

# МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ РИСКОВ

---

---

## МИКРОПРОФИЛИ ДОРОГ И ДИНАМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДВЕСОК ШАССИ ПОЖАРНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

**К.С. Иванов, кандидат технических наук, доцент;  
А.В. Широухов.**  
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

Выявлены аналитические зависимости, описывающие статистические характеристики возмущающих функций лесных и проселочных дорог для решения задач анализа динамических нагрузок, действующих на пожарно-спасательные автомобили.

*Ключевые слова:* динамические нагрузки, виброзащитные системы, характеристики возмущений, возмущающие функции

## MICROPROFILES OF ROADS AND DYNAMIC LOADS SUSPENSION CHASSIS ELEMENTS OF FIRE AND RESCUE VEHICLES

K.S. Ivanov; A.V. Shirouhov. Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

The article revealed the analytical dependences describing the statistical characteristics of the disturbing functions of forest and country roads to solve the problems of analysis of dynamic loads acting on the fire and rescue vehicles.

*Keywords:* dynamic loads, vibration protection systems, characteristics of perturbations, perturbing functions

Основными источниками динамического нагружения пожарно-спасательных автомобилей (ПСА) при их движении по дорогам являются дорожные неровности, воздействующие на колеса базовых машин. При этом интенсивность динамических нагрузок в основном зависит от характеристик микропрофиля дорог, скорости движения, конструкции и динамических свойств (параметров плавности хода) ПСА. При достижении динамическими нагрузками предельных (допустимых) значений могут происходить отказы конструктивных элементов ПСА, а это, в свою очередь, приводит к необходимости в процессе разработки ПСА принимать меры по снижению их динамической нагруженности за счет совершенствования имеющихся или создания дополнительных виброзащитных систем, а также определения допустимых режимов их движения по дорогам.

Характеристики возмущений, действующих на ПСА при их движении по дорогам, в основном определяются размерами неровностей дороги (высотой, длиной) и скоростью движения. Поэтому при анализе и оценке нагрузок, действующих на ПСА, в первую очередь должны анализироваться характеристики микропрофилей дорог, определяемые размерами сравнительно коротких неровностей, так как плавные подъемы и уклоны дорог практически не оказывают динамических воздействий.

Характеристики дорожных возмущений являются основой для анализа колебаний ПСА и действующих на них динамических нагрузок.

Анализ условий движения и скоростных режимов движения ПСА показывает, что интенсивность колебаний ПСА в основном определяется длиной и высотой неровностей. Если на асфальтобетонных шоссе у 90 % неровностей высота не выходит за пределы 13–20 мм, то на булыжных шоссе высота неровностей возрастает до 40 мм. На изношенном щебеночном шоссе высоту менее 40 мм имеет только 50 % неровностей, а высота остальных достигает 60–80 мм и более [1].

Общая зависимость между длиной и высотой неровностей не установлена, но, как правило, с увеличением длины неровности возрастает и ее высота. Это предположение не всегда согласуется с результатами измерения неровностей, но представляет практический интерес, так как водителю при движении тем труднее заметить высокую неровность, чем она длиннее.

Колебания автомобиля зависят от траектории, описываемой осями колес. Эта траектория не всегда совпадает с микропрофилем дороги. Колесо сглаживает, нивелирует, поглощает мелкие дорожные неровности. Происходит это по двум причинам: вследствие значительной величины радиуса колеса по сравнению с размерами неровности, а также из-за упругости и гибкости шины.

Влияние дорожных условий на степень неравномерности движения ПСА определяется динамическими нагрузками и сопротивлением движению, которые заставляют водителя снижать скорость движения автомобиля.

Определенный интерес представляют диапазоны скоростей, в пределах которых наиболее часто происходят разгоны (рис. 1).

