

DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-6-493-497

УДК 625.8-021.4

Определение наиболее значимых факторов при анализе эксплуатационного состояния автомобильных дорог

Инж. М. Г. Солодка¹⁾¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Движение транспорта по автомобильным дорогам – процесс случайный. Поэтому уровень повреждаемости автомобилей и соответственно дорог, по которым они перемещаются, также подчиняется закономерностям случайных процессов. Динамические процессы взаимодействия автомобиля и дороги в различной степени определяются множеством факторов, к которым в том числе относятся ровность дорожных покрытий и параметры движущихся автомобилей. Поэтому была поставлена следующая задача: выявить наиболее значимые факторы и математически связать значения динамических нагрузок автомобиля с качеством дорожного покрытия и скоростью движения транспортных средств по нему. Задача в такой постановке пока не решена в достаточной степени, что и определяет актуальность и новизну исследований в данном направлении. Наиболее достоверными при решении указанной задачи являются исследования в реальных условиях на реальных объектах. Однако подготовка и проведение таких экспериментов в нужном объеме значительно затрудняют их осуществление. В связи с этим целесообразным является совмещение факторного эксперимента с испытаниями проверенной модели на ЭВМ с поэтапной фиксацией параметров рабочих процессов, проходящих в системе «автомобиль – дорога», комплексной оценкой влияния выбранных факторов и выбором их оптимального сочетания. Получена математическая зависимость для оценки влияния нескольких внешних факторов на оптимизацию динамической нагрузки автомобиля на дорогу, позволяющая получить упрощенное и адекватное описание взаимодействия элементов в системе «автомобиль – дорога». При исследовании влияния неровностей дорожного покрытия на максимальные динамические нагрузки на дорогу степень влияния выбранных факторов определена в такой последовательности: масса автомобиля, ровность покрытия и скорость движения транспортного средства.

Ключевые слова: автомобильные дороги, ровность, факторный эксперимент

Для цитирования: Солодка, М. Г. Определение наиболее значимых факторов при анализе эксплуатационного состояния автомобильных дорог / М. Г. Солодка // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 6. С. 493–497. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-6-493-497

Determination of Most Significant Factors for Analysis of Highway Operating Conditions

M. G. Solodkaya¹⁾¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Traffic circulation on highways is a random process. Therefore automotive damage rate and, respectively, roads on which they are moving is subjected to regularities of random processes. Dynamic processes of vehicle-road interaction are determined to various extents by a host of factors that include road pavement evenness and characteristics of moving vehicles. For this reason the following task has been set: to reveal the most significant factors and mathematically correlate values

Адрес для переписки

Солодка Мария Геннадьевна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 150,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 369-93-63
pd_ftk@bntu.by

Address for correspondence

Solodkaya Mariya G.
Belarusian National Technical University
150 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 369-93-63
pd_ftk@bntu.by

of vehicle dynamic loads with a quality of road pavement and vehicle speed. Such task statement has not been solved adequately and this situation determines importance and novelty of the investigations in the given direction. While solving the mentioned task the investigations which have been carried out under real-life conditions and with the help of real-life objects are considered as the most reliable ones. However, preparation and execution of such experiments as needed significantly complicates their implementation. In this regard it looks rather expedient to combine a factorial experiment with the tests of a checked model while using ECM with stage-by-stage parameter fixation of working processes passing in "vehicle-road" system, comprehensive assessment pertaining to influence of the selected factors and selection of their optimum combination. Mathematical dependence has been obtained to evaluate influence of several external factors on optimization of vehicle dynamic load on the road. This component makes it possible to attain a simplified and adequate description of element interaction in "vehicle – road" system. While investigating influence of pavement irregularities on maximum dynamic loads on the road influence rate of the selected factors is determined in the following sequence: vehicle weight, pavement evenness and speed of transport facility

Keywords: highways, evenness, factorial experiment

For citation: Solodkaya M. G. (2017) Determination of Most Significant Factors for Analysis of Highway Operating Conditions // *Science and Technique*. 16 (6), 493–497. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-6-493-497

Введение

В процессе эксплуатации узлы и детали автомобиля подвергаются случайным воздействиям, поэтому уровень его повреждаемости зависит от множества факторов [1]. Ниже рассмотрена последовательность установления влияния эксплуатационного состояния дороги на формирование динамических нагрузок между автомобилем и неровной дорогой. Предполагается, что выбранные факторы не взаимосвязаны между собой и самостоятельно вносят свой различный вклад в уровень динамических воздействий. Если данные показатели заранее выбраны и соответствуют определенным реальным величинам, то путем проведения достаточного количества экспериментов можно выявить влияние совокупности выбранных уже управляемых факторов на исследуемый параметр оптимизации [2].

