

Прогнозирование шума автомобильных шин. Методики измерения шума и обработки экспериментальной информации

09, сентябрь 2011

автор: Жеглов Л. Ф.

УДК.629.4.032

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Tereza@bmstu.ru

Шум, генерируемый системой «шина-дорога», зависит главным образом от структуры опорной поверхности и конструктивных параметров шины [1, 2]. Поэтому шероховатость и рисунок протектора при качении колеса рассматриваются в качестве основных факторов, формирующих возмущение на систему. При исследовании такой системы целесообразно разделить возмущение на составляющие и проанализировать влияние каждой компоненты на процесс шумообразования шиной.

Эта задача может быть решена, если использовать метод синхронного усреднения [3, 4]. В общем случае, синхронное усреднение применяется для выделения периодических составляющих исследуемого сигнала, обусловленных работой механизмов циклического действия. Это достигается усреднением реализации сигнала синхронно с периодом цикла. В таком случае составляющие сигнала, не кратные периоду цикла, существенно ослабляются. Так как возмущение от рисунка протектора при равномерном вращении колеса имеет периодический характер, то усреднение реализации синхронно с частотой вращения колеса позволяет выделить составляющую шума шины, инициируемую рисунком протектора.

Если испытания шин проводятся в стендовых условиях на беговых барабанах, то возможно и выделение составляющих шума от воздействия со

стороны барабана при усреднении реализаций синхронно с частотой его вращения. Таким образом, можно проанализировать вклад каждого возмущения в процессе шумообразования системой «шина-дорога». Кроме того, синхронное усреднение дает возможность существенно уменьшить влияние шума помех на результаты измерений, если испытания проводятся в акустически-неподготовленном помещении.

Такой способ обработки был адаптирован при экспериментальных исследованиях шума шин на обкаточных стендах, имеющих стальной барабан с гладкой поверхностью. Для создания возмущения со стороны барабана на его опорной поверхности симметрично закреплялись две цилиндрической формы единичные неровности. Колесо с испытываемой шиной устанавливалось на стенде так, чтобы его плоскость качения совпадала с плоскостью вращения барабана и взаимодействие шины с единичной неровностью осуществлялось по средней линии беговой дорожки. При записи реализации изменения звукового давления параметры нагрузочного режима шины и скорость качения колеса поддерживались постоянными. Измерения и анализ результатов экспериментов проводились с помощью аппаратного комплекса, структура которого показана на рис. 1.

