

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Организация перевозок и дорожного движения»

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ  
ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО КУРСУ**  
**«Моделирование интеллектуальных транспортных систем»**  
для студентов заочного обучения направления 23.04.01 Технология  
транспортных процессов  
образовательная программа «Интеллектуальные транспортные систем»

Ростов-на-Дону  
2024

**Тема 1. Сбор данных для моделирования. характеристики транспортных потоков, улично-дорожная сеть, организация дорожного движения, матрицы корреспонденций.**

**Методика выполнения.**

Перечень исходных данных зависит от целей и задач моделирования, объекта моделирования, применяемых моделей и программного обеспечения. В общем случае типы исходных данных можно представить следующим образом:

1. Геометрические характеристики улично-дорожной сети (длина, число полос, их ширина, радиус кривых, уклон, пересечения, дислокация остановочных пунктов общественного транспорта);

2. Организация дорожного движения (размещение светофорных объектов, параметры светофорного регулирования, алгоритмы регулирования, дорожные знаки, участки ограничения скорости);

3. Транспортный спрос (интенсивность движения на входах в зону моделирования, матрицы корреспонденций, распределение потоков на пересечениях, состав потока, интенсивность движения общественного транспорта);

4. Данные для калибровки (интенсивность движения в контрольных точках, скорость, длина очереди). В зависимости от типа применяемых методов моделирования при калибровке модели могут также использоваться параметры, отражающие некоторые свойства автомобиля и водителя (длина автомобиля, максимальное ускорение и замедление, максимальная скорость, время реакции водителя, агрессивность водителя и т.д.).

Исходные данные транспортного спроса должны характеризоваться следующей совокупностью данных:

– интенсивность движения транспортных потоков на всех входах/выходах в зоне моделирования;

- распределение потоков по направлениям на пересечениях внутри зоны моделирования;
- состав потока;
- матрицы корреспонденций для различных временных периодов и состава транспортного потока в соответствии с динамикой изменения транспортного спроса;
- пропускная способность и потоки насыщения;
- длина очереди на наиболее загруженных пересечениях;
- интенсивность пешеходного движения;
- интенсивность велосипедного движения;
- данные по движению общественного транспорта – тип транспортных средств, маршруты движения, интервалы для каждого маршрута, среднее время нахождения транспортного средства на остановке.

Измерение характеристик транспортного потока должно проводиться в ключевых местах в области моделирования. Рекомендуемый период осреднения результатов измерений не должен быть более 15 минут. При анализе результатов измерений необходимо определять участки заторов на участках перед точками измерений, поскольку в этих случаях транспортный поток на входе может быть меньше, чем при нормальном функционировании улично-дорожной сети.

При моделировании дорожного движения с учетом задач ИТС важное значение имеет достоверность исходных данных, поэтому необходима проверка на наличие резко выделяющихся значений.

Обычно транспортные детекторы регистрируют одновременное все три основных параметра транспортных потоков – интенсивность, плотность и скорость. Необходимо проверить совокупность этих данных на предмет соответствия типичным зависимостям между интенсивностью плотностью и скоростью. Рассмотрим пример по данным таблицы 1.

Таблица 1 – значения интенсивности, плотности и скорости

№ n/n	q, авт/ч	k, авт/км	v, км/ч	№ n/n	q, авт/ч	k, авт/км	v, км/ч	№ n/n	q, авт/ч	k, авт/км	v, км/ч
1	1200	15,4	79,4	18	900	27,5	36,3	35	1575	41,2	57,5
2	1260	15,7	80,0	19	900	28,1	64,0	36	1350	46,0	21,7
3	1320	16,5	80,0	20	960	28,1	65,0	37	1200	46,8	33,8
4	1380	16,9	79,8	21	1059	28,8	65,7	38	831	50,1	17,9
5	1380	17,3	80,0	22	675	30,0	71,7	39	720	53,9	16,3
6	1380	17,9	80,0	23	1059	30,9	32,4	40	1260	56,9	24,4
7	635	18,3	70,2	24	960	31,2	62,3	41	1482	57,8	51,2
8	1380	18,4	76,4	25	1271	31,8	59,7	42	1125	61,2	24,2
9	1320	18,5	73,4	26	635	31,8	57,2	43	1260	64,8	22,7
10	1380	19,2	71,2	27	900	34,9	28,6	44	1286	71,2	24,1
11	436	20,5	63,4	28	1059	35,5	28,2	45	1260	78,4	18,3
12	1125	22,1	69,7	29	1350	35,8	27,9	46	1200	86,5	15,4
13	1059	23,9	67,7	30	900	36,5	57,2	47	1380	89,4	15,0
14	529	24,7	78,8	31	1200	38,6	25,9	48	1080	96,8	13,7
15	1200	25,1	58,1	32	1125	38,9	65,1	49	1260	104,4	12,0
16	1125	25,1	68,7	33	1125	39,0	66,0	50	1320	106,1	11,1
17	635	27,4	59,2	34	1350	39,7	55,1	51	1260	109,5	12,5

