

## СТАТИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОПРОФИЛЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

При движении автомобильного и другого подвижного состава в естественных дорожных условиях в его агрегатах и узлах происходят колебательные процессы. К факторам, обуславливающим возникновение колебаний, относятся, например, неровности дорожного полотна, жесткость покрытия, неравномерность подачи топлива и т. д.

В качестве основного фактора следует считать неровности дорожного полотна. При движении автомобилей и других транспортных средств динамические нагрузки на ходовую часть и раму в несколько раз превышают статические. Характер изменения первых и их величина являются следствием колебательного процесса динамической системы в эксплуатационных условиях.

Исследование этих процессов позволяет найти пути по улучшению таких важных эксплуатационных качеств автомобиля, как плавность хода, устойчивость, прочность и долговечность.

Поддресоренный кузов автомашины рассматривается как динамическая система, способная совершать колебательные движения: вертикальные, продольно-угловые и поперечно-угловые. Его можно представить как разомкнутую систему автоматического регулирования с несколькими входами и одним выходом. В качестве воздействия на вход системы должны рассматриваться неровности дороги, так как они являются основной причиной колебаний системы.

До последнего времени расчет колебательных процессов автомобиля производился таким образом, что в качестве воздействия на него в процессе движения рассматривалась дорога, формы неровностей которой представляют собой синусоиды или косинусоиды в различном сочетании, т. е. закон изменения микропрофиля принимался, например, выражением, определяющим возмущающую силу  $Q(v, t)$ :

$$q = q_0(1 - \cos vt) \quad (1)$$

или

$$q = 2q_0 \sin vt, \quad (2)$$

где  $v$  — частота возмущающей силы при периодическом чередовании неровностей;

$q_0$  — смещение кривой относительно плоскости дороги;  
 $t$  — время.

Однако такое рассмотрение источника возмущений является лишь допущением, которое сильно отличается от истины, так как неровности дороги не имеют правильной формы, они различны по величине и чередуются в самых разнообразных сочетаниях.

Возмущение, возникающее при движении подвижного состава по дорогам, является случайным, которое можно описать только случайной функцией.

Поэтому исследование колебательных процессов автомобильного подвижного состава нужно начинать с анализа воздействия — воздействия на машину, — учитывая, что это возмущение является случайным. Такой подход к исследованию зародился совсем недавно, и уже проведенные исследования подтверждают его целесообразность и гибкость в сочетании с точностью получаемых конечных результатов. Функция воздействия является стационарным случайным процессом, т. е. процессом, не зависящим от начала отсчета времени. Стационарная случайная функция воздействия зависит от свойств дорожного профиля и скорости движения.

Исследуя статистическим методом микропрофиль дороги, можем установить колебания какой частоты и интенсивности может вызвать неровная дорога в машине при ее движении с различной скоростью.

Для перехода от случайной функции  $F(s)$ , описывающей профиль пути, к функции воздействия необходимо поделить горизонтальную координату  $S$  на скорость  $v$ . В этом случае функция воздействия  $H(t)$  будет функцией времени.

При скорости движения  $v = 1,0$  м/сек ось абсцисс будет одновременно и осью  $S$  и осью  $t$ . Для стационарных случайных процессов их исчерпывающей характеристикой является корреляционная функция и спектральная плотность.

Поэтому нашей конечной целью при статистической обработке микропрофиля дороги является нахождение корреляционной функции и спектральной плотности. Дальнейший ход применения метода к исследованию непосредственно динамической системы здесь рассматривать не будем. Достаточно указать, что по энергетическим спектрам можно определить не только максимальные параметры плавности хода и частоты, при которых они возникают, но и дисперсии и средние квадратичные значения, характеризующие диапазон разброса амплитуд, диапазон разброса ускорений и других важных показателей, дающих в конечном итоге возможность наиболее правильно выбрать параметры транспортной машины.

Начальной операцией статистического исследования дорог является снятие их микропрофиля. Одной из задач иссле-

дования динамики автопоезда в составе тягача МАЗ-501 и полуприцепа МАЗ-845, проведенного Ленинградской лесотехнической академией, являлось определение статистических характеристик основных типов автомобильных дорог.

Общая характеристика опытных участков дорог (Ленинградская область) показана в нижеприведенной таблице.

