

УДК 519.237.5

И. М. Якимов, А. П. Кирпичников, О. В. Маркина

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ АВТОТРАНСПОРТА ПО ЗАГОРОДНЫМ ПРОТЯЖЁННЫМ ТРАССАМ

Ключевые слова: автотранспорт, легковой автомобиль, грузовик, грузоподъёмность, габариты, имитационное моделирование, планирование экспериментов, корреляционный анализ, регрессионный анализ, система имитационного моделирования GPSSW.

Приведено описание результатов имитационного моделирования (ИМ) движения автотранспорта по загородным трассам большой протяжённости. По результатам ИМ построена математическая модель, состоящая из совокупности уравнений регрессии, связывающих результативные показатели движения автотранспорта с влияющими на них факторами. Оценена степень влияния факторов на результативные показатели движения по математической модели и коэффициентам линейной корреляции.

Keywords: motor transport, motor-car, auto truck, capacity, external dimensions, simulation modeling, experiment design, correlation analysis, regression analysis, system simulation GPSS W.

Describes the results of simulation modeling (SM) of traffic on suburban routes a large extent. In accordance with any findings of the SM mathematical model was constructed. The model consists of a set of regression equations, linking indicators of traffic with the factors, influencing them. Describes the assessment of the degree of the factor's influence on indicators of effective movement on the mathematical model and the coefficients of linear correlation.

Введение

Намечаемое на ближайшее время значительное расширение экономических связей РФ с Китаем и создание высокоскоростной автотрассы Западная Европа – Западный Китай делает актуальным исследование движения автотранспорта по протяжённым магистралям. Исследование эффективности движения по трассам целесообразно проводить с помощью имитационного моделирования (ИМ). За объект исследования в данной работе было взято движение автотранспорта по участку строящейся международной трассы Западная Европа – Западный Китай [1], проходящей по Татарстану, а точнее участок трассы от моста в устье Камы до города Альметьевска. Длина участка трассы составляет примерно 160 км. В дальнейшем результаты исследования планируется использовать и для моделирования других участков строящейся трассы. Строительство трассы началось в 2008 году, окончание планируется к 2019 году [1]. Реализация проекта позволит значительно сократить время доставки грузов с Запада на Восток по сравнению с существующими альтернативными возможностями железнодорожному по Транссибу и морскому по Суэцкому каналу.

Основные характеристики международной трассы:

- Общая протяженность трассы – 8445 км.
- Техническая категория – автомагистраль, скоростная дорога, шоссе, трасса.
- Количество полос движения – 4 или 6.
- Расчетная скорость движения – 80 – 150 км/ч.
- Климатические условия – континентальные, резко континентальные.

Дополнительные характеристики участка трассы, взятого в качестве объекта исследования:

- Протяженность – от 20 до 160 км.

- Количество полос движения – 4, по две в каждом направлении.
- Количество съездов/въездов на трассе – 4.
- Виды транспортных средств – легковые, одногабаритные, двухгабаритные и трехгабаритные грузовые.

Методика исследования

Целью данного исследования является определение основных показателей движения грузового автотранспорта при перевозке грузов тремя видами грузовиков различной грузоподъёмности: одногабаритного, двухгабаритного и трёхгабаритного. Методика, предлагаемая для исследования движения автотранспорта, основанная на ИМ описана в [2]. Примеры применения методики приведены в [3], [4]. В методике, выделены следующие 9 этапов.

1. Выбор результативных показателей эффективности движения автотранспорта по трассам и влияющих на них факторов,
2. Постановка задач.
3. Разработка блок-схемы и программы имитационной модели.
4. Разработка стратегического плана проведения имитационного эксперимента.
5. Вычисление коэффициентов линейной корреляции и их анализ.
6. Проведение имитационного моделирования по стратегическому плану.
7. Построение математической модели, состоящей из совокупности уравнений регрессии, представляющих собой зависимости результативных показателей эффективности от влияющих на них факторов.
8. Вычисление коэффициентов эластичности влияния факторов на изменение результативных показателей эффективности движения автотранспорта.

9. Выводы по результатам исследования.

Далее приведём описание всех выделенных этапов.

Выбор результативных показателей эффективности движения автотранспорта и влияющих на них факторов

Для исследования было отобрано 15 результативных показателей эффективности (табл. 1).

