

УДК 625.7.032.4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ АВТОМОБИЛЯ

*DETERMINATION OF THE IMPACT
OF MOTOR ROADS OPERATIONAL
CONDITION ON DYNAMIC LOADS
OF MOTOR VEHICLE*

В статье рассмотрена математическая модель, адекватно описывающая взаимодействия элементов в системе «дорога - автомобиль».

The article covers mathematical model that adequately describes interaction of elements in the system "motor road – motor vehicles".

ВВЕДЕНИЕ

Движение транспорта по автомобильным дорогам – случайный процесс. Поэтому уровень повреждаемости автомобилей и дороги, по которой они перемещаются, также подчиняется закономерностям случайных вероятностных процессов.

Динамические факторы взаимодействия автомобиля и дороги тесно связаны между собой и в значительной степени определяют ровностью дорожных покрытий и параметрами движущихся автомобилей. Другими словами, требуется определить степень влияния динамических нагрузок автомобиля на дорожное покрытие в зависимости от его ровности и скорости движения транспортных средств.

Задача в такой постановке пока не решена в достаточной степени, что и определяет актуальность исследований в данном направлении. Наиболее достоверным при решении указанной задачи является проведение исследований в реальных условиях, однако подготовка и проведение таких экспериментов в требуемом объеме существенно затрудняет ее решение. В связи с этим, наиболее целесообразно совместить факторный эксперимент и моделирование на ЭВМ процессов, про-

М.Г. Солодкая,

аспирант, старший преподаватель
Белорусского национального технического
университета, г. Минск, Беларусь

Я.Н. Ковалев,

доктор технических наук, профессор
Белорусского национального технического
университета, г. Минск, Беларусь

ходящих в системе «дорога - автомобиль», чтобы комплексно оценить влияние отдельных факторов и выбрать их оптимальное значение.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И СОСТАВЛЕНИЕ ПЛАНА ПОЛНОГО ФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

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 и факторов).

Для того чтобы математическая модель наиболее полно отражала связи реального объекта, количество факторов должно быть наиболее полным. Однако правильность решения задачи зависит также от верного выбора влияющих факторов.

Вид функции отклика зависит от сложности взаимодействий между факторами. 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 R^m необходимо проводить соответствующее количество опытов, что зачастую невозможно. Упрощение основано на том, что функцию отклика можно заменить полиномом

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_3X_3 + B_4X_4 + \dots, \quad (1)$$

где X_i - факторы;

B_i - коэффициенты регрессии.

В отличие от линейной модели (1), в которой функция отклика является плоскостью, нелинейность последней определяется эффектом взаимодействия факторов. При этом вычисление коэффициентов модели аналогично вычислению для линейной модели [1, 2].

ПОДГОТОВКА И ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для проведения моделирующих расчетов была использована программа расчета коэффициентов регрессии модели для рассматриваемого случая.

В качестве выходных параметров (параметров оптимизации) были использованы:

- максимальная динамическая нагрузка передней оси автомобиля;
- максимальная динамическая нагрузка задней оси автомобиля;

Таблица 1 - Уровни факторов и интервалы варьирования

Фактор, размерность	Уровень фактора			Интервал варьирования
	-1 (F_{min})	0	+1 (F_{max})	
X_1 - индекс ровности дорожного покрытия, м/км	1	4,5	8	3,5
X_2 - коэффициент вариации	0,2	0,3	0,4	0,1
X_3 - скорость автомобиля, км/ч	60	80	100	20
X_4 - масса автомобиля, кг	1580	9290	17000	7710

- средняя динамическая нагрузка передней оси автомобиля;
- средняя динамическая нагрузка задней оси автомобиля.

Согласно применяемой математической модели в качестве основных факторов были использованы следующие параметры с диапазонами изменения в реальном выражении:

- индекс ровности дорожного покрытия от 1 м/км до 8 м/км;
- коэффициент вариации от 0,2 до 0,4;
- скорость автомобиля от 60 км/ч до 100 км/ч;
- масса автомобиля от 1580 кг до 17000 кг.

Исходные данные были подготовлены для рас-

чета воздействий с учетом реально возможных характеристик микропрофиля и параметров потока машин. Исходная программа расчета статистических оценок коэффициентов регрессии применительно к дороге Р-23 предназначалась для полного факторного эксперимента (ПФЭ) при числе факторов, равном четырем.