№ участка	Количество участков	Тип дорожного покрытия	Ширина проезжей части	Краткая характеристика дорожного покрытия
1,2	2	Бульжное, удовлетворительного качества	5,0	Бульжник диаметром 10—20 см, крепкой породы, поверхность волнистая
3,4	2	Грунтовое, с ямами и буграми	4,0	Грунт, местами перемешан с гравием, поверхность неровная с нарезанной колеей
5,6	2	Гравийное, удовлетворительного качества	4,5	Поверхность в удовлетворительном состоянии с отдельными выбоинами и волнами
7	1	Асфальтобетонное	8,0	Поверхность ровная, вычужности и впадины большой длины (10 ÷ 15 м)
9	1	Бульжное	5,0	Бульжник диаметром 10—15 см, крепкой породы, поверхность достаточно ровная

На указанных опытных участках произведена съемка продольного микропрофиля дороги. Кроме того, построены графики превышений левой колеи над правой для каждого типа дорожного покрытия.

Длины опытных участков  $L$  изменялись от 100 до 1000 м и выбирались исходя из максимального ограничения возможных погрешностей при определении корреляционной функции

$$L \geq \frac{50}{\omega_n}, \quad (3)$$

где  $\omega_n$  — низшая частота процесса.

Полученное  $L$  уточнялось на основе критерия среднеквадратичной ошибки. Шаг нивелирования для различных участков изменялся от 10 до 100 см в зависимости от длины неровностей покрытия. Шаг съемки  $\Delta$  и длина участков  $L$  находились в сравнимых пределах с этими же величинами, принятыми другими исследователями.

Например, участок № 9 имеет длину  $L = 100$  м и шаг съемки  $\Delta = 10$  см, что совпадает с данными исследований, проведенных в НАМИ лабораторией подвески. Съемка микропрофиля осуществлялась нивелиром с одной или нескольких установок в зависимости от длины участка. В качестве примера на рис. 1 приведен образец микропрофиля участка № 9.

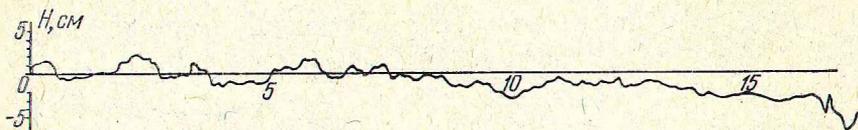


Рис. 1. Микропрофиль участка № 9 (булыжное покрытие)

Обработка результатов съемки произведена электромеханическим коррелятором, осуществляющим автоматизированное вычисление корреляционной функции для процесса  $x(t)$ , согласно формуле

$$R(\tau) = \int_0^T x(t)x(t + \tau)dt, \quad (4)$$

где  $\tau$  — разность значений времени.

При аналитическом подсчете указанный интеграл заменяется выражением

$$R(\tau) = \frac{1}{N+1} \sum_1^{N+1} H_n \cdot H_{n+m}, \quad (5)$$

где  $N$  — число интервалов  $\Delta$ ,  $N = \frac{L}{\Delta}$ ;

$H_{n+m}$  — величина ординаты микропрофиля,  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ ;  
 $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

Сравнение результатов обработки на корреляторе с аналитическим подсчетом для ряда участков указывает на достаточную точность автоматизированной обработки.

На рис. 2 приведена нормированная корреляционная функция  $\rho(\tau)$  для дорожного участка № 7, вычисленная по формуле

$$\rho(\tau) = \frac{R(\tau)}{R(0)}, \quad (6)$$

где  $R(0)$  — корреляционная функция процесса при  $\tau = 0$ , т. е. дисперсия.

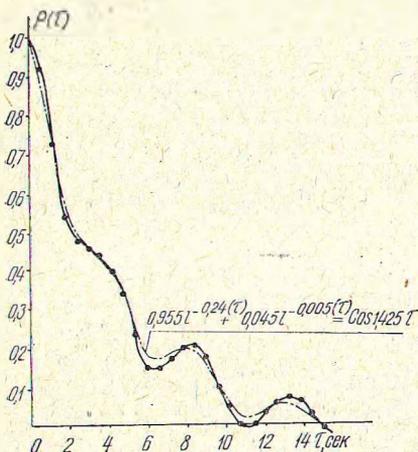
Почти во всех случаях экспериментальные данные для корреляционных функций аппроксимируются выражениями вида

$$\rho(\tau) = A_1 e^{-\alpha_1 |\tau|} + A_2 e^{-\alpha_2 |\tau|} \cdot \cos \beta \tau \quad (7)$$