Таблица 1 - Перечень отобранных переменных

№	Код переменной	Наименование переменной
Изменяемые факторы		
1	x_1	Среднее время между поступлением на трассу одногабаритных грузовиков в мин.
2	x_2	Среднее время между поступлением на трассу двухгабаритных грузовиков в мин.
3	x_3	Среднее время между поступлением на трассу трехгабаритных грузовиков в мин.
4	x_4	Среднее время между поступлением на трассу легковых автомобилей в мин.
5	x_5	Протяженность трассы в км.
Результативные показатели		
6	y_1	Среднее время проезда по полной длине трассы легковых автомобилей в мин.
7	y_2	Стандартное отклонение времени проезда по полной длине трассы легковых автомобилей в мин.
8	y_3	Средняя скорость движения по трассе легковых автомобилей в км/ч.
9	y_4	Среднее время проезда по полной трассе одногабаритных грузовиков в мин.
10	y_5	Стандартное отклонение времени проезда по полной длине трассы одногабаритных грузовиков в мин.
11	y_6	Средняя скорость движения по трассе одногабаритных грузовиков в км/ч.
12	y_7	Среднее время проезда по полной трассе двухгабаритных грузовиков в мин.
13	y_8	Стандартное отклонение времени проезда по полной длине трассы двухгабаритных грузовиков в мин.
14	y_9	Средняя скорость движения по трассе двухгабаритных грузовиков в км/ч.
15	y_{10}	Среднее время проезда по полной трассе трехгабаритных грузовиков в мин.
16	y_{11}	Стандартное отклонение времени проезда по полной длине трассы трехгабаритных грузовиков в мин.
17	y_{12}	Средняя скорость движения по трассе трехгабаритных грузовиков в км/ч.
18	y_{13}	Коэффициент заполнения трассы в долях от единицы
19	y_{14}	Общий вес всех перевезенных грузов
20	y_{15}	Общая стоимость перевозки всех грузов в тыс. руб.
21	y_{16}	Стоимость перевозки всех грузов в тыс. руб., отнесенная к 1 тонне на 100 км.

Постановка задач

Главная задача исследования, основанного на ИМ – построение математической модели, представляющей собой совокупность уравнений регрессии, связывающих результативные показатели эффективности движения автотранспорта с влияющими на них факторами.

$$y_j = f_j(x_1, x_2, \dots, x_m); \quad j = \overline{1, k}, \quad (1)$$

где y_j – j -й показатель эффективности движения автотранспорта по трассе; x_i – i -й фактор, влияющий на движение автотранспорта по трассе; k – количество результативных показателей эффективности движения автотранспорта по трассе; m – общее количество факторов.

По зависимостям (1) можно произвести оценку степени влияния факторов на результативные показатели эффективности движения автотранспорта по трассе по коэффициентам эластичности.

Перед проведением регрессионного анализа целесообразно вычислить коэффициенты линейной корреляции между переменными, отобранными для исследования, по которым также можно произвести оценку степени влияния факторов на результативные показатели эффективности движения автотранспорта по трассе.

Коэффициенты линейной корреляции вычисляются по n экспериментальным данным по следующей формуле:

$$r_{xy} = \frac{m_{1xy}^* - m_{1x}^* \cdot m_{1y}^*}{\sigma_x^* \cdot \sigma_y^*}. \quad (2)$$

В формуле (2) оценки математических ожиданий переменных x, y и их произведения вычисляются по формулам:

$$m_{1x}^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i; \quad m_{1y}^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i;$$

$$m_{1xy}^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \cdot y_i.$$

Оценки вторых начальных моментов требуются для вычисления средних квадратических отклонений. Для этого используются следующие формулы:

$$m_{2x}^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2; \quad m_{2y}^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i^2; \quad \sigma_x^* = m_{2x}^* - m_{1x}^{*2};$$

$$\sigma_y^* = m_{2y}^* - m_{1y}^{*2}.$$

По статистическим таблицам находится критическое значение коэффициента линейной корреляции.

$$r_{крит} = \pm \sqrt{\frac{t_{крит}^2}{t_{крит}^2 + n - 2}}. \quad (3)$$

Имитационная модель движения автотранспорта по протяженным трассам

При разработке имитационной модели автотранспортной трассы за основу берется клеточная структура представления транспортной сети. При таком подходе вся трасса разбивается на ячейки, где размер каждой ячейки соответствует размеру стандартного легкового автомобиля плюс допустимая величина интервала между автомобилями $5+3=8$ метрам. Размер крупных

грузовых транспортных средств будет соответствовать одной, двум или трем ячейкам трассы в зависимости от своих габаритов. Исходя из клеточной структуры представления автотранспортной сети, движение автомобиля подразумевает его перемещение с одной клетки на другую. Необходимо также учитывать, что автомобили перемещаются с различной скоростью. Трасса двухполосная. Поэтому обгон может совершаться по аналогичному принципу «с клетки на клетку». Для разработки имитационной модели использована система GPSSW.