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАИБОЛЕЕ ЗНАЧИМЫХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ В НАИБОЛЬШЕЙ СТЕПЕНИ

Целью настоящего расчета было установление значимости факторов, определяющих величину максимальных и средних динамических нагрузок, и характера изменения динамической нагрузки

в зависимости от эксплуатационного состояния автомобильной дороги (в частности, ровности покрытий). Для этого необходимо рассмотреть функцию

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

Международные нормы и ТКП 45-3.03-112 [3] регламентируют ровность покрытия через IRI, поэтому значение показателя после окончания строительства, реконструкции или капитального ремонта составляет 1 м/км и не может превышать

8 м/км. На основании обзора статистических параметров неровности установлено, что коэффициент вариации составляет 0,2-0,4. Для расчетов принята максимальная масса двухосного груженого грузового автомобиля с наименьшей колесной базой 3600 мм (МАЗ 5440Х5) [4].

Расчеты производились по разработанной программе полного факторного эксперимента (ПФЭ). На основании проведенных расчетов была составлена таблица 2, в которой отражен план полного факторного эксперимента для максимальных и средних динамических нагрузок.

Включенные в матрицу планирования опы-

ции постоянна в области определения факторов;
- факторы линейно независимы между собой;
- значения параметров оптимизации независимы.

Выбор параметров оптимизации основан на поиске наиболее эффективных путей повышения качества выполняемого технологического процесса. Фактически, оптимизирующие расчеты могут быть проведены по любому параметру, который может быть описан математическим выражением.

Важной характеристикой регрессионной модели (E_{ps}) является процентное отношение сред-неквадратического отклонения разницы между

Таблица 2 - План полного факторного эксперимента

№ п/п	Кодированные				Реальные показатели				Параметры оптимизации			
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	IRI, м/км	V _{IRI}	V _a , км/ч	m _a , кг	P _{max} ^{пер} , Н	P _{max} ^{зад} , Н	P _{ср} ^{пер} , Н	P _{ср} ^{зад} , Н
1	+	+	+	+	8	0,4	100	17000	86000	201000	64700	103000
2	-	+	+	+	1	0,4	100	17000	68700	121000	64300	102000
3	+	-	+	+	8	0,2	100	17000	85000	197000	64600	103000
4	-	-	+	+	1	0,2	100	17000	68400	120000	64300	102000
5	+	+	-	+	8	0,4	60	17000	78100	156000	64700	103000
6	-	+	-	+	1	0,4	60	17000	67900	114000	64300	103000
7	+	-	-	+	8	0,2	60	17000	79400	152000	64800	103000
8	-	-	-	+	1	0,2	60	17000	67100	112000	64300	103000
9	+	+	+	-	8	0,4	100	1580	15480	13730	9016	6736
10	-	+	+	-	1	0,4	100	1580	9881	7683	8898	6619
11	+	-	+	-	8	0,2	100	1580	15190	12960	9015	6758
12	-	-	+	-	1	0,2	100	1580	9879	7556	8897	6616
13	+	+	-	-	8	0,4	60	1580	14030	12050	8969	6673
14	-	+	-	-	1	0,4	60	1580	9867	7930	8895	6603
15	+	-	-	-	8	0,2	60	1580	13690	11680	8968	6676
16	-	-	-	-	1	0,2	60	1580	9838	7756	8894	6604

ты фактически проводят 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 силу влияния каждого фактора. При переходе фактора с нижнего уровня на верхний и наоборот необходимо удвоить значение коэффициента регрессии.

При анализе результатов эксперимента сделаны следующие допущения:

- условная дисперсия параметра оптимиза-

экспериментальными и теоретическими точками плана эксперимента (E_{pm}) к свободному члену модели (B_0), характеризующей средний уровень линии регрессии, т.е.

$$E_{ps'} \% = E_{pm} \cdot 100 / B_0. \quad (3)$$

О точности попадания модели в область оптимума свидетельствует факт соответствия коэффициентов регрессии уровню среднеквадратических ошибок. Ниже приведены значения E_{ps} для проведенных расчетов.

Дальнейший переход на натуральные значения X_t производим в соответствии с кодированными факторами

$$X_t = (2 (F_t - F_{min}) / (F_{max} - F_{min})) + 1. \quad (4)$$

При проведении опытов все факторы считаем условно линейными и постоянными в течение всего периода их поведения на заданном уровне. Для объективной оценки полученных результатов и значений факторов всегда рассматривались значения ошибок моделей.