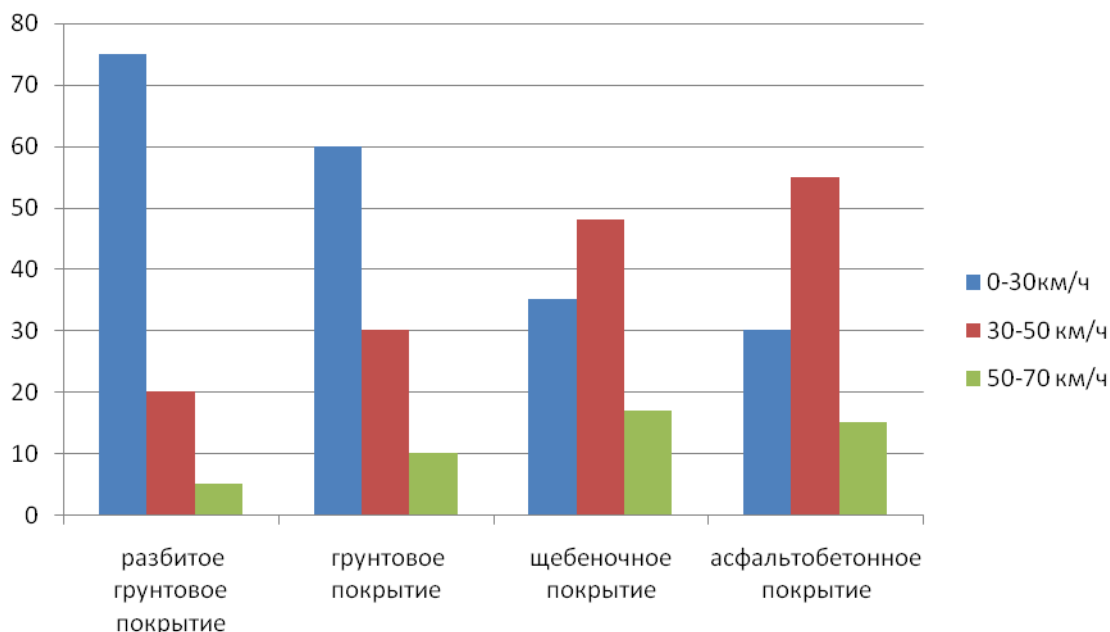


Рис. 1. Статистика распределения скоростного режима

Исследования показывают [2], что максимальные скорости движения на грунтовых дорогах, как правило, не превосходили 30–40 км/ч, хотя по своим тяговым возможностям ПСА могли двигаться с более высокими скоростями. Надо полагать, что скорость 50 км/ч можно считать предельной для движения по грунтовым дорогам при существующих конструкциях ПСА с колесными формулами 4x4 и 6x6. При движении по неровным дорогам скорости ПСА не превосходят 25–30 км/ч, а в некоторых случаях составляют всего 5–8 км/ч, что существенно ограничивает оперативность тушения пожаров в отдаленных

и труднодоступных населенных пунктах. Увеличение скоростей движения ПСА за счет совершенствования их динамических систем может значительно повысить эффективность тушения пожаров.

В связи с этим возникает необходимость создания специальных ПСА, способных двигаться по дорогам с плохим покрытием со средними скоростями до 30–50 км/ч.

Восприятие динамических нагрузок различными конструктивными элементами ПСА, а также человеческим организмом в значительной степени зависит не только от интенсивности динамических нагрузок, но и от частоты колебаний. При этом скорости движения ПСА ограничиваются не только из-за возникновения отказов механических и гидравлических систем, но и физиологическими возможностями водителя. Динамические нагрузки, действующие на водителя и на конструктивные элементы конструкции ПСА, как правило, ограничиваются величинами 2,5g–3,0g [3].

Микропрофиль дорог и дорожные возмущения являются случайными функциями и должны, как правило, исследоваться статистическими методами.

Статистические свойства возмущающих функций дорог достаточно полно могут быть описаны корреляционными функциями  $K(\tau)_q$ , спектральными плотностями  $S(\nu)_q$  и законами распределения ординат микропрофиля дорог (высот неровностей)  $F(q)$ . Эти характеристики дорожных возмущений являются основой для анализа колебаний ПСА и действующих на них динамических нагрузок.

Корреляционная функция  $K(\Delta\ell)_q$  в дискретном виде определяется следующим выражением:

$$K(\Delta\ell)_q = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^{N-n} [q(l_j) - m_q] [q(l_j + \Delta\ell) - m_q],$$

где  $N$  – общее число ординат на рассматриваемой реализации;  $n$  – число ординат на отрезке  $\Delta\ell$ ;  $\ell$  – расстояние.