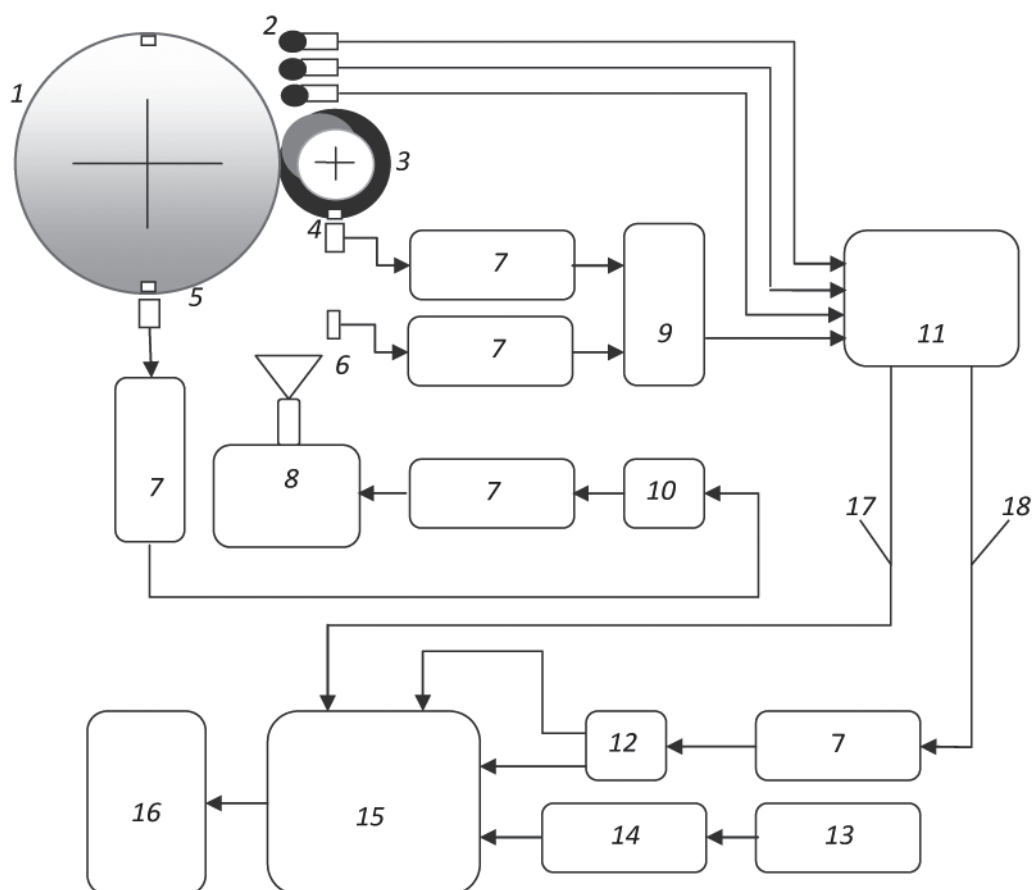


Рис. 1. Блок-схема аппаратного комплекса

Для обеспечения синхронной обработки результатов измерений на боковой поверхности бегового барабана *1* и боковине шины *3* устанавливались магнитные метки. С их помощью, используя электромагнитные датчики *4* и *5*, формировались синхроимпульсы, необходимые для последующей обработки сигналов. Формирование синхроимпульсов осуществлялось следующим образом. Сигнал с датчика *5* через усилитель *7* подается на селектор *10* сигналов по времени и далее через усилитель *7* поступает на вход синхронизации стробоскопа *8*. Регулировкой величины задержки в селекторе *10* сигналов добиваются того, чтобы вспышка лампы стробоскопа совпадала с моментом входа в пятно контакта единичной неровности. Таким образом, начало импульса, поступающего с фотодатчика *6*, однозначно связано с единичным возмущением от барабана. Сигналы с датчиков *4* и *6* через усилители *7* подаются на смеситель-

формирователь 9, представляющий собой диодную цепь с сумматором, на выходе которого имеем последовательность положительных и отрицательных импульсов. При этом положительные импульсы определяют момент входа единичной неровности в пятно контакта, а отрицательные – частоту вращения колеса. Шум генерируемой шиной регистрировался системой микрофонов 2. Средний микрофон устанавливался на уровне центра пятна контакта на расстоянии 0,28 м от боковины шины, два других – на расстоянии 0,15 м от среднего по вертикальной линии. Все микрофоны были направлены под углом 45 град. к плоскости качения колеса и закрыты ветрозащитными колпаками. Сигналы микрофонов и синхроимпульсы со смесителя- преобразователя записывались на измерительный магнитофон 11.

При обработке результатов экспериментов анализируемый сигнал 17 подавался на один из входов анализатора 15 сигналов, с помощью которого проводилось его синхронное усреднение. Усреднение осуществлялось синхронно с частотой вращения колеса или барабана. В первом случае выделялся шум, обусловленный рисунком протектора, во втором – взаимодействием шины с единичной неровностью. Для получения двух режимов синхронного усреднения записанный синхросигнал 18 подавался через усилитель 7 на селектор 12, который в зависимости от требуемого режима усреднения переключался так, что на его выходе появлялись положительные или отрицательные импульсы. Эти импульсы использовались для внешнего запуска анализатора. Кроме того, синхроимпульсы подавались также на второй вход анализатора с тем, чтобы визуально наблюдать временное развитие синхроимпульсов. Это позволяет настроить частоту внешней выборки, обеспечивающую кратность периода синхроимпульсов с длительностью одной выборки. Настройка частоты внешней выборки осуществляется с помощью генератора 13 и умножителя частоты 14. Полученная информация, для дальнейшей обработки, с анализатора передавалась на компьютер, которые были связаны через приборный интерфейс.

Используя рассмотренную методику экспериментальных исследований, были протестированы 20 типов шин легковых автомобилей [4]. В качестве примера на рис. 2 и 3 приведены зависимости шума шин от скорости качения колеса. Анализ полученных данных позволяет при определенных преобразованиях представленных зависимостей проводить их аппроксимацию, используя линейное уравнение регрессии. Причем это наблюдается как по отношению данных по шуму обусловленных рисунком протектора, так и единичной неровностью. Оценка взаимосвязи между шумом, формируемым двумя рассмотренными возмущениями, определялась по коэффициенту корреляции между значениями уровней звукового давления, вычисленных для этих условий. Получено низкое значение 0,23 коэффициента корреляции. С целью оценки статистической значимости коэффициента корреляции осуществлялась проверка нулевой гипотезы. В данном случае было установлено, что гипотезу о нулевой корреляции можно считать справедливой с ошибкой не более 1%. Наряду с этим была определена корреляция между коэффициентами регрессии для тех же возмущений. Получено практически равное нулю (0,07) значение коэффициента корреляции. Таким образом, шумы шины, определяемые рисунком протектора и неровностью барабана, практически не связаны между собой. Этот результат позволяет сделать предположение, что механизмы генерации шума в рассматриваемых случаях возмущения имеют различную природу. Например, вибрация резинокордной оболочки и перекачивание воздуха рисунком протектора.

