

Прогнозирование акустических показателей автомобильных шин. Алгоритм определения акустических показателей шин в стендовых условиях с заданными характеристиками поверхности барабана.

77-30569/236947

10, октябрь 2011

Жеглов Л. Ф.

УДК.629.4.032

МГТУ им. Н.Э. Баумана
tereza@bmstu.ru

Для прогнозирования шума шин, как было доказано [1, 2], наиболее оптимальным следует признать метод стендовых испытаний с использованием бегового барабана. При этом важное значение имеет выбор структуры дорожной поверхности. Известно [3, 4, 5], что как уровень шероховатости, так и ее частотный состав неоднозначно оказывают влияние на уровень шума шин. Изменение длины волны структуры дорожной поверхности дает повышение или снижение акустических показателей шин при увеличении уровня шероховатости. Трансформация качества этой зависимости наблюдается на частоте близкой к частоте 1000 Гц. В связи с этим предлагались для тестирования шин по шумовым характеристикам две или три поверхности разной структуры [6, 7, 8].

Учитывая такие особенности генерирования шума шиной, целесообразно проводить приведение уровней звука, измеренных на трех дорожных поверхностях (I, II, III) к эталонной (виртуальной) дорожной поверхности. Такой подход позволяет учесть как возмущение от рисунка протектора, так и от геометрической структуры дорожной поверхности. Следовательно, беговой барабан стенда должен иметь три контрольные поверхности и измерения проводятся в свободном звуковом поле над отражающей поверхностью [7]. Например, стенда ИПС-1 с беговым барабаном [1]. Рассматривается дальнейшее акустическое поле. Измерительный микрофон устанавливался в продольной плоскости оси колеса на расстоянии 3,1 м от центра беговой дорожки и 0,54 м от дополнительной отражающей поверхности.

В качестве показателя оценки дорожной поверхности используется виброскорость высот ее структуры, т.е. вертикальная скорость перемещения точки, скользящей по продольному профилю дорожной поверхности с горизонтальной скоростью, равной скорости качения автомобильного колеса.

Дорожная поверхность характеризуется спектром $\hat{G}_{vп0}(f_k)$ средних квадратических отклонений виброскорости при принятой пороговой скорости v_{r0} качения колеса (80 км/ч – для шин легковых и 70 км/ч – для шин грузовых автомобилей). Вид спектра виброскорости задается его значением $\hat{G}_{1vп0}$ при частоте 1000 Гц и наклоном участков в дБ/окт. Спектр виброскорости имеет ограничение, которое характеризуется диапазоном в дБ относительно $\hat{G}_{1vп0}$, и наклоном, аналогичным базовым спектрам виброскорости. В таблице, как пример, приведены параметры спектров виброскорости для пороговой скорости 80 км/ч. Принято, что эталонная и III-я контрольная поверхности имеют средние квадратические отклонения высоты шероховатости 3,8 мм и 0,4 мм соответственно [9].

Параметры спектров виброскорости

Дорожная поверхность	$\hat{G}_{1vп0}$, м/с	Наклон участков спектров виброскорости, дБ/окт		Диапазон изменения спектров виброскорости, дБ	
		Диапазон частот, Гц			
		0 - 1000	1000 - 6000	0 - 1000	1000 - 6000
I	0,75	6	0	± 1,5	± 1,5
II	0,45	6	0	± 1,5	± 1,5
III	0,015	6	6	± 1,5	± 1,5
Эталонная	0,6	6	0	0	0

Алгоритм определения оценочных показателей шума шин на основе предложенного способа, основой которого являются принцип энергетического суммирования [10] и метод синхронного усреднения с внешней выборкой на один оборот колеса (барабана) [1], представлен на рис. 1.



Рис. 1. Алгоритм определения уровней шума шины при скорости v_r качения автомобильного колеса

Вычисление акустических показателей шума шин, согласно приведенному алгоритму, осуществляется по следующей методике.

Исходные данные

Временные реализации $p(t)$ звукового давления в точке измерения для каждой скорости заданного диапазона линейной скорости качения автомобильного колеса на трех контрольных дорожных поверхностях.

