

Методы оценки адекватности результатов моделирования

В.В. Зырянов

Для достоверной оценки и прогнозирования различных сценариев развития транспортных систем и систем управления дорожным движением на основе моделирования необходимо, чтобы параметры модели соответствовали реальным параметрам. Поэтому оценка адекватности результатов моделирования имеет критическое значение для выработки практических рекомендаций. Однако оценка адекватности является одной из наиболее сложных этапов создания моделей улично-дорожной сети, особенно больших размеров, и необходимо построить модель с такими параметрами дорог, автомобилей, общественного транспорта, средств организации дорожного движения, чтобы обеспечить соответствие фактическим данным. В процессе оценки достоверности можно использовать различные методы сравнения экспериментальных и расчетных данных:

- статистические методы сравнения интенсивности движения и скорости в контрольных точках сети: дисперсионный анализ, корреляционный анализ, U -статистики Зэйла [1, 2];
- зависимости между интенсивностью, скоростью и плотностью [3, 4];
- зависимости между временем поездки и остановки на основе двухкомпонентных моделей кинетической теории транспортного потока [5, 6].

При сравнении экспериментальных и расчетных данных целесообразно первоначально использовать U -статистики Зэйла [1, 2]. Во-первых, этот метод позволяет оценить изменение интенсивности по временным периодам и во-вторых, выявляет три источника расхождений.

Главной статистикой Зэйла является коэффициент относительной ошибки:

$$U = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i^{sim} - Y_i^{obs})^2}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i^{sim})^2 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})^2}}, \quad (1)$$

где Y_i^{obs} и Y_i^{sim} соответственно экспериментальные и расчетные данные в i -й момент времени;

n – число наблюдений.

U-статистики Зэйла также включают следующие три критерия:

коэффициент доли смещения, оценивающий систематическую ошибку:

$$U^M = \frac{(\bar{Y}^{sim} - \bar{Y}^{obs})^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i^{sim} - Y_i^{obs})^2}, \quad (2)$$

где \bar{Y}_i^{obs} и \bar{Y}_i^{sim} соответственно средние значения выборки экспериментальных и расчетных данных;

коэффициент доли дисперсии, оценивающий возможность воспроизводимости степени разброса экспериментальных и расчетных данных:

$$U^s = \frac{(s^{sim} - s^{obs})^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i^{sim} - Y_i^{obs})^2}, \quad (3)$$

где s^{obs} и s^{sim} соответственно среднее квадратическое отклонение экспериментальных и расчетных данных;

коэффициент доли ковариации, оценивающий остаточную ошибку:

$$U^c = \frac{2(1-r)s^{sim}s^{obs}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i^{sim} - Y_i^{obs})^2} \quad (4)$$

где r коэффициент корреляции между экспериментальными и расчетными данными.

Применение этого метода при оценке адекватности моделирования показано на примере моделирования движения на одном из участков

автомобильной дороги М27 в Сочи. Значения U-статистик Зэйла приведены в таблице №1. Значения U-статистик Зэйла рассчитаны по формулам (1-4).

Таблица №1

Значения U-статистик Зэйла

Статистика	Северная точка М27		Южная точка М27	
	Интенсивность на входе	Интенсивность на выходе	Интенсивность на входе	Интенсивность на выходе
Главный коэффициент неадекватности U	0,04118901	0,031574	0,027483	0,020389
Доля смещения U^m	0,000398	0,228574	0,066074	0,042771
Доля дисперсии U^s	0,002643	0,11983	0,12094	0,188956
Доля ковариации U^c	0,996959	0,651597	0,812986	0,768273

Очевидно, что в данном случае U-статистики Зэйла подтверждают адекватность моделирования, поскольку U , U^m , U^s близки к нулю, а U^c приближается к единице.

