0	83
25	нет	2	88	107	4,3	70	0	97	нет	2	80	89	4,2	72	0	86
26	нет	2	91	106	4,2	71	0	97	нет	2	87	100	4,0	76	0	94
27	да	3	93	120	4,0	75	22	102	нет	2	84	106	4,1	74	0	95
28	да	3	84	103	4,1	73	30	95	нет	2	78	96	4,2	71	0	86
29	да	1	71	73	4,5	67	10	77	нет	2	65	76	4,9	61	0	77
30	да	1	70	71	4,5	67	10	77	нет	2	70	71	4,6	66	0	76
31	нет	2	72	77	4,4	68	0	79	нет	2	70	73	4,5	67	0	77
32	нет	2	82	99	3,9	76	0	92	нет	2	82	103	3,9	77	0	97
33	нет	2	87	115	3,8	79	0	100	да	1	95	121	3,3	90	20	119
34	нет	2	94	121	3,6	83	0	110	да	1	95	121	3,3	90	20	119
35	нет	2	93	118	3,7	82	0	107	да	1	95	121	3,3	90	20	119
36	нет	2	90	107	3,7	80	0	101	да	1	93	115	3,4	88	19	114
37	да	3	89	104	3,7	81	14	100	да	1	89	106	3,5	84	18	107
38	да	1	88	101	3,5	84	15	102	да	3	85	101	4,0	74	16	98
39	да	1	88	99	3,6	84	15	101	нет	2	85	101	4,1	73	0	97
40	да	1	89	101	3,5	85	16	103	нет	2	82	101	4,2	71	0	96
41	да	1	85	97	3,7	81	16	98	нет	2	85	101	4,1	74	0	98
42	да	1	71	79	4,4	67	13	81	нет	2	85	101	4,0	75	0	99
43	нет	2	60	60	5,4	56	0	64	нет	2	59	60	5,4	56	0	64
44	нет	2	59	60	5,4	56	0	64	да	1	60	60	5,4	56	11	64
45	нет	2	59	60	5,5	55	0	64	да	1	60	60	5,3	56	11	64
46	нет	2	59	60	5,4	55	0	64	да	1	60	60	5,3	56	11	64
47	нет	2	59	60	5,4	55	0	64	да	1	60	60	5,3	56	11	64
48	нет	2	84	103	4,5	66	0	85	да	3	73	88	4,3	69	7	85
49	нет	2	92	121	4,4	68	0	85	нет	2	90	115	3,6	84	0	109
50	нет	2	95	121	4,4	69	0	85	нет	2	90	106	3,5	85	0	105