Временные реализации $s_{\text{ш}}(t)$ сигнала с датчика оборотов шины для каждой скорости заданного диапазона линейной скорости качения автомобильного колеса на трех контрольных дорожных поверхностях.

Временные реализации $s_{\text{б}}(t)$ сигнала с датчика оборотов барабана для каждой скорости заданного диапазона линейной скорости качения автомобильного колеса на трех контрольных дорожных поверхностях.

Временные реализации $q(t)$ высот структуры контрольных дорожных поверхностей при скорости v_{r0} перемещений датчика высот профиля по пройденному пути.

Спектр $\hat{G}_{\text{вп}0}(f_k)$ средних квадратических отклонений виброскорости структуры эталонной дорожной поверхности.

Приведение к эталонной дорожной поверхности

Определение спектральных характеристик исходных акустических сигналов

Вычисляют по временной реализации $p(t)$ оценку односторонней спектральной плотности $\tilde{G}_p(f_k)$ звукового давления, используя метод синхронного усреднения, следующим образом: подавляются в исходной реализации $p(t)$ составляющие с частотами, превышающими верхнюю частоту анализируемого диапазона Δf частот ($\Delta f = 89-5612$ Гц);

преобразованная реализация $\tilde{p}(t)$ делится на m смежных отрезков $\tilde{p}_i(t-iT)$ длиной T каждый, соответствующей времени одного оборота шины при усреднении по шине или одного оборота бегового барабана при усреднении по барабану, где $i = 0, 1, \dots, m-1$.

Деление реализации $\tilde{p}(t)$ осуществляется с использованием вспомогательного сигнала (синхросигнала), которым является сигнал с датчика оборотов шины $s_{\text{ш}}(t)$ при усреднении по шине или с датчика оборотов бегового барабана $s_{\text{б}}(t)$ при усреднении по барабану;

каждый смежный отрезок $\tilde{p}_i(t-iT)$ при дискретном временном параметре представляется N значениями временного ряда $\{\tilde{p}_{in}\}$ ($n = 0, 1, \dots, N-1$);

вычисляются значения усредненного временного ряда $\{\bar{p}_n\}$ как средние арифметические значения компонент временных рядов $\{\tilde{p}_{in}\}$ на всех смежных отрезках (усреднение по линейному закону):

$$\{\bar{p}_n\} = \frac{1}{m} \sum_{i=0}^{m-1} \{\tilde{p}_{in}\};$$

вычисляются для усредненного ряда $\{\bar{p}_n\}$ оценки коэффициентов финитного дискретного преобразования Фурье [11]:

$$\tilde{P}(f_k) = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} \bar{p}_n \exp\left(-\frac{j2\pi kn}{N}\right)$$

где f_k - дискретное значение частоты; $f_k = k/(\Delta t N)$, k - номер коэффициента, $k = 0, 1, \dots, N/2$; Δt - интервал дискретности временного ряда $\{\tilde{p}_{in}\}$; \bar{p}_n - значения усредненного временного ряда $\{\bar{p}_n\}$; j - мнимая единица;

вычисляется оценка односторонней спектральной плотности:

$$\tilde{G}_p(f_k) = \frac{2}{\Delta t N} \left| \tilde{P}(f_k) \right|^2, \quad k = 0, 1, \dots, \frac{N}{2}.$$

Вычисляются по временной реализации $q(t)$ оценки односторонней спектральной плотности $\tilde{G}_{vp}(f_m)$ виброскорости структуры контрольных дорожных поверхностей, используя метод спектрального усреднения, следующим образом:

подавляются в исходной реализации $q(t)$ составляющие с частотами, превышающими верхнюю частоту анализируемого диапазона Δf частот;

преобразованная реализация $\tilde{q}(t)$ разбивается на n_d перекрывающихся отрезков $\tilde{q}_i(t)$ при перекрытии 75 %, где $i = 1, 2, \dots, n_d$;

каждый отрезок $\tilde{q}_i(t)$ при дискретном временном параметре представляется N значениями временного ряда $\{\tilde{q}_{in}\}$ ($n = 0, 1, \dots, N-1$);