Для первоначальной проверки необходимо проверить фактическое выполнение зависимостей между интенсивностью, плотностью и скоростью. Рассмотрим для примера зависимость между плотностью и скоростью по данным, приведенным в таблице 1. Проверка может производиться по макромоделям транспортного потока или регрессионным зависимостям. Для этого могут использоваться следующие макромодели:

$$v = v_f \left( 1 - \frac{k}{k_j} \right), \quad (1)$$

$$v = v_m \ln \left( \frac{k_j}{k} \right), \quad (2)$$

$$v = v_f \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{k}{k_m} \right)^2 \right], \quad (3)$$

где  $v$  - скорость транспортного потока, км/час;

$v_f$  - скорость свободного движения, км/час;

$k$  - плотность транспортного потока, авт/км;

$k_j$  - максимальная плотность транспортного потока, авт/км;

$v_m, k_m$  – соответственно скорость и плотность при достижении пропускной способности.

На рис. 1 приведен пример такой проверки по макромоделю (2).

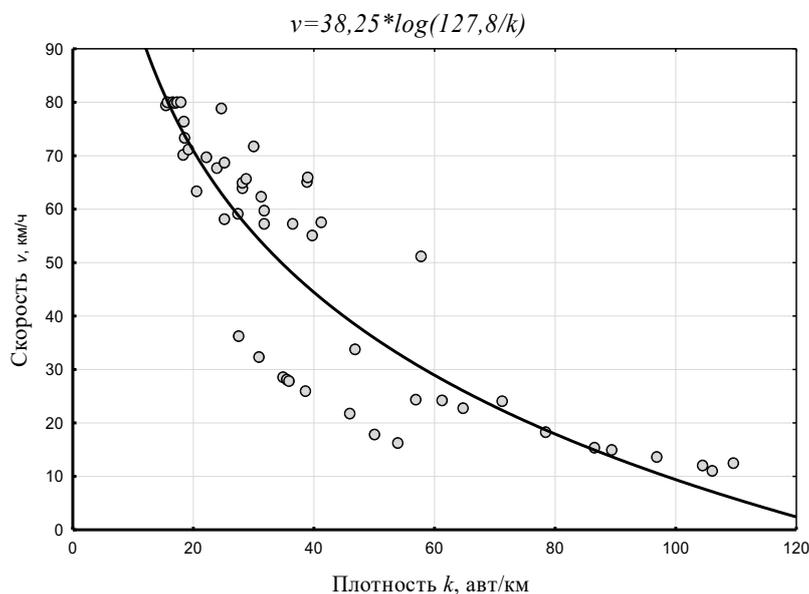


Рис. 1 – пример статистической обработки данных таблицы 1

Коэффициент корреляции для полученной модели равен 0,78 и является статистически значимым. Следовательно полученные данные могут быть использованы при моделировании в качестве исходных данных.

Для сбора данных о скорости движения и времени движения на участках сети в настоящее время могут использоваться различные методы – ручной способ, стационарные транспортные детекторы, дорожные лаборатории (плавающие автомобили), пробные автомобили.

Важной процедурой при проверке данных является выявление резко выделяющихся значений, проверка на выброс.