Стратегическое планирование имитационных экспериментов

Стратегическое планирование - определяет количество проводимых экспериментов, порядок их выполнения и значения изменяемых факторов в каждом эксперименте. Для стратегического планирования используется концепция «черного ящика», суть которой – абстрагирование от физической сущности процессов, происходящих в моделируемой системе и выдаче заключений о ее функционировании только на основании входных и выходных переменных. Входные, независимые переменные называются факторами. Выходные – откликами, их величина зависит от значений факторов и параметров объекта исследования (ОИ).

В стратегическом плане значения факторов задаются в кодированном или натуральном виде. В кодированном виде для каждого фактора указывается интервал от -1 до +1, в пределах которого проводится исследование. Выскажем допущение, что уравнения регрессии (1) являются нелинейными, нелинейность которых не превышает второй степени. Для их построения используем стратегический план, состоящий из центральной точки, вариантов составленных по плану дробного факторного эксперимента (ДФЭ) плюс «звёздные» точки. В плане ДФЭ первых три фактора берём за основные и для них составляем план ПФЭ, а два дополнительных фактора меняем по закону изменения произведений основных факторов: $x_4 = x_1 \cdot x_2$; $x_5 = x_1 \cdot x_3$. Тогда количество вариантов стратегического плана составит:

$$N = 1 + 2^r + 2m = 1 + 2^3 + 2 \cdot 5 = 19, \quad (4)$$

где r - количество основных факторов; m – общее количество факторов.

Имитационное моделирование движения автотранспорта по загородным трассам

По стратегическому плану проведено имитационное моделирование процесса по 19 вариантам. По результатам проведенного имитационного моделирования можно сделать следующий вывод: с увеличением длины трассы (x_5) скорости движения любого автотранспорта: y_3, y_6, y_9, y_{12} увеличиваются, а коэффициент заполнения трассы (y_{13}) уменьшается. При уменьшении среднего времени между поступлением автотранспорта (другими словами, автотранспорт поступает чаще), скорость автомобилей падает, и загруженность трассы растёт. Полученные результаты логичны и не противоречат здравому смыслу.

Вычисление коэффициентов линейной корреляции

Перед проведением регрессионного анализа целесообразно вычислить коэффициенты линейной корреляции между переменными, отобранными для исследования, по которым можно оценить степень влияния факторов на результативные показатели эффективности движения автотранспорта по трассе. На рис.1 приведены диаграммы коэффициентов линейной корреляции между факторами $x_i; i=1,5$ и средней скоростью движения трёхгабаритных грузовиков - y_{12} и коэффициентом заполнения автотранспортом трассы - y_{13} .

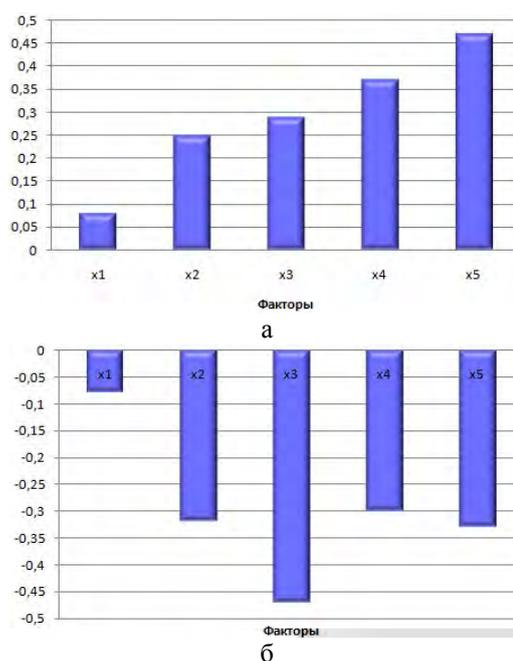


Рис. 1 - Коэффициенты линейной корреляции между факторами $x_i; i=1,5$ и результативными показателями эффективности движения автотранспорта: а) средней скоростью движения трёхгабаритных грузовиков - y_{12} ; б) коэффициентов заполнения автотранспортом трассы - y_{13}

Рассмотрим построенные диаграммы. На рис.1а для результативного показателя – скорости движения автотранспорта y_{12} наблюдается положительное влияние всех факторов. Наибольшее сильное влияние имеет фактор x_5 – длина трассы. На рис.1б для результативного показателя y_{13} отметим отрицательное влияние всех факторов. Вычисленные значения коэффициентов линейной корреляции позволяют сделать вывод, что ввиду того, что сила связи между результативными показателями и влияющими на них факторами по абсолютной величине не превышает 0,5, то связь между ними нелинейная. Поэтому в уравнения регрессии введём все факторы в первой и второй степени.