или

$$\rho(\tau) = e^{-\alpha |\tau|} \cdot \cos \beta \tau. \quad (8)$$

Например, для участка № 7 (см. рис. 2) нормированная корреляционная функция удовлетворяет выражению



$$\rho(\tau) = 0,955 e^{-0,240|\tau|} + 0,045 e^{-0,005|\tau|} \cdot \cos 1,425 \tau. \quad (9)$$

Конечной целью статистического исследования микропрофиля является определение спектральной плотности воздействия  $\Phi(\omega)$ .

В случае, соответствующем формуле (8), она определяется из выражения

$$\Phi(\omega) = \frac{\alpha}{\pi} \times \frac{\omega^2 + \alpha^2 + \beta^2}{(\omega^2 + \alpha^2 - \beta^2)^2 - 4\alpha^2 \cdot \beta^2}, \quad (10)$$

где  $\omega$  — круговая частота, 1/сек.

Рис. 2. Нормированная корреляционная функция воздействия для участка № 7 (покрытие асфальтобетонное)

Уравнение (10) получено из выражения корреляционной функции с помощью косинус-преобразования Фурье.

Для любой скорости движения  $v \neq 1$  м/сек в выражение (10) следует подставить новые значения коэффициентов  $\alpha_1$  и  $\beta_1$ , которые находятся по формулам:

$$\alpha_1 = \alpha \cdot v;$$

$$\beta_1 = \beta \cdot v.$$

Результаты анализа различных участков показывают, что дороги со сравнительно ровной поверхностью и длинными неровностями (например, асфальтобетонное шоссе) имеют наиболее пологий характер протекания кривых корреляционных функций, а следовательно, и низкочастотный состав спек-

тра воздействия. Крутое протекание кривых (например, булыжное шоссе) соответствует высокочастотному спектру.

Исследования показали, что наибольшие значения дисперсии  $D_x$  и среднеквадратичного отклонения  $\sigma$  соответствуют грунтовому и булыжному покрытию. Например, для грунта  $D_x = 16-23 \text{ см}^2$ , а  $\sigma = 4-4,45 \text{ см}$ .

На характер протекания корреляционной функции указывает величина коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$ , которые входят в ее выражение. Чем больше коэффициент  $\alpha$ , тем быстрее идет убывание функции. Коэффициент  $\beta$  характеризует периодичность. Это значит, что в случайном процессе, описывающем микропрофиль, имеется элемент периодичности с преобладающей частотой  $\beta$ . Для участка № 9  $\beta = 1,425$ . Спектральная плотность при этой частоте имеет абсолютный или же относительный максимум в зависимости от того, в какую формулу он входит — в (7) или (8).

Анализ графиков превышения одной колеи над другой показывает, что на кузов машины в поперечной плоскости, как и в продольной, действует случайное возмущение. Корреляционные функции поперечных воздействий указывают на то, что воздействие на автомашину в поперечной плоскости является, как правило, соизмеримым с воздействием в продольной плоскости для одного и того же типа дорог, которым, конечно, нельзя пренебрегать.

Вид корреляционной функции графика превышений для участка № 3 дан на рис. 3 (кривая 2). Для сравнения показан вид корреляционной функции этого же участка, но для продольного микропрофиля (кривая 1).

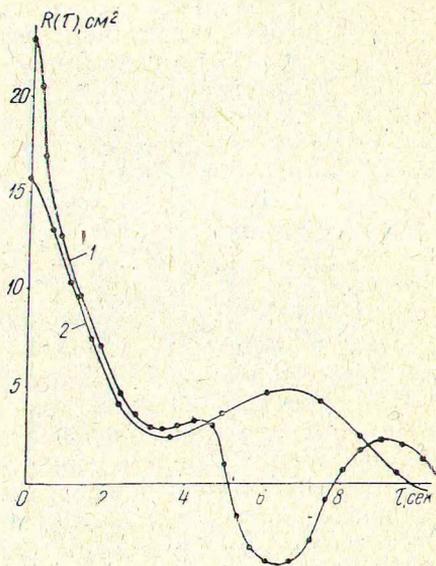


Рис. 3. Корреляционная функция воздействия для участка № 3 (грунт)