Обычно корреляционные функции дорог могут быть аппроксимированы зависимостями вида:

$$K(\Delta\ell)_q = \sigma_q^2 \sum_i A_i \ell^{\alpha_{oi}|\Delta\ell|} \text{Cos} \beta_{oi} \Delta\ell, \quad (1)$$

где  $\alpha_{oi}, \beta_{oi}$  – коэффициент корреляционной связи, 1/м;  $A_i$  – эмпирические коэффициенты,  $\sum_i A_i = 1$ .

Характер возмущающего действия дорожных неровностей на ПСА зависит не только от микропрофиля дороги, но также от скорости его движения. Поэтому при исследовании динамики ПСА, движущегося по дороге, интерес представляют вероятностные характеристики не самого микропрофиля, а того случайного процесса, который описывает во времени вертикальные перемещения точки контакта колес агрегата с дорогой. Этот случайный процесс  $q(t)$  называется возмущающей функцией дороги [4].

Вероятностные характеристики возмущающих функций дорог по форме остаются аналогичными вероятностным характеристикам микропрофиля, но изменяются в зависимости от скорости движения. При этом корреляционная функция процесса  $q(t)$  будет иметь вид аналогичной зависимостям (1):

$$K(\tau)_q = \sigma_q^2 \sum_{i=1}^n A_i e^{\alpha_i|\tau|} \text{Cos} \beta_i \tau;$$

$$\alpha_i = \alpha_{oi}V ; \quad \beta_i = \beta_{oi}V , \quad (2)$$

где  $V$  – скорость движения;  $\tau$  – сдвиг по времени;  $\tau = \Delta\ell/V$ .

Весьма важной вероятностной характеристикой возмущающих функций дорог является спектральная плотность  $S(t)$ , которая представляет собой преобразование по Фурье корреляционной функции  $K(\tau)_q$  [5], то есть:

$$S(\nu)_q = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} K(\tau)_q \cos \nu \tau d\tau ,$$

где  $\nu$  – частота.

По физическому смыслу спектральная плотность определяет распределение дисперсии ординат процесса  $\sigma_q^2$  по частотам. При этом:

$$\sigma_q^2 = \int_0^{\infty} S(\nu)_q d\nu .$$

Для корреляционной функции вида (2) спектральная плотность определяется зависимостью [5]:

$$S(\nu)_q = \frac{2\sigma_q^2}{\pi} \sum_{i=1}^f A_i \alpha_i \frac{\nu^2 + \alpha_i^2 + \beta_i^2}{(\nu^2 + \alpha_i^2 + \beta_i^2)^2 - 4\beta_i^2 \nu^2} . \quad (3)$$

Максимумы каждой из составляющих спектральной плотности  $S(\nu)_q$  соответствуют частотам:

$$\nu_* = \sqrt{\alpha_i^2 + \beta_i^2} . \quad (4)$$

Общий вид графиков спектральных плотностей  $S(\nu)_q$  для различных скоростей движения ПСА представлен на рис. 2.

Зависимость (3) с учетом (2) и (4) и рис. 2 показывают, что спектральные функции возмущающих функций дорог с увеличением скорости движения растягиваются вдоль оси частот, а их максимумы уменьшаются и смещаются в сторону больших частот пропорционально скорости. Указанная закономерность позволяет для построения спектральных плотностей возмущающих функций дорог при различных скоростях движения использовать простой графоаналитический метод, заключающийся в следующем.

Пусть имеется исходная спектральная плотность  $S(\nu)_q$ , построенная по зависимостям (2) и (3) для скорости  $\nu_1$ . Тогда для построения спектральной плотности  $S(\nu)_{q2}$  для скорости  $\nu_2$  необходимо любую точку исходной спектральной плотности  $S(\nu)_{q1}$  переместить в точку графика с координатами:

$$S(\nu)_{q2} = S(\nu)_{q1} \frac{V_1}{V_2} ; \quad \nu_2 = \nu_1 \frac{V_2}{V_1} ,$$

где  $\nu_1, \nu_2$  – частоты максимумов спектральных плотностей  $S(\nu)_{q1}$  и  $S(\nu)_{q2}$ .