Построение математической модели

Так как все переменные, используемые в исследовании, являются случайными, независимыми и непрерывными, то для построения математиче-

ской модели будем использовать регрессионный анализ, основанный на методе наименьших квадратов (МНК) [2]. Приведём математическую модель движения автотранспорта по загородной трассе, состоящую из 16 уравнений регрессии. Для построения уравнений регрессии использован пакет прикладных программ Statistica 6.0 [5].

При построении математической модели поставлены следующие требования. Отношения стандартных ошибок к средним значениям не должны превышать 0,15, уровни значимости по коэффициентам множественной детерминации и критериям Фишера не должны превышать 0,05.

Приведём построенную математическую модель движения автотранспорта по загородной трассе, состоящую из 16 уравнений регрессии.

$$y_1 = 77,60085 - 5,27110 \cdot x_1 - 5,05549 \cdot x_2 - 5,71830 \cdot x_3 - 9,19535 \cdot x_4 + 0,68850 \cdot x_5 + 0,33237 \cdot x_1 \cdot x_1 + 0,33935 \cdot x_2 \cdot x_2 + 0,37017 \cdot x_3 \cdot x_3 + 0,68360 \cdot x_4 \cdot x_4 - 0,00002 \cdot x_5 \cdot x_5;$$

$$y_2 = 35,08224 - 2,38796 \cdot x_1 - 2,17986 \cdot x_2 - 2,39806 \cdot x_3 - 4,39816 \cdot x_4 + 0,02044 \cdot x_5 + 0,14736 \cdot x_1 \cdot x_1 + 0,14434 \cdot x_2 \cdot x_2 + 0,14463 \cdot x_3 \cdot x_3 + 0,34242 \cdot x_4 \cdot x_4 - 0,00001 \cdot x_5 \cdot x_5;$$

$$y_3 = -12,0206 + 5,0354 \cdot x_1 + 6,5281 \cdot x_2 + 7,1698 \cdot x_3 + 10,6807 \cdot x_4 + 0,2038 \cdot x_5 - 0,4949 \cdot x_1 \cdot x_1 - 0,5010 \cdot x_2 \cdot x_2 - 0,5365 \cdot x_3 \cdot x_3 - 0,8467 \cdot x_4 \cdot x_4 - 0,0001 \cdot x_5 \cdot x_5;$$

$$y_4 = 79,24260 - 5,25694 \cdot x_1 - 5,27947 \cdot x_2 - 5,74293 \cdot x_3 - 9,31465 \cdot x_4 + 0,67476 \cdot x_5 + 0,33509 \cdot x_1 \cdot x_1 + 0,35950 \cdot x_2 \cdot x_2 + 0,36999 \cdot x_3 \cdot x_3 + 0,69627 \cdot x_4 \cdot x_4 + 0,00002 \cdot x_5 \cdot x_5;$$

$$y_5 = 34,95741 - 2,21942 \cdot x_1 - 2,25450 \cdot x_2 - 2,43878 \cdot x_3 - 4,42267 \cdot x_4 + 0,02361 \cdot x_5 + 0,13054 \cdot x_1 \cdot x_1 + 0,15115 \cdot x_2 \cdot x_2 + 0,14952 \cdot x_3 \cdot x_3 + 0,34209 \cdot x_4 \cdot x_4 - 0,00002 \cdot x_5 \cdot x_5;$$

$$y_6 = -13,2983 + 5,0141 \cdot x_1 + 6,7269 \cdot x_2 + 7,1625 \cdot x_3 + 10,7385 \cdot x_4 + 0,2164 \cdot x_5 - 0,5009 \cdot x_1 \cdot x_1 - 0,5174 \cdot x_2 \cdot x_2 - 0,5286 \cdot x_3 \cdot x_3 - 0,8575 \cdot x_4 \cdot x_4 - 0,0002 \cdot x_5 \cdot x_5;$$

$$y_7 = 76,45790 - 5,03301 \cdot x_1 - 5,19193 \cdot x_2 - 5,51027 \cdot x_3 - 9,10047 \cdot x_4 + 0,68377 \cdot x_5 + 0,31673 \cdot x_1 \cdot x_1 + 0,35955 \cdot x_2 \cdot x_2 + 0,35506 \cdot x_3 \cdot x_3 + 0,68877 \cdot x_4 \cdot x_4 - 0,00003 \cdot x_5 \cdot x_5;$$