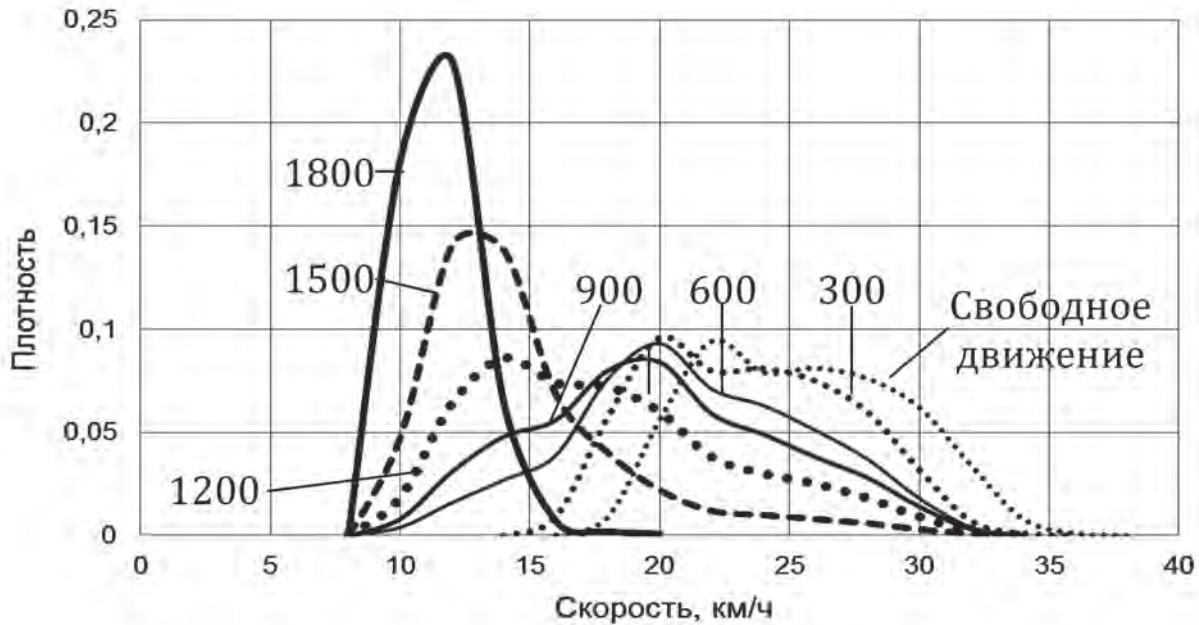


Рис. 1. Плотности вероятностей скорости; цифры на кривых – интенсивность потока, авт/ч

Здесь $\Phi(v)$ – распределение вероятности скорости транспортного потока:

$$\Phi(v) = 1 - (1 - F(v))P(v), \quad (3)$$

где $F(v)$ – распределение вероятности скорости свободного движения всех автомобилей, входящих в расчетный поток.

Распределение вероятности $F(v)$ получают предварительными расчетами скорости свободного движения на данном участке дороги по формулам теории автомобилей с моделированием выбора водителем соответствующего режима движения (тягового усилия, наката, торможения) в последовательных точках дороги в зависимости от её меняющихся параметров технического уровня (уклоны, радиусы кривых, видимость и т.п.) и эксплуатационного состояния (сцепные свойства и ровность). Такие расчеты выполняют для всех типовых автомобилей, входящих в расчетный поток, и по совокупности полученных скоростей находят распределение $F(v)$ как средневзвешенное по составу потока.

При режимах 2 и 3 левые части уравнений (1), то есть производные p'_1 и p'_3 , не нулевые, и поэтому для участков с переходными режимами движения нужно решать систему дифференциальных уравнений (1). На участке стационарного режима с неизменности дорожных условий и постоянной интенсивности потоков автомобилей как по своей (правой)

Q_n , так и по встречной Q_l (левой) полосе движение установившееся, левые части уравнений (1) равны нулю, то есть система (1) – алгебраическая с несложным решением.

Далее показаны некоторые результаты моделирования.

Основные параметры дороги в примере следующие: категория – III, длина участка – 3 км (ПК 20 – ПК 50). Параметры поперечного профиля и проезжей части: количество полос движения – 2; ширина полосы движения 3,75 м, покрытие – асфальтобетонное с коэффициентом сцепления 0,4; ровность проезжей части 60 см/км; обочины укреплены засеваем трав. В плане дорога имеет две кривые с вершинами на ПК 10 и ПК 20. На ПК 43 – ПК 47 расположен малый населенный пункт. Оснащенность эксплуатационной организации ресурсами для содержания дороги 60 %. Расчетная интенсивность движения для моделирования: среднее значение 300 авт/ч, пиковое 600 авт/ч.

По данным моделирования построены графики плотности вероятностей скорости: $f(v)$ – свободного движения (рис. 1) и $\phi(v)$ – движения в потоке при интенсивности 600 авт/ч (рис. 2), а также при других интенсивностях (от 300 авт/ч до 1800 авт/ч).

Отмечается закономерное смещение явно несимметричных графиков плотности в сторону меньших скоростей с ростом интенсивности (снижения количества быстроходных автомобилей