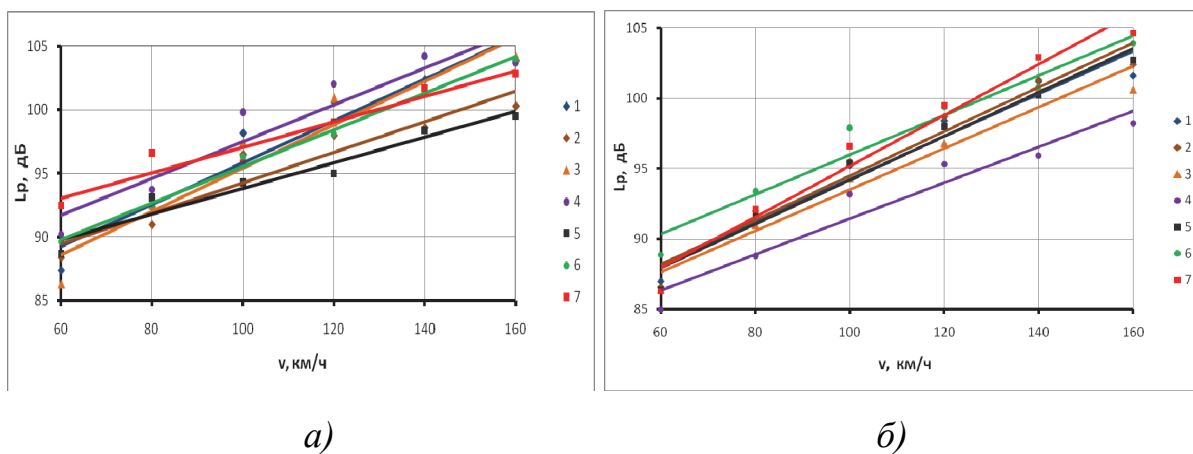


Рис. 2. Зависимости уровня звукового давления от скорости качения колеса при синхронном усреднении по шине *а* и барабану *б* для шин:
 1 - 155/70R13; 2 - 165/70R13; 3 - 175/70R13; 4 - 185/65R15; 5 - 195/60R15;
 6 - 205/70R14; 7 - 215/60R15

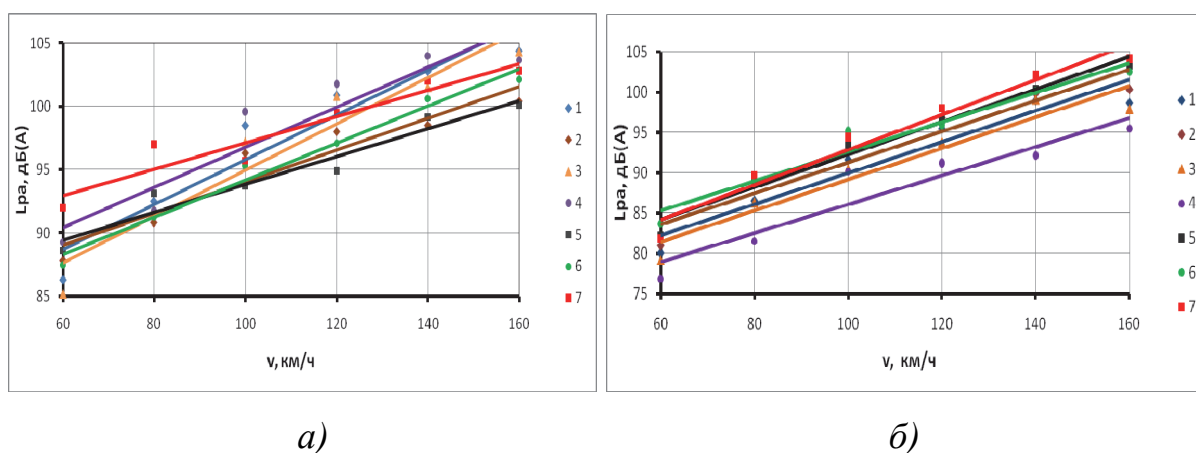


Рис. 3. Зависимости уровня звука от скорости качения колеса при синхронном усреднении по шине *а* и барабану *б* для шин:
 1 - 155/70R13; 2 - 165/70R13; 3 - 175/70R13; 4 - 185/65R15; 5 - 195/60R15;
 6 - 205/70R14; 7 - 215/60R15

Используя рассмотренный подход, для адаптации лабораторного метода испытаний в стендовых условиях были проведены экспериментальные исследования по оценке шума шин тремя методами: трейлер, барабанный стенд, накат. В условиях дорожных и стендовых

испытаний при использовании созданного оборудования обеспечивалось стационарное качение колеса. Измерения шума в этих случаях проводились двумя микрофонами, установленными на входе и выходе пятна контакта шины с опорной поверхностью. Каждый из микрофонов располагался на расстоянии 0,2 м от продольной плоскости симметрии колеса, 0,1 м от дорожной поверхности и 0,2 м от боковины шины. Направленность микрофонов устанавливалась по аналогии с рассмотренными экспериментами. При измерении шума шин методом наката установка микрофонов соответствовала требованиям стандарта [5]. Проводились испытания шин с дорожным (j - 165/80R13) и повышенной проходимости (s - 175/70R13) рисунками протектора.

Процедура обработки измеренных акустических сигналов состояла в определении шумовых характеристик шины при спектральном и синхронном усреднениях. Последний способ обработки используется в основном с целью выделения акустического излучения шиной от рисунка протектора. Таким образом, может быть оценен вклад, вносимый источниками звукового возмущения от рисунка протектора и структуры дорожной поверхности. Аналогичная процедура проводилась также при испытаниях шин на барабанном стенде в заглушенной акустической камере с отражающим полом. На рис. 4 и 5 результаты экспериментальных исследований первыми двумя методами.