вычисляются для каждого отрезка $\{\tilde{q}_{in}\}$ оценки коэффициентов $Q_i(f_k)$ дискретного финитного преобразования Фурье [11]:

$$Q_i(f_k) = \Delta t \sqrt{\frac{8}{3}} \sum_{n=0}^{N-1} \tilde{q}_{in} \left(1 - \cos^2 \frac{\pi n}{N}\right) \exp\left(-\frac{j2\pi kn}{N}\right),$$

где f_k - дискретное значение частоты; $f_k = k/(\Delta t N)$, k - номер коэффициента,

$k = 0, 1, \dots, N/2$; Δt - интервал дискретности временного ряда $\{\tilde{q}_{in}\}$;
 $\left(1 - \cos^2 \frac{\pi n}{N}\right)$ - временное окно Ханна;

вычисляется оценка односторонней спектральной плотности виброперемещений структуры при скорости v_{r0} (усреднение по линейному закону):

$$\tilde{G}_{qn0}(f_k) = \frac{2}{n_d N \Delta t} \sum_{i=1}^{n_d} |Q_i(f_k)|^2, \quad k = 0, 1, \dots, \frac{N}{2};$$

вычисляется оценка односторонней спектральной плотности виброскорости структуры для скорости v_r из заданного диапазона линейной скорости качения автомобильного колеса:

$$\tilde{G}_{vp}(f_m) = (2\pi f_k)^2 \tilde{G}_{qn0}(f_k) \frac{v_r}{v_{r0}}, \quad f_m = \frac{v_r}{v_{r0}} f_k, \quad m = 0, 1, \dots, \frac{N}{2};$$

вычисляется оценка односторонней спектральной плотности виброскорости структуры эталонной дорожной поверхности для линейной скорости качения автомобильного колеса v_{r0} :

$$\tilde{G}_{vp\text{Э}}(f_k) = \frac{\left[\hat{G}_{vp\text{Э}}(f_k)\right]^2}{\Delta f}, \quad k = 0, 1, \dots, \frac{N}{2},$$

где Δf - разрешение по частоте, $\Delta f = 1 / (N \Delta t)$;

вычисляется оценка односторонней спектральной плотности виброскорости структуры эталонной дорожной поверхности для скорости v_r из заданного диапазона линейной скорости автомобильного колеса:

$$\tilde{G}_{vp\text{Э}}(f_m) = \tilde{G}_{vp\text{Э}}(f_k) \frac{v_r}{v_{r0}}, \quad f_m = \frac{v_r}{v_{r0}} f_k; \quad m = 0, 1, \dots, \frac{N}{2}.$$

Приведение результатов измерения звукового давления на контрольных дорожных поверхностях к эталонной дорожной поверхности

Контрольные дорожные поверхности I-я и II-я

Вычисляется составляющая оценки спектральной плотности звукового давления от протектора шины, приведенная к эталонной поверхности:

$$\tilde{G}_{pшэ}(f_k) = \tilde{G}_{pшI}(f_k) - \frac{\tilde{G}_{pшI}(f_k) - \tilde{G}_{pшII}(f_k)}{\tilde{G}_{vшI}(f_k) - \tilde{G}_{vшII}(f_k)} [\tilde{G}_{vшI}(f_k) - \tilde{G}_{vшэ}(f_k)],$$

где $\tilde{G}_{pшI}(f_k)$ и $\tilde{G}_{pшII}(f_k)$ - оценки односторонних спектральных плотностей звукового давления, измеренного соответственно для I-й и II-й поверхности (синхронное усреднение по шине); $\tilde{G}_{vшI}(f_k)$ и $\tilde{G}_{vшII}(f_k)$ - оценки односторонних спектральных плотностей виброскорости структуры I-й и II-й поверхности (спектральное усреднение);

вычисляется составляющая оценки спектральной плотности звукового давления от микроструктуры поверхности, приведенная к эталонной дорожной поверхности:

$$\tilde{G}_{pшэ}(f_k) = \tilde{G}_{pшI}(f_k) - \frac{\tilde{G}_{pшI}(f_k) - \tilde{G}_{pшII}(f_k)}{\tilde{G}_{vшI}(f_k) - \tilde{G}_{vшII}(f_k)} [\tilde{G}_{vшI}(f_k) - \tilde{G}_{vшэ}(f_k)],$$