Теоретические предпосылки исследования

Случайный характер процессов, протекающих в системе «автомобиль – дорога», показывает, что их изучение должно базироваться на методах математической статистики. В технике для этого наиболее широко применяется метод планирования эксперимента (для отыскания статистических оценок коэффициентов регрессионной модели и определения оптимальных значений факторов) [3]. Для того чтобы математическая модель наиболее полно отражала связи реального объекта, количество факторов должно быть достаточным. Однако правильность решения задачи зависит также от верного

выбора влияющих факторов. Вид функции отклика зависит от сложности модели взаимодействия между факторами [4]. Для линейных моделей взаимодействие факторов не учитывается. Чем выше порядок модели, тем больше всевозможных комбинаций между факторами принимается во внимание при расчете. Для числа возможных случаев 2^k (k – число факторов) необходимо проводить такое же количество опытов, что зачастую невозможно. Упрощение основано на том, что функцию отклика можно заменить полиномом вида

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + \dots + b_nx_n, \quad (1)$$

где x_i – фактор; b_i – коэффициент регрессии.

В отличие от линейной зависимости (1), в которой функция отклика является плоскостью, нелинейность последней определяется эффектом взаимодействия факторов. При этом вычисление коэффициентов нелинейной модели аналогично вычислению коэффициентов линейной модели [3, 4].

Проведение экспериментов

Для проведения экспериментов в работе использован метод математического планирования. Разнообразие условий проведения экспериментов вызывает трудности, заключающиеся в подготовке условий проведения опытов и последующем изменении уровней. Поскольку в процессе расчетов существует вероятность возникновения систематических ошибок, появляющихся вследствие целенаправленного проведения опытов, то обычно последовательность

испытаний назначается так, чтобы она была случайной.

В качестве выходных параметров (параметров оптимизации) путем экспертного анализа выбраны следующие виды нагрузок на дорожное покрытие:

- максимальная динамическая нагрузка передней и задней осей автомобиля;
- средняя динамическая нагрузка передней и задней осей автомобиля.

Согласно применяемой математической модели (1), в качестве основных факторов использованы следующие параметры с соответствующими интервалами:

- показатель неровности дорожного покрытия IRI – от $1 \cdot 10^{-3}$ до $8 \cdot 10^{-3}$ м/км;
- скорость автомобиля v_a – от 60 до 100 км/ч;
- масса двухосного автомобиля m_a – от 1580 до 17000 кг.

Данные подготовлены для расчета воздействий с учетом реально возможных характеристик микропрофиля и параметров потока машин. Исходная программа расчета статистических оценок коэффициентов регрессии предназначалась для полного факторного эксперимента при числе факторов, равном трем.

Локальная область проведения вычислительного эксперимента устанавливалась путем определения основного уровня и интервалов варьирования (табл. 1). При выборе границ областей определения факторов учитывались их ограничения [3].

Определение наиболее значимых факторов, влияющих на динамические нагрузки

Была поставлена задача – установить значимость факторов, определяющих величину максимальных и средних динамических нагрузок, а также характер изменения динамической нагрузки автомобиля в зависимости от эксплуата-

ционного состояния автомобильной дороги (в частности, от ровности покрытий) [2]. Для этого необходимо было рассмотреть функциональную зависимость

$$P_{\max} = f(IRI, v_a, m_a). \quad (2)$$

Нормы проектирования [5] регламентируют ровность покрытия через показатель неровности дорог, поэтому его значение после окончания строительства, реконструкции или капитального ремонта должно находиться в пределах норм в зависимости от категории дороги. В расчетном анализе принята максимальная масса двухосного отечественного груженого грузового автомобиля с наименьшей колесной базой 3600 мм (МАЗ-5440Х5) [6].

Для исследований и обработки наблюдений использовали программу расчета коэффициентов регрессии к функциональной зависимости (2) для рассматриваемого случая. На основании проведенных расчетов составлена таблица полного факторного эксперимента для максимальных и средних динамических нагрузок (табл. 2). Включенные в матрицу планирования реальные показатели данных вводят для того, чтобы определить коэффициенты модели и проверить ее адекватность. Значение параметра оптимизации в некоторой точке нулевых факторов равно математическому ожиданию, оценку которого дает свободный первый член рассматриваемого уравнения. Значения коэффициентов в линейной модели показывают степень влияния каждого фактора [7, 8].