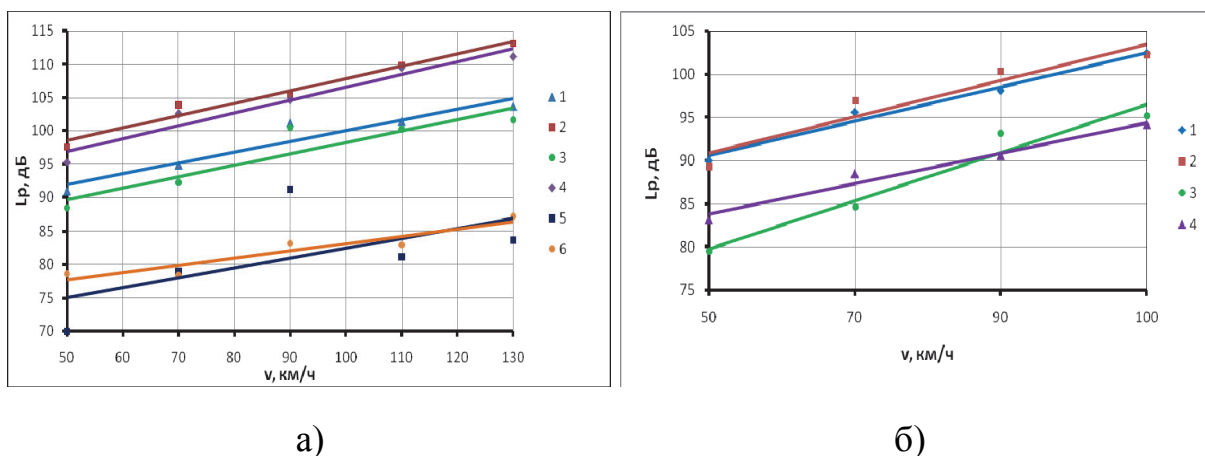


Рис. 4. Зависимости уровня звукового давления от скорости качения колеса при испытаниях шин в стендовых *а* и дорожных *б* условиях:
 1, 3, 5 - шина *ж*; 2, 4, 6 - шина *с*; 1, 2 - спектральное усреднение;
 3, 4 - синхронное усреднение по шине; 5, 6 - синхронное усреднение по барабану

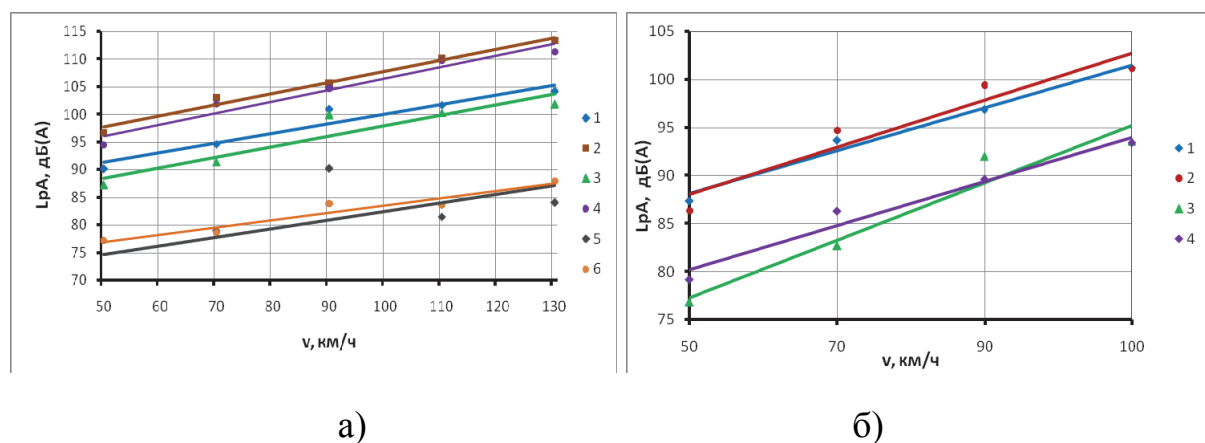


Рис. 5. Зависимости уровня звука от скорости качения колеса при испытаниях шин в стендовых *а* и дорожных *б* условиях:
 1, 3, 5 - шина *ж*; 2, 4, 6 - шина *с*; 1, 2 - спектральное усреднение;
 3, 4 - синхронное усреднение по шине; 5, 6 - синхронное усреднение по барабану

Адекватность используемых процедур измерения шума шин оценивалась методами корреляционного анализа. На рис. 6 приведены

интегральные значения коэффициента корреляции между результатами испытаний представленными методами, определенные различными способами обработки зарегистрированных сигналов.