Пусть  $X_1, X_2, \dots, X_n$  – наблюдаемая выборка,  $x_{(1)} \leq x_{(2)} \leq \dots \leq x_{(n)}$  – построенный по ней вариационный ряд. Проверяемая гипотеза  $H_0$  заключается в том, что все  $X_1, X_2, \dots, X_n$  принадлежат одной генеральной совокупности. При проверке на выброс наибольшего выборочного значения конкурирующая гипотеза  $H_1$  заключается в том, что  $x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(n+1)}$  принадлежат одному

закону, а  $x_{(n)}$  – некоторому другому, существенно сдвинутому вправо. При проверке на выброс  $x_{(n)}$  статистика критерия Граббса имеет вид

$$G_n = \frac{(x_n - \bar{x})}{\sigma}, \quad (4)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n+1} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2}, \quad (5)$$

При проверке на выброс наименьшего выборочного значения конкурирующая гипотеза  $H_1$  предполагает, что  $x_{(1)}$  принадлежит некоторому другому закону, существенно сдвинутому влево. В данном случае вычисляемая статистика принимает вид

$$G_n = \frac{(\bar{x} - x_n)}{\sigma}, \quad (6)$$

В случае, если вычисленное значение тестовой статистики  $G$  меньше или равно 5%-му критическому значению  $G$ -критерия, такой результат признают корректным (принадлежащим тестируемой выборке). В случае, если вычисленное значение  $G$ -статистики больше 5%-го, но меньше (или равно) 1%-го критического значения, такой результат называют квазивыбросом.

В случае, если вычисленное значение  $G$ -статистики больше 1%-го критического значения, такой результат называют статистическим выбросом. Его исключают из выборки и по оставшимся данным вновь вычисляют параметры выборки  $\bar{x}$  и  $\sigma$  с учетом уменьшения ее объема  $n$ . Затем вновь проверяют на грубый выброс максимальное (если было отброшено минимальное) или минимальное (было отброшено максимальное) значение выборки и принимают решение о наличии или отсутствии грубых выбросов.

При нормальных условиях проведения эксперимента и отсутствии ошибок в вычислениях, а также при округлении промежуточных расчетов квазивыброс исключают из выборки.

Рассмотрим процедуру выявления выбросов на примере данных по скорости таблицы 1. Для приближения к однородным условиям необходимо производить проверку в определенных диапазонах изменения плотности, например 10-20, авт/км, 20-30, 30-40 и т.д.

Для области изменения плотности от 10 до 20 авт/км имеем следующие значения скорости 79,4; 80; 80; 79,8; 80; 80; 70,2; 76,4; 73,4; 71,2 или вариационный ряд 80; 80; 80; 80; 79,8; 79,4; 76,4; 73,4; 71,2; 70,2.

Среднее значение скорости равно 77,4 км/ч, среднеквадратическое отклонение 3,983 км/ч, критерий Граббса равен 0,743. Это значение G-статистики меньше 1%-го критического значения 2,387 (табл. 1 приложения), поэтому значение скорости 80 км/ч не является выбросом.

Проверка минимального значения в выборке 70,2 км/ч также показывает на отсутствие выброса, для этого значения критерий Граббса равен 1,466 и меньше табличного.

Для области изменения плотности от 20 до 30 авт/км вариационный ряд скорости имеет следующий вид: 78,8; 71,7; 69,7; 68,7; 67,7; 65,7; 65; 64; 63,4; 59,2; 58,1; 36,3.

Проверке подлежит резко выделяющееся значение скорости 36,3 км/ч. Проверка этого значения показывает, что среднее значение выборки равно 64,025 км/ч, среднеквадратическое отклонение 10,34 км/ч, критерий Граббса 2,681 при табличном 1%-м критическом значении 2,564. Следовательно, значение 36,3 является выбросом.

### **Задание на выполнение темы 1.**

Преподаватель выдает задание, включающее:

объект моделирования;

характеристики транспортных потоков;

геометрические характеристики дороги;

технические средства организации дорожного движения.

Необходимо оценить полноту и достоверность исходных данных в соответствии с методическими рекомендациями по этой теме.

## Тема 2. Создание базовой модели

Первым шагом при создании модели является построение в выбранном программно-моделирующем комплексе участка улично-дорожной сети в соответствии с ранее определенными пространственными размерами модели. При всех методах моделирования основой модели сети являются перегоны и узлы, поэтому на схеме сети должны быть проверены все связи между этими элементами транспортной инфраструктуры.

Улично-дорожная сеть для моделирования может создаваться как непосредственно в программно-моделирующем комплексе, так и в автономном режиме с использованием различных типов автоматизированного проектирования.