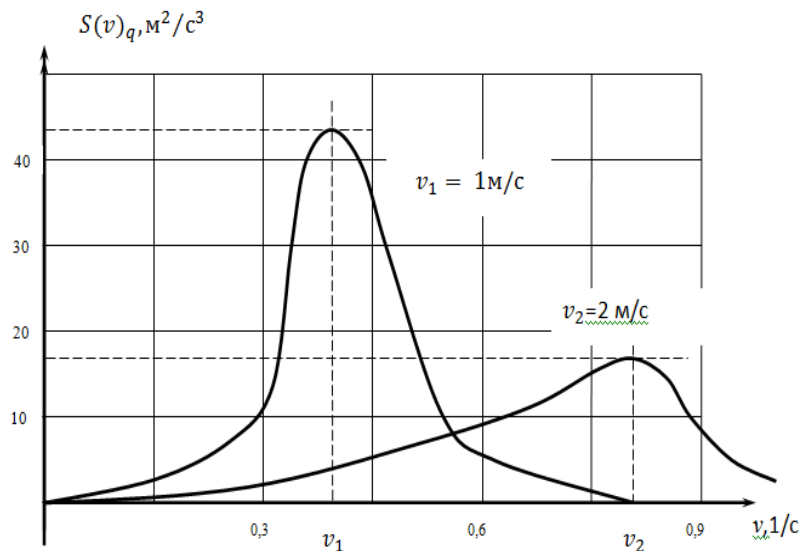


Рис. 2. Спектральные плотности возмущающих функций дороги

При изменении скорости движения дисперсия  $\sigma_q^2$  и математическое ожидание  $M(q)$  остаются неизменными, так как ординаты процесса  $q(t)$  практически не зависят от скорости при постоянном контакте колес с дорогой. Тогда:

$$\int_0^{\infty} S(v)_{q_1} dv = \int_0^{\infty} S(v)_{q_2} dv,$$

то есть площади под графиками спектральных плотностей  $S(v)_{q_1}$  и  $S(v)_{q_2}$  остаются одинаковыми (рис. 2).

Следует подчеркнуть, что основная энергия возмущающих функций дорог при эксплуатационных скоростях движения ПСА приходится на диапазон частот до 200 1/с. При больших частотах дорожные возмущения не оказывают существенного воздействия на колеса автомобилей, что объясняется весьма малыми высотами коротких неровностей и нивелирующей способностью шин.

При движении пожарных автомобилей по дороге на их правые и левые колеса действуют соответственно возмущающие функции  $q(t)_a$  и  $q(t)_y$ , вероятностные характеристики которых аналогичны.

Вертикальная  $q(t)_a$  и угловая  $q(t)_y$ , составляющие возмущающих функций дорог, вызывающие колебания ПСА в поперечной плоскости, определяются зависимостями:

$$q(t)_a = \frac{q(t)_n + q(t)_l}{2}; \quad q(t)_y = \frac{q(t)_n - q(t)_l}{2}.$$

Корреляционные функции этих составляющих  $K(\tau)_{qa}$  и  $K(\tau)_{qy}$ , учитывая, что  $K(\tau)_{qa} = K(\tau)_{qa} = K(\tau)_q$ ;  $K(\tau)_{qy} = K(\tau)_{qy} = K(\tau)_q$ , могут быть записаны в виде:

$$K(\tau)_{q_a} = \frac{1}{4} [2K(\tau)_q + K(\tau)_{q_n q_n} + K(\tau)_{q_l q_l}];$$

$$K(\tau)_{qy} = \frac{1}{4} [2K(\tau)_q - K(\tau)_{q_n q_n} - K(\tau)_{q_n q_n}],$$

где  $K(\tau)_{qa}$ ,  $K(\tau)_{qy}$  – корреляционные функции возмущающих функций дороги правых и левых колес ПСА.