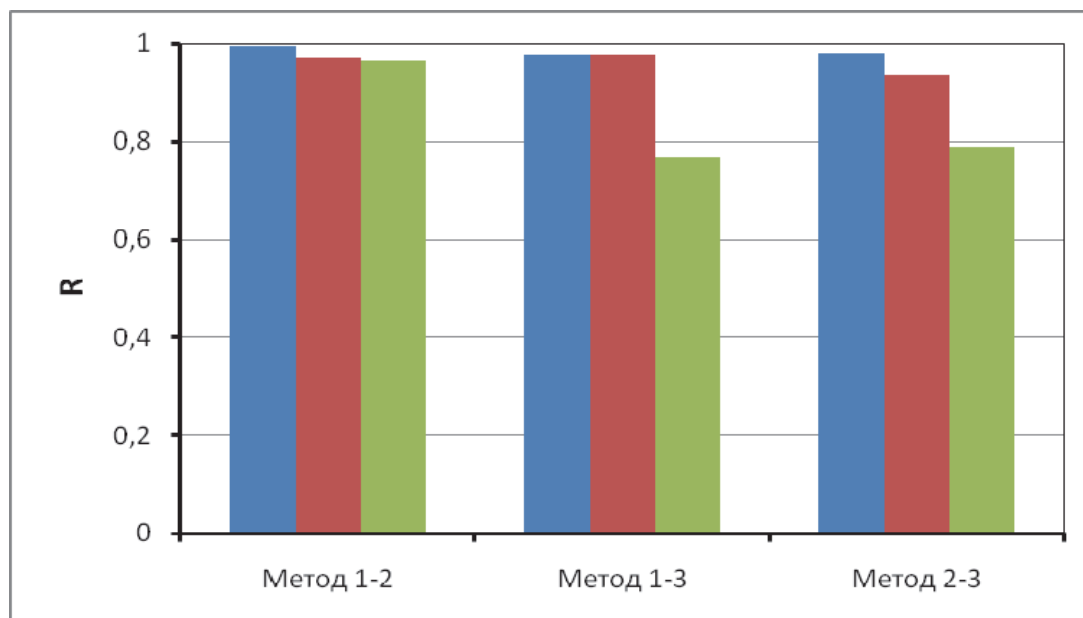
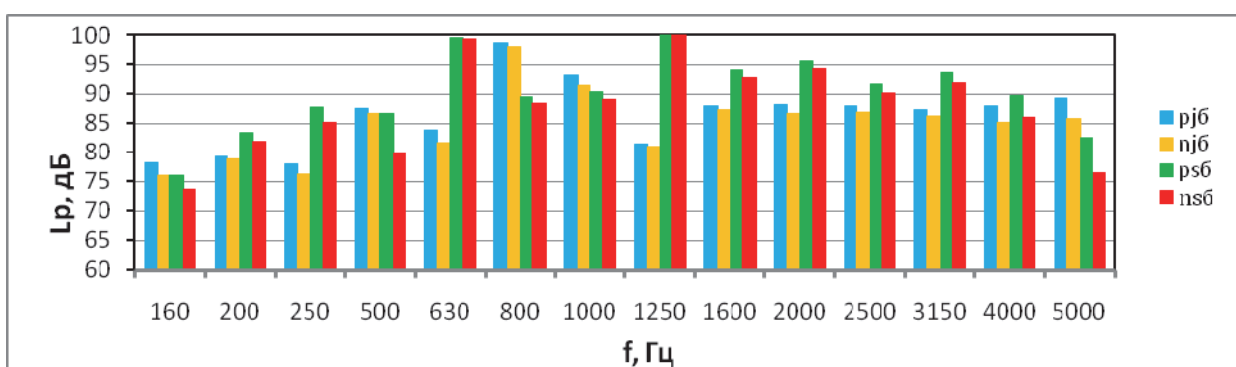


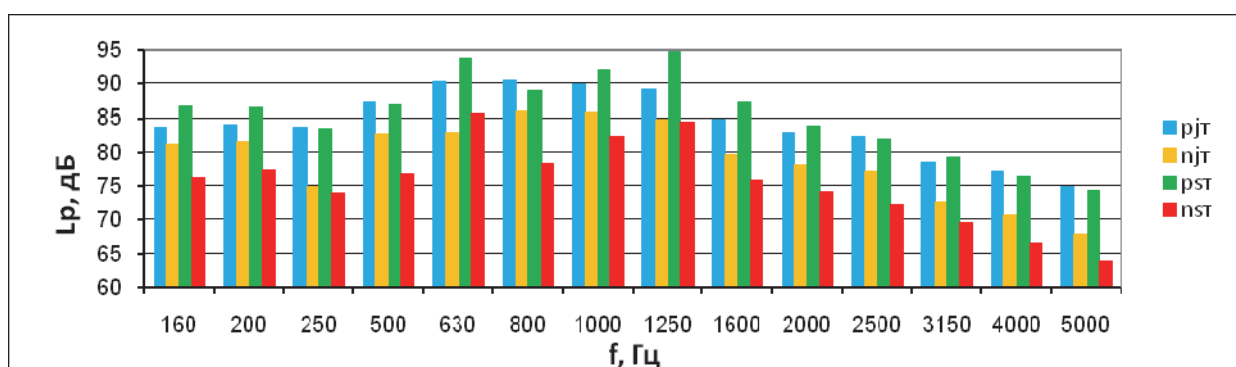
Рис. 6. Коэффициент корреляции между измерениями различными методами:
метод 1 - накат; метод 2 - специальный прицеп (трейлер);
метод 3 - барабанный стенд