После завершения создания модели сети необходимо проверить предусмотренные в программном обеспечении характеристики дорог:

- количество полос движения;
- ширина полосы;
- тип полосы;
- длина участка.
- тип дороги;
- радиус кривой;
- расстояние видимости;
- максимальная скорость движения;
- местоположение автобусной остановки;
- местоположение пешеходных переходов;
- велосипедные дорожки;
- иные характеристики, включенные в программное обеспечение.

Для отображения фактически существующих технических средств организации дорожного движения необходимо дополнить модель сети существующими элементами организации дорожного движения. В современных программно-моделирующих комплексах обычно имеются следующие возможности:

- организация движения на нерегулируемом пересечении;
- организация движения на нерегулируемом пересечении с помощью знаков приоритета;
- светофорное регулирование - жесткое адаптивное, координированное, с приоритетом общественному транспорту;
- управление движением на въездах на автомагистрали.

В модели транспортный спрос задается количеством транспортных средств определенного типа, совершающих поездку из одного пункта в другой в заданный период времени. Поэтому необходимо составлять матрицы корреспонденций, как для разных типов транспортных средств, так и для разных периодов времени. Основными данными характеристик транспортного спроса при создании модели являются:

- объемы движения на входе в модель сети по типам транспортных средств;
- распределение транспортного потока по направлениям на пересечениях;
- матрицы корреспонденций;
- маршруты и графики движения автобусов;
- объемы велосипедного и пешеходного движения.

После создания модели необходимо провести полную проверку для выявления потенциальных ошибок на всех этапах создания и работы модели.

Источник ошибки	Описание	Результат проверки
1	2	3
Улично-дорожная сеть	Проверить соответствие зоны моделирования требованиям проекта	✓
	Проверить связность участков сети	✓
	Проверить визуальную конфигурацию модели сети и реальную сеть	✓
	Проверить геометрические характеристики участков сети	✓
	Проверить назначение типов дорог	✓
	Проверить запрещенные направления движения, полосы, закрытые для движения, и другие ограничения на перегонах и пересечениях	✓
	Проверить назначение специальных полос	✓

Транспортный спрос	Проверить интенсивность движения по каждому типу транспортных средств	✓
	Проверить использование специальных полос соответствующими транспортными средствами	✓
	Проверить матрицы корреспонденций для сети	✓
	Проверить правильность выбора маршрутов в соответствии с матрицей корреспонденций	✓
Светофорное регулирование	Проверить параметры светофорного регулирования и алгоритмы управления. Проверить поведение автомобилей на регулируемых пересечениях	✓
	Проверить поведение автомобилей в конфликтных точках	✓
	Проверить параметры регулирования на въездах на автомагистрали. Проверить поведение автомобилей на въездах.	✓
Общественный транспорт, пешеходы, велосипедисты	Проверить маршруты общественного транспорта, интервалы между транспортными средствами, время простоя на остановочных пунктах, тип остановки	✓
	Проверить участки с разрешенной парковкой автомобилей	✓
	Проверить маршруты пешеходного движения	✓
	Проверить маршруты велосипедного движения	✓

### Тема 3. Калибровка модели.

Калибровка — это процесс нахождения таких значений параметров, которые будут обеспечивать работоспособность модели в конкретных условиях. Калибровка включает в себя анализ и корректировку параметров модели, каждый из которых влияет на результаты моделирования и при этом необходимо учитывать влияние этих параметров друг на друга. В этих условиях рекомендуется все параметры калибровки разбить на две группы:

- параметры, которые не оказывают существенного влияния на поведение модели данного объекта и которые не подлежат корректировке;
- параметры, регулировка которых позволит обеспечить приближение модели к реальным условиям.

В целом при калибровке модели рекомендуется следующая методика,

включающая в себя три этапа:

- калибровка пропускной способности, производится для определения значений параметров, которые позволяют модели воспроизводить фактические значения интенсивности и пропускной способности в зоне моделирования. Если существуют затруднения с получением фактической пропускной способности, то можно использовать нормативные значения пропускной способности;

- калибровка параметров выбора маршрутов движения. Подбираются значения параметров, которые влияют на распределение транспортных потоков на улично-дорожной сети. Этот этап особенно важен, если выполняется проект организации дорожного движения на сетевом уровне;

- калибровка параметров оценки качества организации дорожного движения. На этом этапе производится калибровка по таким параметрам как время поездки, скорость, время задержки, длина очереди.