Поскольку функции  $q(t)_a$  и  $q(t)_y$  представляют собой реализации одного и того же стационарного случайного процесса  $q(t)_a$ , то при равенстве нулю его математического ожидания  $m_q$  зависимость для взаимной корреляционной функции  $K(\tau)_{q_n q_n}$  будет иметь вид:

$$K(\tau)_{q_n q_n} = M[q(t)_n q(t - \tau)_n],$$

где  $M$  – знак математического ожидания.

При этом  $K(\tau)_{q_n q_n} = K(-\tau)_{q_n q_n} \cdot K(\tau)_{q_n q_n} = K(-\tau)_{q_n q_n}$ .

Взаимные корреляционные функции  $K(\tau)_{q_n q_n}$  и  $K(\tau)_{q_n q_n}$  по характеру изменения и частотному составу аналогичны корреляционной функции  $K(\tau)_q$ . Максимум взаимной корреляционной функции сдвинут относительно начала координат на величину  $\tau_0$  (рис. 3), которая определяет сдвиг относительно друг друга возмущающих функций дорог, действующих на правые  $q(t)_n$  и левые  $q(t)_n$  колеса ПСА.

Приведенные зависимости являются исходными при анализе поперечных колебаний ПСА при их движении по дорогам.

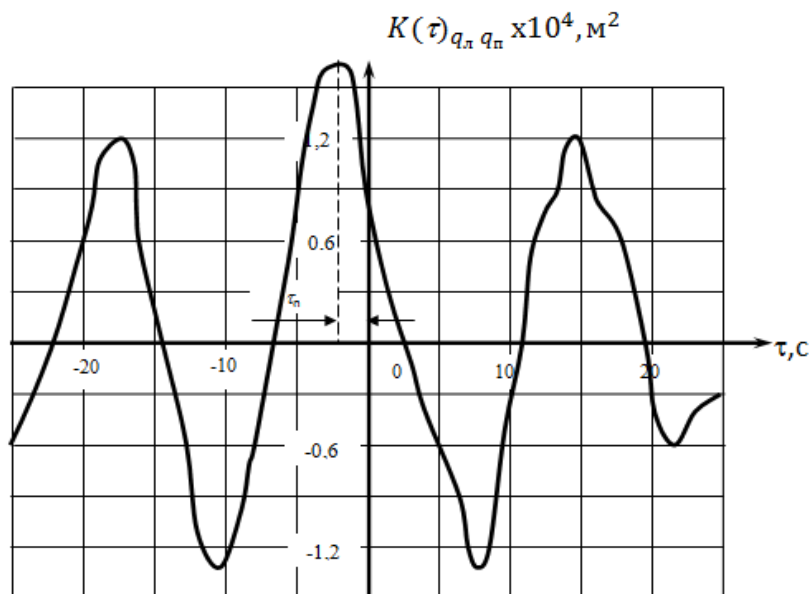


Рис. 3. Взаимная корреляционная функция  $K(\tau)_{q_n q_n}$   
(малоизношенная грунтовая дорога,  $V=1$  м/с)

Следует подчеркнуть, что наличие в случайном процессе многих составляющих с различными основными частотами  $\beta_i$ , ограниченность по продолжительности анализируемых реализаций, ошибки обработки могут приводить к определенному искажению вида взаимных корреляционных функций дорожных возмущений [5]. Однако,

как правило, указанные закономерности в основном сохраняются. В рассматриваемом случае (рис. 2)  $\tau_0 \cong 1 \text{ с}$  при  $V=1 \text{ м/с}$ , что соответствует сдвигу функции  $q(t)_{\text{вп}}$  относительно  $q(t)_{\text{а}}$  на величину около 1 м. Вертикальные составляющие дорожных возмущений  $q(t)_{\text{вп}}$  будут иметь наибольшую интенсивность при  $\tau_0 = 0$ , а угловые составляющие  $q(t)_{\text{уп}}$  – при  $\tau_0 = \frac{\pi}{\beta_1}$ .

В тех случаях, когда коэффициенты корреляционной связи  $\alpha_{oi}$  близки к нулю (спектральные плотности имеют острые максимумы), микропрофили дорог, а, следовательно, и их возмущающие функции могут быть описаны полигармоническими или гармоническими функциями вида [4]:

$$q(t) = \sum_i q_{oi} \text{Sin } \nu_{oi} t$$

или

$$q(x) = q_o \text{Sin } \nu_o t$$

где  $q_o, \nu_o$  – амплитуда и частота гармонического процесса.

$$\nu_o = \frac{2\pi V}{l_0}$$

где  $l_0$  – длина неровностей.