При анализе результатов эксперимента сделаны следующие допущения:

- условная дисперсия параметра оптимизации постоянна в области определения факторов;
- факторы независимы;
- значения параметров оптимизации независимы.

Таблица 1

Уровни факторов и интервалы варьирования
Factor levels and variation intervals

Фактор, размерность	Уровень фактора			Интервал варьирования
	–1	0	+1	
x_1 – показатель неровности дорожного покрытия	0,001	0,0045	0,008	0,0035
x_2 – скорость автомобиля, км/ч	60	80	100	20
x_3 – масса автомобиля, кг	1580	9290	17000	7710

План полного факторного эксперимента
Plan of complete factorial experiment

Показатель						Параметр оптимизации							
кодированный			реальный			Первый эксперимент				Повторный эксперимент			
x_1	x_3	x_4	$IRI, 10^{-3} \text{ м/км}$	$v_a, \text{ км/ч}$	$m_a, \text{ кг}$	$P_{\text{max}}^{\text{пер}}, \text{ Н}$	$P_{\text{max}}^{\text{задан}}, \text{ Н}$	$P_{\text{ср}}^{\text{пер}}, \text{ Н}$	$P_{\text{ср}}^{\text{задан}}, \text{ Н}$	$P_{\text{max}}^{\text{пер}}, \text{ Н}$	$P_{\text{max}}^{\text{задан}}, \text{ Н}$	$P_{\text{ср}}^{\text{пер}}, \text{ Н}$	$P_{\text{ср}}^{\text{задан}}, \text{ Н}$
+	+	+	0,008	100	17000	86000	201000	64700	103000	128510	119010	63878	102780
–	+	+	0,001	100	17000	68700	121000	64300	102000	68749	106100	63983	102830
+	–	+	0,008	60	17000	78100	156000	64700	103000	93037	115060	64184	102740
–	–	+	0,001	60	17000	67900	114000	64300	103000	67029	104230	63926	102820
+	+	–	0,008	100	1580	15190	12960	9015	6758	12136	10053	8899	6603
–	+	–	0,001	100	1580	9879	7556	8897	6616	9285	6934	8893	6607
–	–	–	0,001	60	1580	9867	7930	8895	6603	9170	6883	8892	6609
+	–	–	0,008	60	1580	13690	11680	8968	6676	10712	8272	8895	6600

Выбор параметров оптимизации основан на поиске наиболее эффективных путей повышения качества выполняемого расчетного алгоритма. Фактически оптимизирующие расчеты могут проводиться по любому параметру, который может быть описан математическим выражением. При выполнении опытов все факторы считали условно линейными и постоянными в течение всего периода их проведения на заданном уровне. Для объективной оценки полученных результатов и значений факторов всегда рассчитывались значения ошибок моделей [9, 10].

Проанализировав коэффициенты уравнения регрессии и проверив математическую зависимость на адекватность с помощью критериев Стьюдента и Фишера, можно отметить, что на динамическую нагрузку по степени влияния выделены масса автомобиля, ровность покрытия и скорость автомобиля. С помощью этих зависимостей можно определять величину динамической нагрузки автомобиля с достаточной точностью вычислений при любом сочетании выбранных факторов [11, 12]

$$Y(P_{\text{max}}^{\text{задан}}) = 78400 + 16160x_1 + 6720x_2 + 68230x_3 + 4900x_1x_2 + 13720x_1x_3 + 6405x_2x_3. \quad (3)$$

Таким образом, при помощи полученной зависимости (3) становится весьма удобно и от-

носительно просто определять величину динамической нагрузки грузового автомобиля с требуемой погрешностью в вычислениях при любом сочетании выбранных факторов. Поскольку наибольшую нагрузку на дорожное покрытие оказывает задняя ось автомобиля, в дальнейших исследованиях использовано критическое уравнение регрессии (3) для заднего ведущего моста двухосного автомобиля.

ВЫВОДЫ

По результатам выполненных расчетов и их анализа можно сформулировать следующие выводы:

1. Использование математической зависимости (3) для оценки влияния нескольких внешних факторов на оптимизацию динамической нагрузки автомобиля на дорогу позволяет получить упрощенное и адекватное описание взаимодействия элементов в системе «автомобиль – дорога».