Оценка достоверности заключается в проверке соответствия результатов моделирования по откалиброванной модели фактическим данным. При калибровке могут использоваться следующие статистические оценки:

- среднеквадратическая ошибка;
- нормализованная среднеквадратическая ошибка;
- коэффициент корреляции;
- коэффициент Зэйла.

Наиболее распространенным критерием расхождений между результатами моделирования и фактическими данными является средний квадрат ошибки. Средний квадрат ошибки определяется по результатам нескольких прогонов с различными начальными случайными числами для каждого повторения:

$$MSE = \frac{1}{R} \sum_r (Y_{ltp_r} - Y_l)^2, \quad (7)$$

$$p_m^{min} \leq p_m \leq p_m^{max} \text{ для всех корректируемых параметров } p_m,$$

где  $MSE$  - средний квадрат ошибки;

$Y_{ltp_r}$  - расчетное значение показателя в точке  $l$  в момент времени  $t$  для параметра калибровки  $p$  при прогоне  $r$ ;

$Y_i$  - фактическое значение показателя в точке  $l$ ;

$R$  - количество прогонов модели;

$p_m$  - значение параметра калибровки модели;

$p_m^{min}$ ,  $p_m^{max}$  - пределы изменения параметра калибровки модели.

Нормализованная среднеквадратическая ошибка определяет отклонение в процентах данных моделирования от экспериментальных данных:

$$RMSNE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{y_{i,sim} - y_{i,obs}}{y_{i,obs}} \right)^2}, \quad (8)$$

где  $n$  - общее число измерений;

$y_{i,sim}$ ,  $y_{i,obs}$  - соответственно расчетные и экспериментальные данные.

Значение нормализованной среднеквадратической ошибки, не превышающее 0,15, является удовлетворительным результатом калибровки модели.

#### **Тема 4. Моделирование в соответствии с поставленной задачей.**

Моделирование осуществляется в соответствии со сценариями, выданными преподавателем каждому студенту. Сценарий включает в себя пределы изменения интенсивности движения, возможные изменения схемы организации дорожного движения, применение алгоритмов интеллектуальных транспортных систем.

Для каждого из этих сценариев необходимо осуществить несколько прогонов моделирования при различных начальных случайных числах, произвести статистическую обработку данных моделирования, провести анализ параметров эффективности и сделать выводы по проектным решениям.

Результаты моделирования представляются в табличном и графическом видах (графики зависимостей, гистограммы), в виде визуализации.

## **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1.Кадасев, Д.А. Имитационное моделирование транспортных процессов: методические указания к практическим работам. Липецк: Липецкий государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2022

2.Методические указания для выполнения курсовой работы по дисциплине «Моделирование дорожного движения»: метод. указания. Ростов н/Д.: ИЦ ДГТУ, 2020

3.Зырянов В.В. Моделирование дорожного движения. Ростов-на-Дону: Рост. гос. строит, ун-т, 2015. 163 с.

4. ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002 Точность (правильности прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 2. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений. ГОССТАНДАРТ РОССИИ

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Критические значения критерия Граббса для одного выброса

$n$	$\alpha = 1 \%$	$\alpha = 5 \%$	$n$	$\alpha = 1 \%$	$\alpha = 5 \%$
3	1,155	1,155	27	3,178	2,859
4	1,496	1,481	28	3,199	2,876
5	1,764	1,715	29	3,218	2,893
6	1,973	1,887	30	3,236	2,908
7	2,139	2,020	31	3,253	2,924
8	2,274	2,126	32	3,270	2,938
9	2,387	2,215	33	3,286	2,952
10	2,482	2,290	34	3,301	2,965
11	2,564	2,355	35	3,316	2,979
12	2,636	2,412	36	3,330	2,991
13	2,699	2,462	37	3,343	3,003
14	2,755	2,507	38	3,356	3,014
15	2,806	2,549	39	3,369	3,025
16	2,852	2,585	40	3,381	3,036
17	2,894	2,620	41	3,393	3,046
18	2,932	2,651	42	3,404	3,057
19	2,968	2,681	43	3,415	3,067
20	3,001	2,709	44	3,425	3,075
21	3,031	2,733	45	3,435	3,085
22	3,060	2,758	46	3,445	3,094
23	3,087	2,781	47	3,455	3,103
24	2,802	3,112	48	3,464	3,111
25	3,135	2,822	49	3,474	3,120
26	3,157	2,841	50	3,483	3,128