В дальнейшем при поиске оптимального сочетания факторов может быть использован метод прямого поиска в некотором четырехмерном гиперпространстве. В данной работе такая задача не стояла.

Уравнения регрессий, описывающие влияние кодированных величин факторов на изменение выходных параметров (параметров оптимизации) динамических нагрузок автомобиля, имеют вид:

а) для максимальных динамических нагрузок на переднюю ось:

$$Y(P_{max}^{пер}) = 43670 + 4720 X_1 + 78,81 X_2 + 1150 X_3 + 31410 X_4. \quad (5)$$

Средние статистические ошибки моделей (погрешность взаимодействия, %) указаны в таблице 3.

б) для максимальных динамических нагрузок на заднюю ось:

$$Y(P_{max}^{зад}) = 78400 + 16160 X_1 + 777,6 X_2 + 6720 X_3 + 68230 X_4. \quad (6)$$

Средние статистические ошибки моделей (погрешность взаимодействия, %) указаны в таблице 4.

Таблица 3 - Средние статистические ошибки регрессионных моделей

Тип модели			
Линейная	Парное взаимодействие факторов	Тройное взаимодействие факторов	Четырехкратное взаимодействие факторов
6,163	1,414	0,3754	0,00

в) для средних динамических нагрузок на переднюю ось:

$$Y(P_{cp}^{пер}) = 41790 + 5195 X_1 - 5071 X_2 + 5065 X_3 + 22710 X_4. \quad (7)$$

Таблица 4 - Средние статистические ошибки регрессионных моделей

Тип модели			
Линейная	Парное взаимодействие факторов	Тройное взаимодействие факторов	Четырехкратное взаимодействие факторов
21,11	5,72	0,04409	0,00

Средние статистические ошибки моделей (погрешность взаимодействия, %) указаны в таблице 5.

Таблица 5 - Средние статистические ошибки регрессионных моделей

Тип модели			
Линейная	Парное взаимодействие факторов	Тройное взаимодействие факторов	Четырехкратное взаимодействие факторов
40,21	27,16	12,16	0,00

г) для средних динамических нагрузок на заднюю ось:

$$Y(P_{cp}^{зад}) = 54710 + 150,1X_1 - 1,438X_2 - 114,2X_3 + 48040X_4 \quad (8)$$

Средние статистические ошибки моделей (погрешность взаимодействия, %) указаны в таблице 6.

Погрешность моделей с учетом взаимодействия

выбранных факторов и требуемой погрешности в вычислениях.

Для получения погрешности 5,72 % применена модель с учетом двойного взаимодействия факторов. При этом уравнение регрессии будет иметь следующий вид

$$Y(P_{max}^{зад}) = 78400 + 16160X_1 + 777,6X_2 + 6720X_3 + 68230X_4 + 364,9X_1X_2 + 4900X_1X_3 + 13720X_1X_4 - 40,44X_2X_3 + 597,4X_2X_4 + 6405X_3X_4 \quad (9)$$

Таблица 6 - Средние статистические ошибки регрессионных моделей

Тип модели			
Линейная	Парное взаимодействие факторов	Тройное взаимодействие факторов	Четырехкратное взаимодействие факторов
0,447	0,2152	0,002628	0,00

всех факторов отсутствует, что говорит о полной взаимосвязи названных факторов.

Анализируя полученные зависимости можно сделать вывод, что на линейность максимальной динамической нагрузки наибольшее влияние оказывают масса автомобиля, ровность покрытия и скорость автомобиля. С помощью этих зависимостей, можно определять величину динамической нагрузки автомобиля при любом сочетании

Кроме того, был дополнительно проведен эксперимент для фиксированных значений некоторых параметров с целью установить влияние индекса ровности дорожного покрытия на скорость движения автомобиля через оптимизацию динамической нагрузки автомобиля. В данной регрессионной модели влияние фактора V_{IRI} мала, поэтому им можно пренебречь или для более точных расчетов принять $V_{IRI} = 0,29$ (наибольшее разрушающее воздействие).