где $\tilde{G}_{pшI}(f_k)$ и $\tilde{G}_{pшII}(f_k)$ - оценки односторонних спектральных плотностей звукового давления, измеренного соответственно для I-й и II-й поверхности (синхронное ускорение по барабану);

вычисляется оценка спектральной плотности звукового давления, приведенная к эталонной дорожной поверхности:

$$\tilde{G}_{pэ1}(f_k) = \tilde{G}_{pшэ1}(f_k) + \tilde{G}_{pшэ2}(f_k).$$

Контрольная поверхность III-я

Оценкой спектральной плотности $\tilde{G}_{pэ2}(f_k)$ звукового давления, приведенной к эталонной дорожной поверхности, является оценка спектральной плотности $\tilde{G}_{pшIII}(f_k)$ звукового давления, полученная синхронным усреднением по шине для III-й поверхности, т.е. $\tilde{G}_{pэ2}(f_k) = \tilde{G}_{pшIII}(f_k)$ при условии, что уровень звука, вычисленный по $\tilde{G}_{pшIII}(f_k)$ должен быть не менее чем на 10 дБ (А) выше уровня звука, вычисленного по оценке спектральной плотности $\tilde{G}_{pшIII}(f_k)$ звукового давления, полученной синхронным усреднением по барабану.

Определение расчетных уровней звука

Вычисляются по $\tilde{G}_{pэ1}(f_k)$ и $\tilde{G}_{pэ2}(f_k)$ соответствующие спектры дисперсий звукового давления:

$$\bar{G}_{p\varepsilon 1}(f_k) = \tilde{G}_{p\varepsilon 1}(f_k) \times \Delta f \quad \text{и} \quad \bar{G}_{p\varepsilon 2}(f_k) = \tilde{G}_{p\varepsilon 2}(f_k) \times \Delta f ;$$

вычисляется по $\bar{G}_{p\varepsilon 1}(f_k)$ и $\bar{G}_{p\varepsilon 2}(f_k)$ соответствующие третьоктавные спектры дисперсий звукового давления:

$$\bar{G}_{p\varepsilon 1}(f_{T\Box}) = \sum_{f_k=f_{Tн}}^{f_{Tв}} \bar{G}_{p\varepsilon 1}(f_k) \quad , \quad \bar{G}_{p\varepsilon 2}(f_{T\Box}) = \sum_{f_k=f_{Tн}}^{f_{Tв}} \bar{G}_{p\varepsilon 2}(f_k) \quad ,$$

где f_T , $f_{Tн}$, $f_{Tв}$ - соответственно центральная, нижняя и верхняя частоты третьоктавных полос;

вычисляются по $\bar{G}_{p\varepsilon 1}(f_T)$ и $\bar{G}_{p\varepsilon 2}(f_T)$ скорректированные согласно с характеристикой A третьоктавные спектры дисперсий звукового давления:

$$\bar{G}_{p\varepsilon 1}^A(f_T) = \bar{G}_{p\varepsilon 1}(f_T) \times 10^{0,1a} \quad , \quad \bar{G}_{p\varepsilon 2}^A(f_T) = \bar{G}_{p\varepsilon 2}(f_T) \times 10^{0,1a} \quad ,$$

где a - поправка по характеристике A в дБ;

вычисляются по $\bar{G}_{p\varepsilon 1}^A(f_T)$ и $\bar{G}_{p\varepsilon 2}^A(f_T)$ дисперсии звукового давления в заданном диапазоне частот соответственно:

$$D_{p\varepsilon 1}^A = \sum_{f_T=f_n}^{f_b} \bar{G}_{p\varepsilon 1}^A(f_T) \quad , \quad D_{p\varepsilon 2}^A = \sum_{f_T=f_n}^{f_b} \bar{G}_{p\varepsilon 2}^A(f_T) \quad ,$$

где f_n и f_b - нижняя и верхняя частота заданного диапазона частот соответственно;

вычисляются по $D_{p\varepsilon 1}^A$ и $D_{p\varepsilon 2}^A$ уровни шума шины, приведенные к эталонной дорожной поверхности по формулам соответственно:

$$L_{pA1} = 10 \lg \frac{D_{p\varepsilon 1}^A}{\bar{p}_0^2} \quad , \quad L_{pA2} = 10 \lg \frac{D_{p\varepsilon 2}^A}{\bar{p}_0^2} \quad ,$$

где \bar{p}_0 - пороговое среднее квадратическое отклонение звукового давления, $\bar{p}_0 = 2 \times 10^{-5}$ Па.