Наиболее информативной в данном случае является раздельно-частотная корреляционная характеристика. Для этого исходные узкополосные спектры дисперсий звукового давления были преобразованы в третьоктавные спектры уровней звукового давления (рис.7 а, б). Это позволило частично сгладить флуктуации начальных спектральных оценок. Доверительные интервалы для третьоктавных спектров определялись по соотношению для доверительного интервала спектральной плотности случайного процесса [6]. В этом случае размер выборки принимался равным числу усреднений определяемых характеристик при спектральном и синхронном методах обработки измеренных сигналов. В результате при

уровне значимости 5 % корректировка исходного третьоктавного спектра для нижней и верхней границ доверительного интервала проводится соответственно на $-1,47$ дБ и $+1,78$ дБ. При расчете третьоктавного спектра коэффициента корреляции были объединены третьоктавные спектры звукового давления и звука, полученные при различных скоростях качения колеса. Совокупная частотная зависимость коэффициента корреляции включает все скорости качения колеса и две тестируемые шины (рис. 8 а, б).



а)



б)

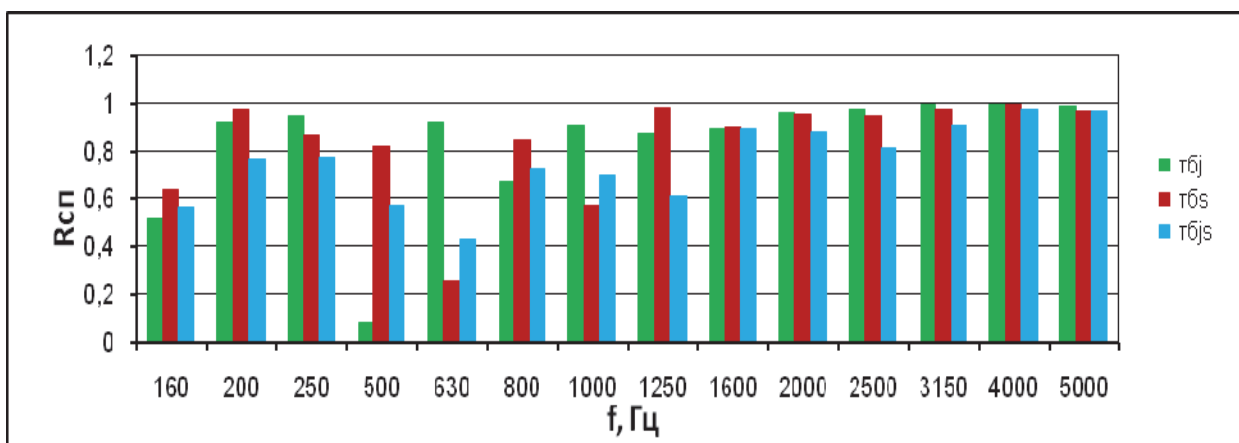
Рис. 7. Третьоктавные спектры уровней звукового давления шин

с дорожным (j) и повышенной проходимости (s)

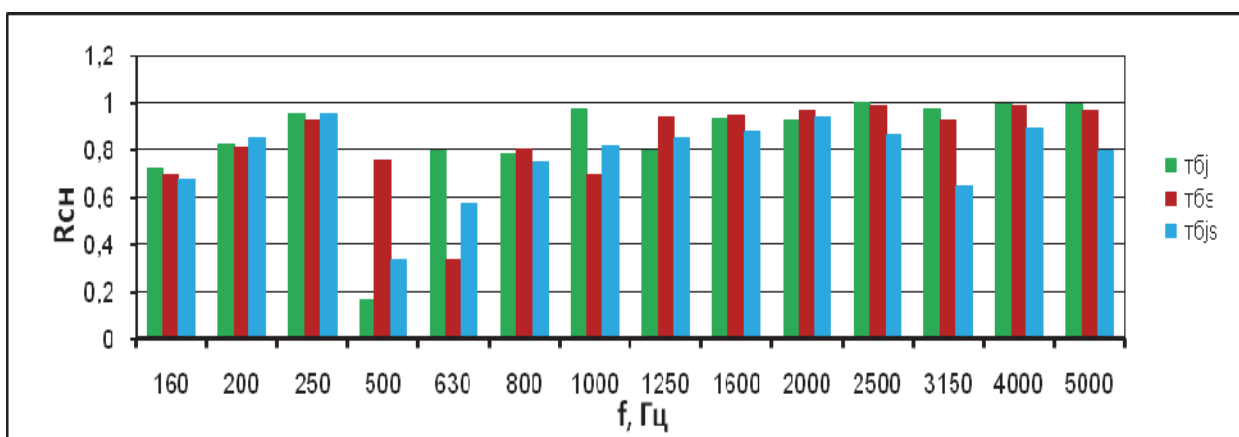
рисунком протектора при скорости качения колеса 90 км/ч:

а и б - стендовые (б) и дорожные (т) условия; рјб, рсб, рјт, рст - спектральное

усреднение; нјб, nsб, нјт, nст - синхронное усреднение по шине



а)



б)

Рис. 8. Третьооктавные спектры коэффициента корреляции:

а – спектральное усреднение; б – синхронное усреднение по шине; тбj и тбс, тбjs - шины j и с для всех скоростей качения колеса, совокупности всех скоростей качения колеса и тестируемых шин

Максимальные отклонения коэффициента корреляции на границах доверительного интервала в рассмотренных случаях могут составлять не более 5 % и 10 % относительно его среднего значения при уровне значимости 5 %. Таким образом, оценка адекватности рассматриваемых методов измерений шума шин, даже при значительном различии в характеристиках опорной поверхности (среднее квадратическое отклонение высот шероховатости безопасного покрытия барабана стенда составляет 0,4 мм, а

испытательной дорожной поверхности - 3,8 мм) показывает возможность замены дорожных испытаний стендовыми. Этот вывод особенно важен для прогнозирования акустических характеристик шины на стадии их разработки [6]. Кроме того, приведенные на рис. 4 и 5 данные подтверждают ранее сделанный вывод о возможности аппроксимации простой линейной регрессией зависимостей уровней звукового давления и звука от скорости качения колеса [4]. Предлагаемое уравнение регрессии для уровня звука L_{vr} при данной скорости v_r из заданного диапазона скоростей качения колеса Δv имеет вид

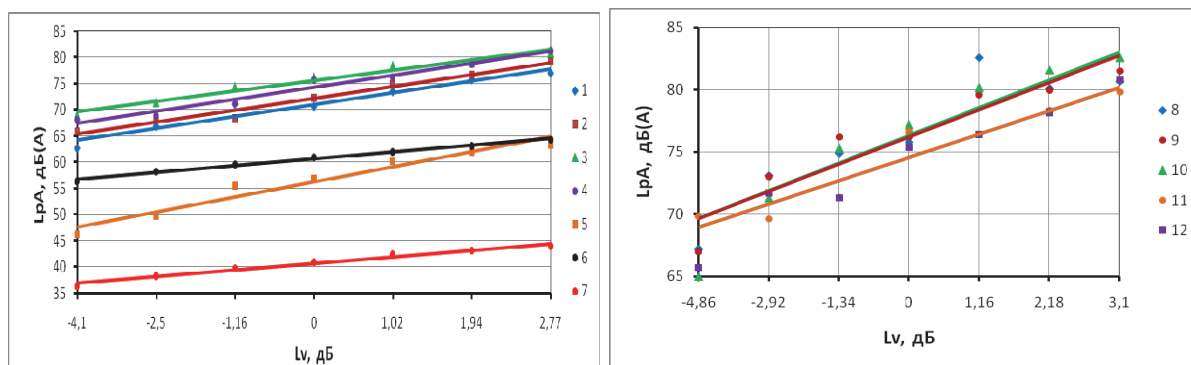
$$L_{vr} = L_{vro} + avLv,$$

где L_{vro} - уровень звука {дБ(А)} при пороговой скорости v_{ro} {км/ч}; av - коэффициент простой линейной регрессии, {дБ(А)/дБ}; L_v - уровень скорости; $L_v = 20 \lg\{v_r/v_{ro}\}$, дБ.

Пороговая скорость v_{ro} имеет значение 80 км/ч и 70 км/ч, правила №117 ЕЭК ООН, для шин легковых и грузовых автомобилей, а интервал Δv принимается 50-110 км/ч и 40-100 км/ч соответственно.

Оценка параметров предлагаемого уравнения регрессии дополнительно осуществлялась при использовании установки, разработанной на основе базовой конструкции стенда ИПС-1 с беговым барабаном. Измерения проводились в дальнем акустическом 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 [5]. Частотный диапазон, в котором проводилось определение акустических показателей шин, имел нижнюю 89 Гц и верхнюю 5612 Гц границы. Обработка экспериментальных данных осуществлялась с использованием модификации метода синхронного усреднения - синхронное усреднение с внешней выборкой на один оборот колеса. Эффект от

использования этого метода проиллюстрирован на рис. 7. При числе усреднений 90, снижение уровня шума помех составило 20 дБ, т.е. обеспечено необходимое соотношение между уровнем основного источника звука (шины) и уровнем постороннего шума (шума помех). Однако в связи с применяемой цифровой обработкой сигнала использование метода синхронного усреднения приводит к ошибкам на высоких частотах, которые технически устранимы. Для шин ошибка от применяемой цифровой обработки сигнала составляет 0,2-0,3 дБ. Так как исходной информацией для определения показателей шума шин являются узкополосные спектры мощности, то следует особое внимание обратить на выбор временного весового окна. Выбор временного весового окна всегда является проблемой. Проведенные исследования показали, что для получения узкополосных спектров мощности шума шин, при спектральной синхронной обработке, необходимо использовать прямоугольное весовое окно. Используя изложенный подход к измерению шума шин, были протестированы 12 комплектов шин различного типоразмера и конструкции, состоящих из двух образцов. Результаты обработки экспериментальных данных приведены на рис. 7 а и в таблице. Проверка линейности регрессии проводилась по статистике F , имеющей F - распределение Фишера [7]. Аналогичные результаты были получены для шин грузовых автомобилей (рис. 7 б).