Параметры гармонического процесса дорожных возмущений связаны с его вероятностными характеристиками следующими соотношениями [6]:

$$\nu_o = \sqrt{\alpha_i^2 + \beta_i^2}; \quad q_o = \sigma_q \sqrt{2}$$

Исследования показывают, что колеса пожарных автомобилей вследствие сравнительно большого диаметра, а также упругости и гибкости шин обладают способностью «сглаживать» дорожные неровности. При этом даже при проезде прямоугольной неровности возмущающая функция имеет плавную форму [3].

Максимальные высоты неровностей  $h_{q_{\text{max}}}$ , появление которых на дорогах определяется весьма малой вероятностью  $P_0$ , могут быть определены на основе положений теории выбросов случайных процессов за заданный уровень [5].

Пользуясь тем, что очертания неровности обычно плавные, примем ее профиль синусоидальным относительно средней линии неровности. При этом профиль неровности, представленный на рис. 4, может быть описан зависимостью вида:

$$q = q_o \left( 1 - \text{Cos} 2\pi \frac{x}{s} \right),$$

где  $s$  – длина неровности.

Учитывая, что  $x = Vt$ , получаем:

$$q = q_0 \left( 1 - \cos \frac{2\pi V}{s} t \right) = q_0 (1 - \cos \nu_e t),$$

где обозначено:

$$\nu_e = \frac{2\pi V}{s}.$$

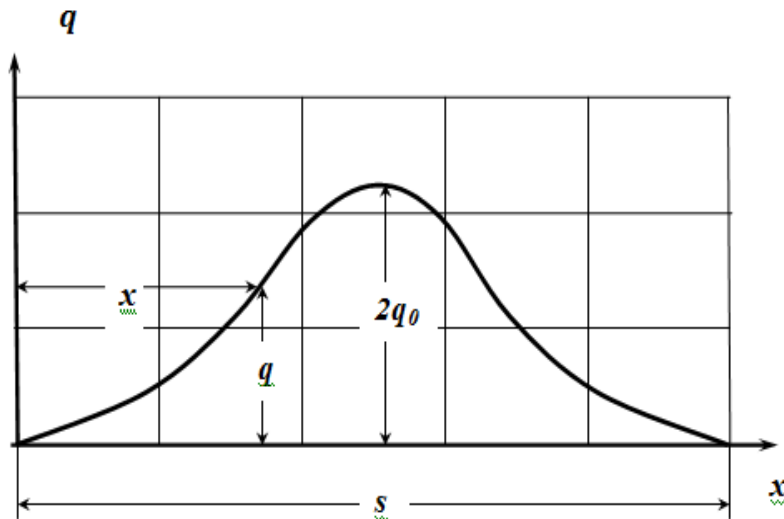


Рис. 4. Неровность синусоидального профиля

При единичных неровностях понятие частоты теряет смысл. Тогда величина  $\nu_e$  может быть связана со временем проезда неровности (продолжительностью действия возмущения):

$$T_e = \frac{2\pi}{\nu_e}.$$

Аналитические зависимости, описывающие статистические характеристики возмущающих функций лесных и проселочных дорог (дисперсий, законов распределения высот дорожных неровностей, спектральных плотностей), являются исходными данными для решения задач анализа динамических нагрузок, действующих на ПСА.

#### Литература

1. Дунаев П.Ф., Леликов О.П. Конструирование узлов и деталей машин. М.: Академия, 2003.
2. Понизовкин А.И. Краткий автомобильный справочник. 10-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1985. 220 с.
3. Ротенберг Р.В. Подвеска автомобиля. М.: Машиностроение, 1972.
4. Статистическое исследование возмущающих функций дорог / Е.В. Грачев [и др.] // Автомобильная промышленность. 1969. № 12.
5. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций. М.: Наука, 1968.



6. Теория колебаний / А.А. Андронов [и др.]. М.: Наука, 1981. 568 с.