2. При исследовании влияния неровностей дорожного покрытия на его максимальные динамические нагрузки степень влияния выбранных факторов определена в такой последовательности: масса автомобиля, ровность покрытия и скорость движения транспортного средства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика / А. И. Кобзарь. М.: Физматлит, 2006. 816 с.
2. Львовский, Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул / Е. Н. Львовский. Минск: Вышэйш. шк., 1988. 192 с.
3. Митков, А. Л. Статистические методы в сельхозмашиностроении / А. Л. Митков, С. В. Кардашевский. М.: Машиностроение, 1978. 360 с.
4. Конопленко, Е. И. Планирование эксперимента / Е. И. Конопленко, Н. К. Хореева, А. П. Лапусь. М.: МГУПП, 2011. 46 с.
5. Автомобильные дороги. Нормы проектирования: ТКП 45-3.03-19–2006. Введ. 26.01.2006. Минск: Минстройархитектуры, 2006. 42 с.
6. Высоцкий, М. С. Автомобили: основы проектирования / М. С. Высоцкий. Минск: Вышэйш. шк., 1987. 152 с.
7. Радченко, С. Г. Устойчивое оценивание коэффициентов регрессионных моделей для нестандартных областей факторного пространства с линейными ограничениями / С. Г. Радченко // Математичні машини і системи. 2002. № 2. С. 90–96.
8. Дубров, А. М. Многомерные статистические методы для экономистов и менеджеров / А. М. Дубров, В. С. Мхитарян, Л. И. Трошин. М.: Финансы и статистика, 1998. 350 с.
9. Смородинский, С. С. Анализ и оптимизация систем на основе аналитических моделей / С. С. Смородинский, Н. В. Батин. Минск: БГУИР, 1997. 77 с.
10. Смородинский, С. С. Методы и системы принятия решений: в 2 ч. / С. С. Смородинский, Н. В. Батин. Минск: БГУИР, 2000–2001. 2 ч.
11. Каганович, В. Е. Оценка транспортно-эксплуатационных расходов на основе учета изменения скорости движения / В. Е. Каганович // Проектирование автомобильных дорог: межвузовский сб. Омск: СибАДИ, 1979. С. 4–14.
12. Исследование влияния дорожных неровностей на режим движения автомобиля с помощью электронных машин непрерывного действия / Ю. Б. Бельский [и др.] // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1965. № 10. С. 128–133.

Поступила 18.04.2017

Подписана в печать 20.06.2017

Опубликована онлайн 28.11.2017

REFERENCES

1. Kobzar A. I. (2006) *Applied Mathematical Statistics*. Moscow, Phizmatlit Publ. 816 (in Russian).
2. Lvovsky E. N. (1988) *Statistical Methods for Construction of Empirical Formula*. Minsk, Vysheyschaya Shkola Publ. 192 (in Russian).
3. Mitkov A. L., Kardashevsky S. V. (1978) *Statistical Methods for Agricultural Machinery Building*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ. 360 (in Russian).
4. Konoplenko E. I., Khoreeva N. K., Lapus A. P. (2011) *Planning of Experiment*. Moscow, Moscow State University of Food Production. 46 (in Russian).
5. ТКП 45-3.03-19–2006. *Automobile Roads. Design Norms*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 2006. 42 (in Russian).
6. Vysotsky M. S. (1987) *Automobiles: Fundamentals of Design*. Minsk, Vysheyschaya Shkola Publ. 152 (in Russian).
7. Radchenko S. G. (2002) Stable Estimation of Regression Model Coefficients for Non-Standard Areas of Factor Space with Linear Limitations. *Matematichni Mashini i Sistemi = Mathematical Machines and Systems*, (2), 90–96 (in Russian).
8. Dubrov A. M., Mkhitaryan V. S., Troshin L. I. (1998) *Multidimensional Statistical Methods for Economists and Managers*. Moscow, Finansy i Statistika Publ. 350 (in Russian).
9. Smorodinsky S. S., Batin N. V. (1997) *Analysis and Optimization of Systems on the Basis of Analytical Models*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. 77 (in Russian).
10. Smorodinsky S. S., Batin N. V. (2000–2001) *Methods and Systems for Decision Making. Part 2*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. (in Russian).
11. Kaganovich V. E. (1979) Evaluation of Transport and Operational Costs on the Basis of Accounting for Changes in Motion Speed. *Proektirovanie Avtomobil'nykh Dorog: Mezhhuzovskii Sbornik* [Design of Highways: Interuniversity Collection]. Omsk, Siberian Automobile and Highway Institute, 4–14 (in Russian).
12. Belen'kii Yu. B., Kovalev Ya. N., Lomako D. M., Furunzhiev R. I. (1965) Research for Influence of Road Unevenness on Vehicle Movement Regime while Using Electronic Continuous-Type Machines. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Stroitelstvo i Arkhitektura* [News of Higher Educational Institutions. Construction], (10), 128–133 (in Russian).

Received: 18.04.2017

Accepted: 20.06.2017

Published online: 28.11.2017