$$y_8 = 34,73600 - 2,17974 \cdot x_1 - 2,18539 \cdot x_2 - 2,42276 \cdot x_3 - 4,41426 \cdot x_4 + 0,01800 \cdot x_5 + 0,13422 \cdot x_1 \cdot x_1 + 0,14745 \cdot x_2 \cdot x_2 + 0,14859 \cdot x_3 \cdot x_3 + 0,34382 \cdot x_4 \cdot x_4 - 0,00002 \cdot x_5 \cdot x_5;$$

$$y_9 = -12,3458 + 4,9605 \cdot x_1 + 6,7887 \cdot x_2 + 7,0253 \cdot x_3 + 10,6662 \cdot x_4 + 0,2169 \cdot x_5 - 0,4867 \cdot x_1 \cdot x_1 - 0,5351 \cdot x_2 \cdot x_2 - 0,5277 \cdot x_3 \cdot x_3 - 0,8627 \cdot x_4 \cdot x_4 - 0,0001 \cdot x_5 \cdot x_5;$$

$$y_{10} = 79,30235 - 5,30177 \cdot x_1 - 5,32621 \cdot x_2 - 5,56427 \cdot x_3 - 9,46047 \cdot x_4 + 0,68202 \cdot x_5 + 0,33054 \cdot$$

$$x_1 \cdot x_1 + 0,36332 \cdot x_2 \cdot x_2 + 0,35646 \cdot x_3 \cdot x_3 + 0,70989 \cdot x_4 \cdot x_4 - 0,00001 \cdot x_5 \cdot x_5;$$

$$y_{11} = 35,55981 - 2,229861 \cdot x_1 - 2,31788 \cdot x_2 - 2,56178 \cdot x_3 - 4,32307 \cdot x_4 + 0,01755 \cdot x_5 + 0,14197 \cdot x_1 \cdot x_1 + 0,15671 \cdot x_2 \cdot x_2 + 0,15997 \cdot x_3 \cdot x_3 + 0,33516 \cdot x_4 \cdot x_4 - 0,00000 \cdot x_5 \cdot x_5;$$

$$y_{12} = -13,5124 + 5,1076 \cdot x_1 + 6,7839 \cdot x_2 + 7,0217 \cdot x_3 + 10,8625 \cdot x_4 + 0,2153 \cdot x_5 - 0,4960 \cdot x_1 \cdot x_1 - 0,5308 \cdot x_2 \cdot x_2 - 0,5232 \cdot x_3 \cdot x_3 - 0,8767 \cdot x_4 \cdot x_4 - 0,0001 \cdot x_5 \cdot x_5;$$

$$y_{13} = 1,557847 - 0,057116 \cdot x_1 - 0,109675 \cdot x_2 - 0,152679 \cdot x_3 - 0,096475 \cdot x_4 - 0,002712 \cdot x_5 + 0,005403 \cdot x_1 \cdot x_1 + 0,008383 \cdot x_2 \cdot x_2 + 0,011485 \cdot x_3 \cdot x_3 + 0,007240 \cdot x_4 \cdot x_4 + 0,000005 \cdot x_5 \cdot x_5;$$

$$y_{14} = 31658,13 + 2681,7 \cdot x_1 + 138,07 \cdot x_2 - 3037,22 \cdot x_3 - 152,34 \cdot x_4 + 5,16 \cdot x_5 - 187,08 \cdot x_1 \cdot x_1 - 1,7 \cdot x_2 \cdot x_2 + 213,41 \cdot x_3 \cdot x_3 - 9,78 \cdot x_4 \cdot x_4 - 0,03 \cdot x_5 \cdot x_5;$$

$$y_{15} = -170671 + 378301 \cdot x_1 - 207569 \cdot x_2 - 182641 \cdot x_3 + 13507 \cdot x_4 + 59130 \cdot x_5 - 30203 \cdot x_1 \cdot x_1 + 15477 \cdot x_2 \cdot x_2 + 20601 \cdot x_3 \cdot x_3 - 1160 \cdot x_4 \cdot x_4 + 3 \cdot x_5 \cdot x_5;$$

$$y_{16} = -9,15135 + 1,02140 \cdot x_1 - 7,36574 \cdot x_2 + 6,42650 \cdot x_3 + 0,77142 \cdot x_4 + 1,94263 \cdot x_5 + 0,06476 \cdot x_1 \cdot x_1 + 0,50137 \cdot x_2 \cdot x_2 - 0,38480 \cdot x_3 \cdot x_3 - 0,01504 \cdot x_4 \cdot x_4 + 0,00002 \cdot x_5 \cdot x_5. (5)$$