В таблице 7 приведены результаты, выявленные на основе регрессионной модели для максимальных динамических нагрузок задней оси ав-

Таблица 7 - Расчет динамических нагрузок автомобиля в зависимости от состояния дорожного покрытия (микропрофиля поверхности дороги) и скорости движения автомобиля (линейная модель)

IRI, м/км	Скорость v_a , км/ч										
	60	64	68	72	76	80	84	88	92	96	100
1,0	123750	125094	126438	127782	129126	130470	131814	133158	134502	135846	137190
1,7	126982	128326	129670	131014	132358	133702	135046	136390	137734	139078	140422
2,4	130214	131558	132902	134246	135590	136934	138278	139622	140966	142310	143654
3,1	133446	134790	136134	137478	138822	140166	141510	142854	144198	145542	146886
3,8	136678	138022	139366	140710	142054	143398	144742	146086	147430	148774	150118
4,5	139910	141254	142598	143942	145286	146630	147974	149318	150662	152006	153350
5,2	143142	144486	145830	147174	148518	149862	151206	152550	153894	155238	156582
5,9	146374	147718	149062	150406	151750	153094	154438	155782	157126	158470	159814
6,6	149606	150950	152294	153638	154982	156326	157670	159014	160358	161702	163046
7,3	152838	154182	155526	156870	158214	159558	160902	162246	163590	164934	166278
8,0	156070	157414	158758	160102	161446	162790	164134	165478	166822	168166	169510
$P_{стат}$	103000	103000	103000	103000	103000	103000	103000	103000	103000	103000	103000

Таблица 8 - Полигон максимальных коэффициентов динамичности для различных IRI и скоростей движения автомобилей с максимальной нагрузкой 10,5 т на ось

IRI, м/км	Коэффициент динамичности										
	Скорость v_a , км/ч										
	60	64	68	72	76	80	84	88	92	96	100
1,0	1,20	1,21	1,23	1,24	1,25	1,27	1,28	1,29	1,31	1,32	1,33
1,7	1,23	1,25	1,26	1,27	1,29	1,30	1,31	1,32	1,34	1,35	1,36
2,4	1,26	1,28	1,29	1,30	1,32	1,33	1,34	1,36	1,37	1,38	1,39
3,1	1,30	1,31	1,32	1,33	1,35	1,36	1,37	1,39	1,40	1,41	1,43
3,8	1,33	1,34	1,35	1,37	1,38	1,39	1,41	1,42	1,43	1,44	1,46
4,5	1,36	1,37	1,38	1,40	1,41	1,42	1,44	1,45	1,46	1,48	1,49
5,2	1,39	1,40	1,42	1,43	1,44	1,45	1,47	1,48	1,49	1,51	1,52
5,9	1,42	1,43	1,45	1,46	1,47	1,49	1,50	1,51	1,53	1,54	1,55
6,6	1,45	1,47	1,48	1,49	1,50	1,52	1,53	1,54	1,56	1,57	1,58
7,3	1,48	1,50	1,51	1,52	1,54	1,55	1,56	1,58	1,59	1,60	1,61
8,0	1,52	1,53	1,54	1,55	1,57	1,58	1,59	1,61	1,62	1,63	1,65

томобилia, так как рассматривается максимальное воздействие груженого грузового автомобиля на поверхность дороги.

В таблице 8 показана взаимосвязь между ровностью дороги и коэффициентом динамичности автомобиля при различной ровности дороги и скорости движения автомобиля. Именно таблица 8 отражает качество самого перевозочного процесса. Несоответствие эксплуатационных характеристик дороги техническому регламенту (дорога не должна эксплуатироваться при $K_{динн} > 1,3$) заведомо приводит к разрушению дороги и подвески автомобиля, оказывает негативное воздействие на пассажиров, а также не обеспечивает сохранность груза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование математической модели (9) совместно с вычислительным компьютерным экспериментом для оценки влияния нескольких внешних факторов на оптимизацию динамической нагрузки автомобиля позволяет получить адекватное описание взаимодействия элементов в системе «дорога - автомобиль».

Для определения дальнейшего направления исследований можно сделать предварительный вывод о том, что по степени наибольшего влияния изменяющихся эксплуатационных факторов на максимальные динамические нагрузки автомобиля наиболее значимыми являются: его масса, ровность покрытия и скорость движения транспортного средства.

Литература

1. Митков, А.Л., Кардашеевский, С.В. Статистические методы в сельскохозяйственном машиностроении. - М.: Машиностроение, 1978. - 360 с.
2. Кардашеевский, С.В. Статистические методы в машиностроении. - М.: Машиностроение, 1977. - 360 с.
3. Автомобильные дороги. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования: ТКП 45-3.03-112-2008 (02250).
4. Корсаков, В.В. Структура типоразмерного ряда основных моделей автомобилей и автопоездов Минского автозавода и обоснование их параметров // Механика машин, механизмов и материалов. - 2009. - №2 (7). - С. 5-11.