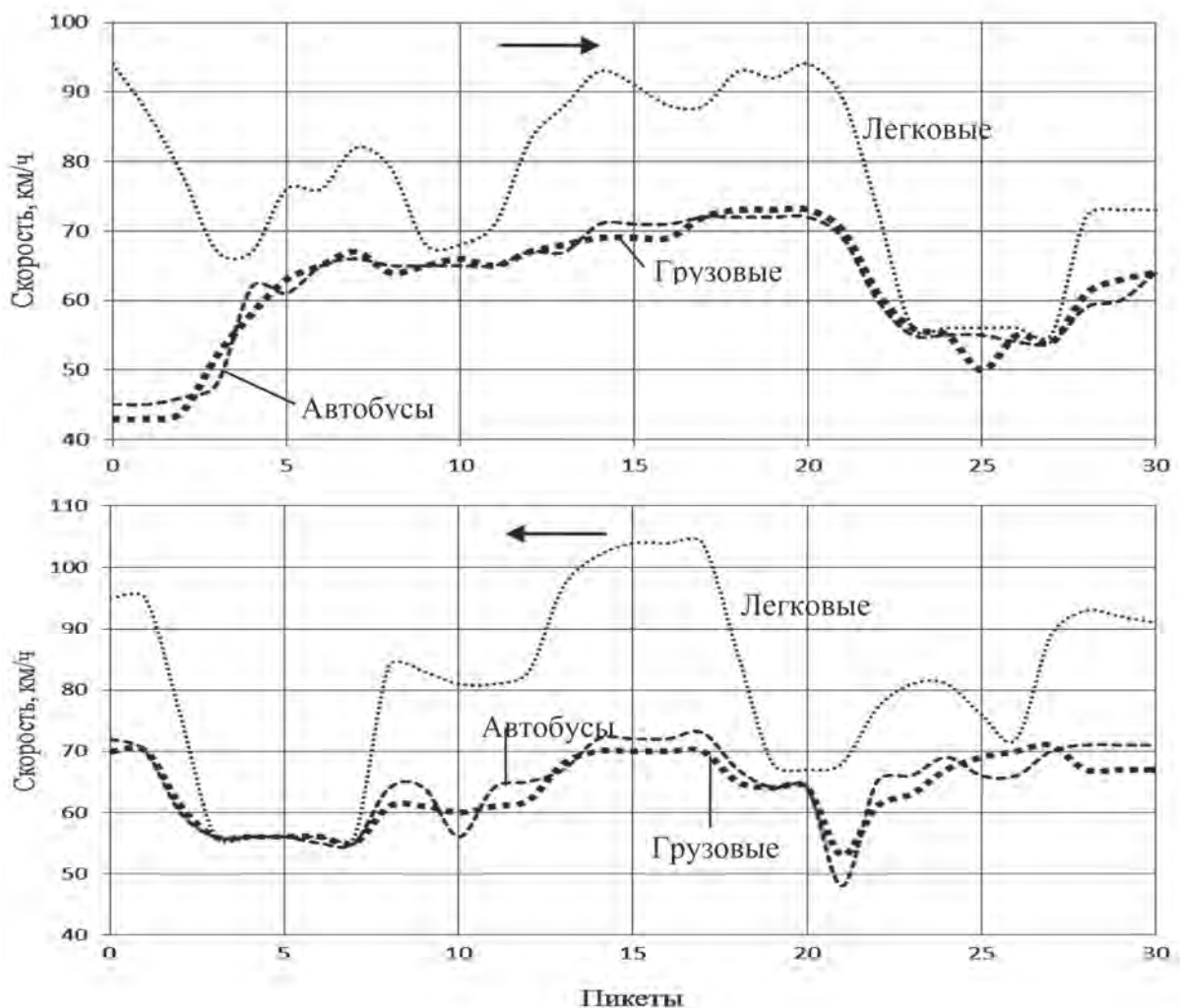


Рис. 2. Скорости по типам автомобилей при интенсивности 600 авт/ч

и увеличение числа тихоходных). При интенсивности 1800 авт/ч, близкой к пропускной способности плотность одномодальная со средней скоростью 12 м/с (43 км/ч).

Выводы

Анализ результатов моделирования с расчетом различных скоростей убеждает в том, что предложенная модель достаточно достоверно описывает характеристики движения транспортного потока, в котором скорости существенно меняются от пикета к пикету в соответствии с особенностями технического уровня дороги, показателями её эксплуатационного состояния и параметрами дорожной обстановки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Вентцель Е.С. Исследование операций. – М.: Советское радио, 1972. – 552 с.
2. Смирнова Н.В. Моделирование режимов движения транспортных потоков на участках дорог с невозможными обгонами // Сборник статей 16-й конференции молодых ученых “Наука – будущее Литвы”. Инженерия транспорта и организация перевозок. – Вильнюс, Литва, 2013. – С. 326-329.
3. Смирнова Н.В. Основные зависимости режимов движения транспортных потоков на участках дорог с невозможными обгонами // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – 2013. – Вип. 89. – С. 256-264.