Кроме статистики Зэйла необходимо также использовать оценку сопоставимости зависимостей между характеристиками транспортных потоков. Для этой цели применялась концепция мета-моделей [7]. При реализации этой концепции первоначально создаются макромодели транспортных потоков отдельно по результатам моделирования и по экспериментальным данным, а затем создается обобщенная макромодель и по всем этим моделям принимается решения о достоверности результатов моделирования. Для создания макромодели использовалась следующая зависимость [7, 8, 9, 10]:

$$v = v_f \left\{ 1 - \exp \left[1 - \left(1 + \frac{|v_j|}{nv_f} \left(\frac{k_j}{k} - 1 \right) \right)^n \right] \right\}, \quad (5)$$

где v_f скорость свободного движения;

v_j скорость кинематической волны в плотном транспортном потоке;

k плотность транспортного потока;

k_j заторовая плотность;

n – параметр.

Затем была построена обобщенная макро модель и произведена оценка соответствия по следующему критерию:

$$F_{K, n^{sim} + n^{obs} - 2K} = \frac{[ESS^{com} - (ESS^{sim} + ESS^{obs})] / K}{(ESS^{sim} + ESS^{obs}) / (n^{sim} + n^{obs} - 2K)}, \quad (6)$$

где ESS^{com} сумма квадратов остатков обобщенной модели;

ESS^{sim} , ESS^{obs} соответственно суммы квадратов остатков экспериментальной и расчетной моделей;

K – число параметров модели.

В табл. № 2 приведены расчетные данные.

Таблица №2

Результаты оценки моделей

Параметры модели (5)	Реальные данные	Данные моделирования	Обобщенные данные
Скорость свободного движения, км/ч	68	73	71.4
Скорость кинематической волны, км/ч	-14.6	-18.1	-14.9
Параметр n	0.246	0.244	0.253
Корреляция R	0.942	0.945	0.942
Сумма квадратов остатков	4697,0	2656,9	7985,8

В итоге получается следующее значение F-критерия:

$$F_{3,239} = 6.702 < F_{0.05} = 8,54,$$

следовательно, все три модели не имеют существенных различий и разработанная модель является адекватной.

Литература

1. T. Toledo, H. N. Koutsopoulos (2004) Statistical validation of traffic simulation models. Transportation Research Board Annual Meeting Proceedings. TRB 2004, Washington DC.

2. J. Barcelo (2004). Methodological notes on the calibration and validation of microscopic simulation models. Transportation Research Board Annual Meeting Proceedings. TRB 2004. Washington, D.C.
3. Буслаев А.П., Новиков А.В., Приходько В.М., Таташев А.Г., Яшина М.В. Вероятностные и имитационные подходы к оптимизации автодорожного движения: Монография / М.: Мир, 2003. – 368 с.
4. Вол М., Мартин Б. Анализ транспортных систем: Монография / М.: Транспорт, 1981. – 516 с.
5. Ardekani, S., Herman, R. (1987), "Urban network-wide traffic variables and their relations", Transportation Science 21 (1), Pages 1–16.
6. Ardekani S.A., Herman R. A comparison of the quality of traffic service in downtown networks of various cities around the worlds. "Traffic Eng. And control". 1985, vol. 26. p.p 574-581
7. Del Castilio J.M., Benitez F.G. On the functional form of the speed-density relationship – I: General theory. "Transp. Res.". 1995, vol. 29B, №5. p.p. 373-389
8. Del Castilio J.M., Benitez F.G. On the functional form of the speed-density relationship – II: Empirical investigation. "Transp. Res.". 1995, vol.29B, №5. p.p. 391-406
9. Зырянов В.В. Моделирование при транспортном обслуживании мега-событий [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2011, Т. 18. № 4. С. 548-551. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2011/709> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.
10. Зырянов В.В., Семчугова Е.Ю., Скрынник А.М. Применение информационных технологий при повышении мобильности и обеспечении транспортной безопасности [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2012. т. 22. № 4-1. с. 118. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1083> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.