Показатели качества полученных уравнений регрессии приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Показатели качества полученных уравнений регрессии

Код	Средн. \bar{y}_j	Станд. ошибка S_{jst}	От-п. S_{jst}/\bar{y}_j средн.	Коэф. множ. детер. R_j^2	Крит. Фишера F_j	Уров. знач. по крит. Фишера p_j
y ₁	71,864	3,8891	0,05412	0,997	181,4	,00000
y ₂	6,473	1,8091	0,27948	0,985	27,828	,00004
y ₃	73,948	10,297	0,13924	0,943	6,481	,00708
y ₄	72,068	3,9759	0,05516	0,997	171,6	,00000
y ₅	6,463	1,7837	0,27595	0,986	28,631	,00004
y ₆	73,738	10,556	0,14315	0,942	6,3618	,00751
y ₇	71,791	3,4324	0,04781	0,998	227,08	,00000
y ₈	6,436	1,7287	0,26857	0,986	29,135	,00003
y ₉	73,76	10,275	0,13929	0,944	6,5854	,00672
y ₁₀	72,108	3,6861	0,05111	0,998	200,1	,00000
y ₁₁	6,5303	1,7948	0,27484	0,986	28,503	,00004
y ₁₂	73,596	10,368	0,14087	0,944	6,5693	,00678
y ₁₃	0,368	0,089	0,14323	0,976	16,188	,00030
y ₁₄	30582	1056,4	0,034542	0,985	27,590	,00004
y ₁₅	5313,8	33,64	6,33E-06	0,997	156,10	,00000
y ₁₆	174,17	9,2388	0,053044	0,998	220,43	,00000

Результаты нелинейной множественной регрессии позволяют сделать следующие выводы.

Во-первых, получены высокие значения коэффициентов множественной детерминации в пределах от 0,942 до 0,998. Критическое значение коэффициента множественной детерминации для рекомендуемого уровня значимости $\alpha=0.05$ при двух степенях свободы $\kappa_1=10$ и $\kappa_2=19-1=18$ равно 0,573 [5].

Во-вторых, критерий Фишера лежит в пределах от 6,3618 до 227,08 с уровнем значимости от 0 до 0,00751.

В-третьих, отношение стандартных ошибок к средним значениям для наиболее существенных результативных показателей движения автотранспорта по загородной трассе - скоростей движения: $y_3, y_6, y_9, y_{12}, y_{13}$ не превышает 0,15, что следует считать вполне приемлемым. Отношение стандартных ошибок к средним значениям для стандартных отклонений времени движения автотранспорта по трассе для результативных показателей: y_2, y_5, y_8, y_{11} превышает значение 0,15, но с этим можно смириться ввиду меньшей существенности этих показателей по сравнению с остальными.

Таким образом, применение нелинейной множественной регрессии позволило достичь вполне приемлемых результатов. По всем ограничениям, наложенным на уравнения регрессии, получены удовлетворительные значения для основных результативных показателей движения автотранспорта. Следовательно, построенная регрессионная модель (5) адекватно отображает зависимость результативных показателей эффективности движения автотранспортных средств по трассе от факторов. Построенная математическая модель позволяют оценить влияние изменяемых факторов $x_i; i=\overline{1,5}$ на результативные показатели движения автотранспорта, например, на скорость движения трёхгабаритного автотранспорта.

Вычисление коэффициентов эластичности влияния факторов на изменение результативных показателей эффективности

Коэффициент эластичности i -го фактора в j -ом результативном показателе эффективности вычисляется по формуле:

$$e_{ij} = \frac{\Delta_{ij}}{\left| \sum_{i=1}^m \Delta_{ij} \right|}; i = \overline{1, m}; j = \overline{1, k}, \quad (6)$$

где Δ_{ij} – изменение j -го результативного показателя эффективности, вызываемое изменением i -го фактора; m – общее количество изменяемых факторов.

Вычисленные значения коэффициентов эластичности факторов в средней скорости движения трёхгабаритных грузовиков - y_{12} и в коэффициенте заполнения автотранспортом трассы - y_{13} приведены на рис. 2.

Гистограмма, приведенная на рис.2а, позволяет сделать вывод, что на повышение средней скорости движения по трассе трёхгабаритного грузового автотранспорта - y_{12} положительное влияние оказывают все факторы. Наиболее сильное влияние оказывает фактор x_5 – длина трассы. Гистограмма,

приведенная на рис.2б позволяет сделать вывод, что на повышение значения показателя заполнения трассы - y_{13} отрицательное влияние оказывают все факторы. Так как влияние изменяемых факторов на результативные показатели эффективности по коэффициентам линейной корреляции (рис.1) и коэффициентам эластичности (рис.2) идентичны в качественном плане делаем заключение об их достоверности.