Вычисленные уровни звука L_{pA1} и L_{pA2} являются исходными данными для определения оценочных показателей шума шин, на основании которых строится прогноз акустического качества изделия.

В качестве оценочных показателей предлагается установить уровень звука L_{r0} (уровень шума) в дБ (А) при пороговой скорости V_{r0} и коэффициент

a_v простой линейной регрессии для интервала Δv скорости качения автомобильного колеса [1, 8]. Тогда по значениям L_{pA1} и L_{pA2} , обозначим их $L_{r1,2}$, и соответствующим им линейным скоростям v_r качения автомобильного колеса определяют уровень звука $L_{r01,2}$ при пороговой скорости v_{r0} и коэффициент $a_{v1,2}$ простой линейной регрессии, уравнение которой имеет вид:

$$L_{r01,2} = \bar{L}_{1,2} - a_{v1,2} \cdot \bar{L}_v,$$

где $\bar{L}_{1,2}$ - среднее значение вычисленных уровней шума $L_{r1,2}$, $\bar{L}_{1,2} = \frac{1}{n} \sum_{r=1}^n L_{r1,2}$; n -

количество измерений, \bar{L}_v - среднее значение уровня скорости, $\bar{L}_v = \frac{1}{n} \sum_{r=1}^n L_{vr}$;

L_{vr} - уровень скорости, $L_{vr} = 20 \lg(v_r / v_{r0})$; индекс "1,2" относится к уровням звука L_{pA1} и L_{pA2} соответственно.

Коэффициент простой линейной регрессии рассчитывается по формуле [12]:

$$a_{v1,2} = \frac{\sum_{r=1}^n (L_{vr} - \bar{L}_v)(L_{r1,2} - \bar{L}_{1,2})}{\sum_{r=1}^n (L_{vr} - \bar{L}_v)^2}$$

Таким образом, представленный методический подход дает возможность для автомобильных шин:

- получать комплексную оценку акустических качеств в лабораторных условиях;
- прогнозировать акустические показатели;
- обеспечивать повторяемость результатов при испытаниях на различном оборудовании;
- снижать технические и акустические требования к характеристикам поверхности барабана (дорожной поверхности).

Список литературы

1. Измерение шума автомобильных шин с использованием стендового оборудования ГУП НИИШПа/ Л.Ф.Жеглов, В.А.Сухоруков, В.С.Калинковский, В.А.Щередин. Научно-практическая конференция "Автотранспортный комплекс и экологическая безопасность". Сборник докладов. М.: Прима-Пресс-М, 1999. С.232-233.
2. Tire Noise: Problems, Methods and Results of Tests/ T.V.Ivanova, Yu.B.Galevko, E.N.Nikulnikov, L.F.Zheglov, S.G.Makarov, V.A.Sukhorucov. Fourth International Congress on Sound and Vibration. St.Peterburg. 1996. P. 2021-2024.
3. Sandberg U. Tire/Road Noise – Studies of the Mechanisms of Noise Generation, Methods of Measurement and Road Surface Characterization. Dissertation. No.166. Linkoping University.Linkoping. Sweden. 1987. 162p.
4. Поспелов П.И. Исследование транспортного шума и акустики, оценка методов борьбы с ним при проектировании автомобильных дорог. М.: МАДИ. 1980. С.62.
5. ECE: Test Results of Tire/Road Noise in Japan// TRANS/SC1/WP.29/GBR/R.107. 1990. 24 p.
6. Draft Regulation: Tire/Road Noise Emission // TRANS/SC1/WP.29/GBR/R.100. 1990. 61 p.
7. Methods foe Determination of Car Tire Noise in Project of Russian Standard/ L.F.Zheglov, V.A.Sukhorucov, Yu.B.Galevko, T.V.Ivanova, E.N.Nikulnikov. Proceedings of the International EAA/EEAA Symposium "TRANSPORT NOISE AND VIBRATION". Tallinn. 1998. P.141-144.
8. Standardization Method of Car Tire Noise/ L.F.Zheglov, V.A.Sukhorucov, Yu.B.Galevko, T.V.Ivanova, E.N.Nikulnikov. 27 the GRB. Informal document No.6. 1997. 7 p.
9. Жеглов Л.Ф. Обеспечение экологических характеристик автомобильных шин за счет снижения уровня звукового. Международный симпозиум