а)

б)

Рис. 9. Зависимости уровня звука от скорости качения колеса при испытаниях шин на барабанном стенде:

а – шины для легковых автомобилей – 205/70R4; 1, 2, 3, 4 и 5 - с рисунками протектора и гладкая при синхронном усреднении; 6 и 7 - спектральное и синхронное усреднение при оценке шума работающего оборудования;
 б - шины для грузовых автомобилей - 295/80R22,5; 8, 9, 10, 11, 12 - с рисунками протектора при синхронном усреднении

Таблица

Технические и акустические показатели шин с дорожным рисунком протектора

№ шин	Типоразмер шины	Вертикальная нагрузка на шину, кН	Внутреннее давление, МПа	Уровни звука, дБ(А)			$dL'80$	av	$a'v$	$da'v$	rvL	Fp	$Fкр$
				Измеренный, L80	Расчетный, L80	Средний расчетный L'80							
1	205/70R14	5,50	0,2	70,6 / 72,3	71,7 / 72,9	72,3	0,672	2,01/1,93	1,97	0,293	0,973	0,172	3,97
2	205/70R14	5,50	0,2	72,6 / 72,9	70,4 / 71,8	71,1	1,163	2,13/1,77	1,95	0,508	0,924	1,970	4,88
3	205/70R14	5,50	0,2	71,9 / 74,7	72,4 / 73,1	72,7	0,529	1,81/1,91	1,87	0,225	0,982	0,297	3,97
4	205/70R14	5,50	0,2	76,3 / 77,7	76,2 / 77,3	76,8	0,497	1,76/1,94	1,85	0,217	0,983	0,698	3,97
5	205/70R14	5,50	0,2	57,0 / 58,8	57,1 / 58,5	57,8	0,609	2,57/2,34	2,46	0,266	0,986	0,370	3,97
6	185/65R13	4,00	0,19	72,4 / 71,4	72,6 / 72,6	72,6	0,453	1,78/1,69	1,73	0,198	0,984	3,907	4,88
7	185/65R13	4,00	0,20	77,9 / 78,3	76,9 / 76,7	76,8	0,692	2,16/1,52	1,84	0,302	0,968	0,645	3,97
8	205/70R14	5,55	0,21	73,9 / 75,8	74,9 / 74,7	74,8	0,818	2,01/2,11	2,06	0,357	0,964	4,774	4,88
9	205/65R15	5,36	0,21	77,3 / 74,6	76,7 / 74,0	75,3	1,13	1,74/2,27	2,01	0,495	0,931	0,362	3,97
10	195/65R15	4,95	0,21	74,9 / 76,8	77,2 / 76,8	77,0	0,663	1,91/1,46	1,68	0,290	0,965	1,847	4,88
11	215/65R16	6,80	0,24	75,5 / 75,7	75,5 / 75,1	75,3	0,504	1,86/2,03	1,96	0,220	0,984	0,562	3,97
12	225/60R16	6,84	0,24	76,8 / 77,9	76,7 / 77,9	77,3	0,545	1,58/1,64	1,61	0,238	0,973	0,958	3,97

Примечание $Lvr = Lvro + avLv$,

$L'80$ и $a'v$ - уровни звука и коэффициент линейной регрессии, полученные в результате обработки данных по двум образцам шины, $dL'80$ и $da'v$ - доверительные интервалы $L'80$ и $a'v$ при уровне значимости 10 %;. rvL - коэффициент корреляции между скоростью и уровнем звука. Fp и Fkp - расчетные и критические значения статистика F при 5 % уровне значимости. В таблице через косую черту приведены данные для двух образцов шины. Шина № 5 без рисунка протектора (гладкая)

Таким образом, следует констатировать факт, что для оценки шума шин измерения могут проводиться на стенде с беговым барабаном. Представленная методика дает возможности значительно повысить качество и точность измерительных и обрабатывающих процедур. Полученная линейная аппроксимация экспериментальных данных дает возможность совершенствовать алгоритм прогнозирования акустических показателей автомобильных шин.

Список литературы

1. Шум на транспорте/ Пер. с англ. К.Г.Бомштейна. Под ред. В.Е. Тольского, Г.В. Бутакова, Б.Н. Мельникова. - М.: Транспорт, 1995.-368 с.
2. Римонди Дж. Роль шин в создании шумов автомобиля// 2-я Международная конференция АТА "Комфортабельность автомобиля". Болонья. Италия. 1995. С. 957-975. (Перевод ОНТИ АО "АВТОВАЗ",1995. 25 с.)
3. Серебрянников М.Г., Первозванский А.А. Выявление скрытых периодичностей.- М.: Наука, 1965.- 244 с.
4. 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.
5. ГОСТ Р 41.51-99. Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения автотранспортных средств, имеющих не менее четырех

колес, в связи с производимым ими шумом. Введ. 01.07.2000.- М.: Изд-во стандартов, 2000.- 26 с.

6. Дж.Бендат, А.Пирсол. Прикладной анализ случайных данных. - М.: Мир, 1989. – 540 с.
7. Фёрстер Э., Рёнц Б. Методы корреляционного и регрессионного анализа. - М.: Финансы и статистика, 1983.-304 с.