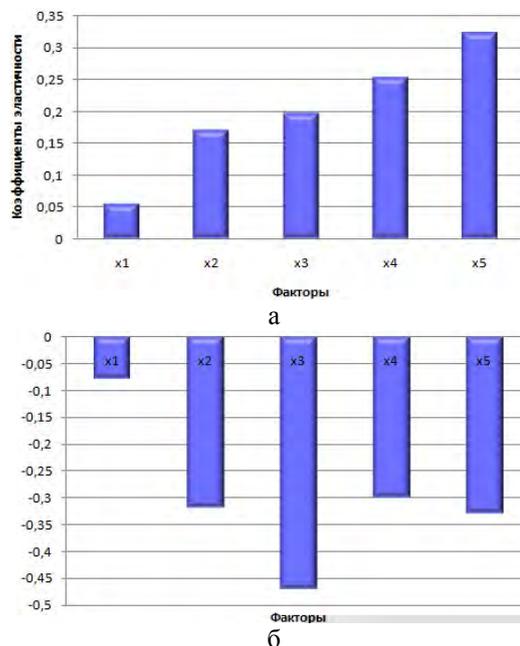


Рис. 2 - Коэффициенты эластичности факторов $x_i; i = \overline{1,5}$: а) в средней скорости движения трёхгабаритных грузовиков - y_{12} ; б) в коэффициенте заполнения автотранспортом трассы - y_{13}

Введём интегрированный показатель – интенсивность поступления на трассу всех видов автотранспорта, выражаемая в количестве автотранспорта поступающих на трассу за одну минуту.

$x_6 = 1/x_1 + 1/x_2 + 1/x_3 + 1/x_4$. Примем $x_1 = x_2 = x_3 = x_4$ тогда $x_6 = 4/x_1$.

Будем менять значения $x_6 = 4/x_1$ с одинаковым шагом 0,5 начиная с 0,5 до 5 и по математической модели вычислим y_{12} и y_{13} . Затем построим два графика: $y_{12} = f(x_6)$; $y_{13} = f(x_6)$, приведённые на рис.3.

По рис.3.б можно определить нежелательную интенсивность поступления автотранспорта на трассу выше которой скорость автотранспорта падает ниже нежелательного значения 60 км/час для трасс трёх различных протяжённостей: 20, 90, 160 км.

По рис.3 отметим имеющуюся разницу в показателях на трассах различной протяжённости.

На рис.4 приведены графики зависимостей $y_{12} = f(y_{13})$ при общей интенсивности движения автотранспорта.

По рис.4 можно определить коэффициент заполнения трассы, при котором скорость движения автотранспорта падает ниже нежелательного значения 60 км/час. для трасс трёх различных протяжённостей: 20, 90, 160 км. Эти значения можно пропускной способностью трассы. Аналогично можно найти допустимые значения интенсивности поступ-

ления автотранспорта на трассу для других допустимых значений скоростей.

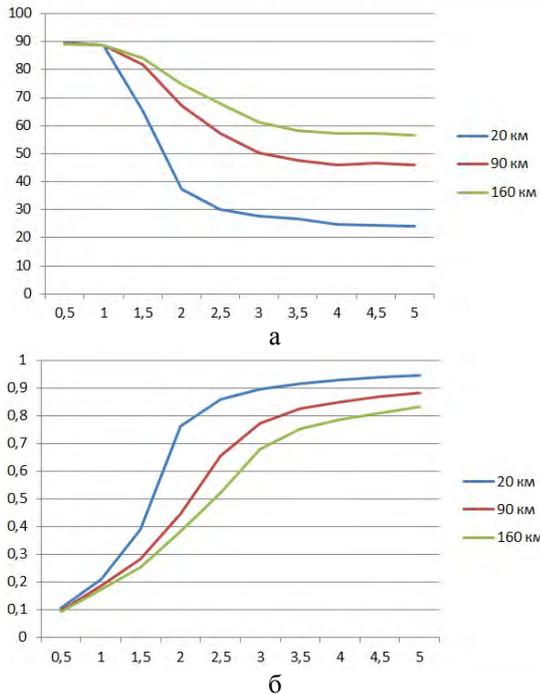


Рис. 3 - Графики зависимости результативных показателей эффективности движения автотранспорта по трассе от общей интенсивности движения автотранспорта: а) скорости движения трёхгабаритных грузовиков, б) коэффициента заполнения трассы