«Образование через науку». Сборник докладов. М.: МГТУ, 2006. С.165-171.

10. Жеглов Л.Ф., Комкин А.И., Сухоруков В.А. Стенд как средство оценки шума автомобильных шин// Автомобильная промышленность №1. М.: Машиностроение, 1997. С. 29-32.
11. Дж.Бендат, А.Пирсол. Прикладной анализ случайных данных: Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 544 с.
12. Фёрстер Э., Рёнц Б. Методы корреляционного и регрессионного анализа: Пер. с нем. М.: Финансы и статистика, 1983. 304 с.

Predicting tire acoustics performance. Algorithm for determining test-bench tire acoustic performance with specified surface of the roller

77-30569/236947

10, October 2011

Jeglov L.F.

Bauman Moscow State Technical University
tereza@bmstu.ru

The article covers treadmill bench tests of tire acoustics experimental prediction. The roller has three physical models of road surface with different levels of roughness. The authors give reference surface parameters and the roller reference surface. They also give recommendations on the choice of roller coating parameters and consider the structure of tire noise evaluation in test-bench conditions. The article tells about a method of reduction of control surface measurement results to a standard (virtual) surface. They describe computational procedures for determining the approximating dependence parameters for predicting tire noise level.

Publications with keywords: [tire noise](#), [drum surface](#), [pilot surface](#), [reference surface](#), [linear regression](#)

Publications with words: [tire noise](#), [drum surface](#), [pilot surface](#), [reference surface](#), [linear regression](#)

Reference

1. L.F.Zheglov, V.A.Sukhorukov, V.S.Kalinkovskii, V.A.Shcheredin, in: Proc. of The Scientifically-practical conference "The Motor transportation complex and ecological safety", Moscow, Prima-Press-M, 1999, pp. 232-233.
2. T.V.Ivanova, Yu.B.Galevko, E.N.Nikulnikov, L.F.Zheglov, S.G.Makarov, V.A.Sukhorucov, Tire Noise: Problems, Methods and Results of Tests, in: Proc. of The Fourth International Congress on Sound and Vibration, St.Peterburg, 1996, pp. 2021-2024.
3. Sandberg U., Tire/Road Noise – Studies of the Mechanisms of Noise Generation, Methods of Measurement and Road Surface Characterization, Dissertation, No.166, Linkoping University, Linkoping, Sweden, 1987, 162 p.
4. Pospelov P.I., Moscow, MADI, 1980, 62 p.

5. L.F.Zheglov, V.A.Sukhorucov, Yu.B.Galevko, T.V.Ivanova, E.N.Nikulnikov, in: Proceedings of the International EAA/EEAA Symposium "TRANSPORT NOISE AND VIBRATION", Tallinn, 1998, pp.141-144.
6. L.F.Zheglov, V.A.Sukhorucov, Yu.B.Galevko, T.V.Ivanova, E.N.Nikulnikov, Standardization Method of Car Tire Noise, in: 27 the GRB, Informal document No.6, 1997,. 7 p.
7. Zheglov L.F., in: Proc. of the International symposium "Education through science", Moscow, MGTU - BMSTU, 2006, pp.165-171.
8. Zheglov L.F., Komkin A.I., Sukhorukov V.A., Avtomobil'naia promyshlennost' 1 (1997) 29-32.
9. Dzh.Bendat, A.Pirsol, Applied analysis of random data, Moscow, Mir, 1989, 544 p.
10. Ferster E., Rents B., Methods of correlation and regression analysis, Moscow, Finansy i statistika, 1983, 304 p.