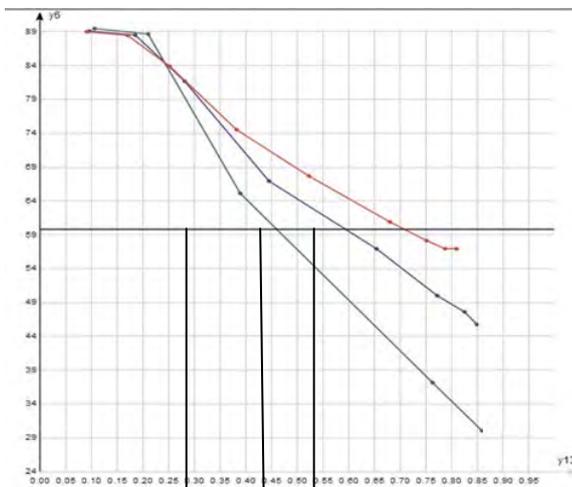


Рис. 4 - График зависимости скорости движения трёхгабаритных грузовиков от коэффициента заполнения трассы

Заключение

В работе получены следующие основные результаты:

© **И. М. Якимов** - канд. техн. наук, проф. каф. автоматизированных систем обработки информации и управления КНИТУ им А.Н.Туполева; **А. П. Кирпичников** - д-р физ.-мат. наук, зав. кафедрой интеллектуальных систем и управления информационными ресурсами КНИТУ, kirpichnikov@kstu.ru; **О. В. Маркина** – магистр каф. автоматизированных систем обработки информации и управления КНИТУ им А.Н.Туполева, o.v.markina@mail.ru.

© **I. M. Yakimov**- PhD, Professor of the Department of Automated Information Processing Systems & Control, KNRTU named after A.N. Tupolev; **A. P. Kirpichnikov** - Dr. Sci, Head of the Department of Intelligent Systems & Information Systems Control, KNRTU, kirpichnikov@kstu.ru; **O. V. Markina**-- Master of the Department of Automated Information Processing Systems & Control, KNRTU named after A.N. Tupolev, o.v.markina@mail.ru.

1. Проведен предварительный анализ работы движения автотранспорта по трассе, определен перечень результативных показателей и влияющих на них факторов, произведена постановка задач исследования и предложена методика ее решения.

2. Разработан стратегический план имитационного эксперимента. Проведено имитационное моделирование движения автотранспорта по загородной трассе по стратегическому плану.

3. Проведен корреляционный анализ.

4. Разработана статистическая модель, представляющая собой совокупность уравнений регрессии, которые отображают зависимость результативных показателей от влияющих на них факторов.

5. Вычислены коэффициенты эластичности влияния факторов на изменение результативных показателей эффективности.

6. Проведенное исследование показало высокую эффективность применения статистических методов для оценки влияния факторов на движение автотранспорта по загородной трассе. Использование прикладных программ показало их пригодность для обеспечения выполнения всех этапов предложенной методики.

7. Предложенная и опробованная в работе методика вполне пригодна для проведения аналогичных исследований различных участков трасс, и трасс в целом.

8. Результаты работы докладывались на двух международных конференциях [7], [8].

Литература

1. www.intermost.ru
2. Якимов И.М. Компьютерное моделирование: Учебное пособие – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2008. 220 с.
3. Якимов И.М., Бетретдинов Р.З., Моделирование и оптимизация процессов разработки систем программного обеспечения. Вестник Казан. технол. ун-та, 15, 18, С. 261-265 (2012).
4. Якимов И.М., Кирпичников А.П., Сытник А.С., Математическая модель работы грузоподъемных кранов и оптимизация их обслуживания. Вестник Казан. технол. ун-та. 16,24. С.182-187 (2013).
5. Боровиков В.П., Боровиков И.П. Statistica: Статистический анализ и обработка данных в среде Windows. – М.: Информационно-издательский дом "Филин", 1997. – 608с.
6. Шмойлова Р.А., Минашкин В.Г., Садовников Н.А., Шувалова Е.Б. Теория статистики. 4-е издание.:М.:Финансы и статистика, 2004. – 656с.
7. Маркина О.В., «Информационные технологии на службе общества», материалы международной науч.-практ. конф., Нижнекамск, 18 апреля 2014 г.
8. Маркина О.В., Якимов И.М., «Наука в современном информационном обществе», материалы III международной научно-практической конференции, том 2, NorthCharleston, USA, 10-11 апреля 2014 года.