

УДК: 62-144.3

OECD: 2.11

Основные психоакустические характеристики качества звука системы выпуска автомобиля

Чертищев А.Н.^{1*}, Надарейшвили Г.Г.², Юдин С.И.³¹ Заведующий сектором Управления антитоксичных систем и шумоглушения² К.т.н., начальник Управления антитоксичных систем и шумоглушения³ Начальник отдела Управления антитоксичных систем и шумоглушения
^{1,2,3} ФГУП «НАМИ», г. Москва, РФ

Аннотация

В статье рассмотрены основные психоакустические характеристики качества газодинамического звука системы выпуска автомобиля. Описание характеристик и их определение по используемым стандартам. Обозначены специальные психоакустические характеристики системы выпуска в зависимости от оборотов коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания и времени. Рассмотрена взаимосвязь психоакустических характеристик с субъективной оценкой по акустическому восприятию. В качестве примера представлена расчетная регрессионная модель, по субъективной оценке, «спортивного» звучания в зависимости от психоакустических характеристик. Приведен расчет характеристик приятного восприятия звука и психоакустического раздражения. Представлены, в качестве примеров, графики психоакустических параметров систем выпуска в зависимости от оборотов коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания различных автомобилей на режиме разгона.

Ключевые слова: психоакустические характеристики, регрессионный анализ, психоакустическое раздражение, качество звука, система выпуска.

The main psychoacoustic characteristics of the sound quality of the vehicle exhaust system

Chertishchev A.N.^{1}, Nadareishvili G.G.², Yudin S.I.³*¹ *Head of the sector of Antitoxic Systems and Noise Suppression*² *PhD, head of the department of Antitoxic Systems and Noise Suppression*³ *Head of the department of Antitoxic Systems and Noise Suppression*^{1,2,3} *FSUE «NAMI», Moscow, Russia*

Abstract

In the article review the main psychoacoustic characteristics of the quality for the gas-dynamic sound of the vehicle exhaust system. Description of the characteristics and their determination using the standards. Denote the special psychoacoustic characteristics of the exhaust system depending on the crankshaft speed of the internal combustion engine and time. Review the relationship between psychoacoustic characteristics and subjective assessment of acoustic perception. As an example, a computational regression model on the subjective assessment of “sportiveness” sound depending on psychoacoustic characteristics. Provide the calculation of characteristics of pleasant sound perception and psychoacoustic annoyance. As examples, review the graphs of psychoacoustic parameters of exhaust systems depending on the crankshaft speed of the internal combustion engine of various cars in the acceleration mode.

Keywords: *psychoacoustic characteristics, regression analysis, psychoacoustic annoyance, sound quality, exhaust system.*

Введение

Шум от автомобиля становится все более серьезной проблемой. В городской среде важной целью является снижение раздражающего шума. В настоящее время предъявляются требования к снижению уровня шума, но не рассматриваются характеристики качества звука. Поэтому следует обращать внимание на качество звука автомобиля, которому уделяется мало внимания. Одним из направлений по оценке качества звука автомобиля является газодинамический звук системы выпуска. Подходы к оценке качества звука системы выпуска практически не рассматриваются, а психоакустические характеристики мало исследованы. Необходим комплексный подход по определению, выбору и измерению психоакустических характеристик системы выпуска. На этапе проектирования систем выпуска оценка конструкции по качеству звука напрямую зависит от психоакустических характеристик. В связи с этим необходимо рассмотреть вопрос по каким основным психоакустическим характеристикам проводят исследование по качеству газодинамического звука для системы выпуска автомобиля по внешнему шуму.

1. Основные психоакустические характеристики качества звука для системы выпуска

Газодинамический звук системы выпуска автомобиля относится к психоакустическим характеристикам качества звука.

1.1. Громкость звука (*Loudness*)

Громкость звука-субъективное восприятие интенсивности звука и зависит от звукового давления (интенсивности звука) и частоты звуковых колебаний. Единицей абсолютной шкалы громкости является сон (*son*). Громкость в 1 сон - это громкость непрерывного чистого синусоидального тона частотой 1кГц и с уровнем звукового давления 40 дБ. Общее значение громкости по Цвикеру N (в сонах) для системы выпуска в режиме холостого хода двигателя и движения автомобиля с постоянной скоростью [1]:

$$N = \int_0^{24Bark} N' dz \quad (1)$$

где z – *Bark* (Барк) - номер критической частотной полосы по шкале Барка от 0 до $24Bark$. $Bark = 13 \arctan(0,00076f) + 3,5 \arctan((f/7500)^2)$ [2]; $N' dz$ - функция распределения “удельной” громкости N' (*specific loudness [sones/bark]*) по шкале Барка от 0 до $24Bark$; f - частота, Гц.

Громкость для стационарного сигнала звука определяется по ISO 532B [1].

Для системы выпуска в режиме разгона автомобиля также параметром качества газодинамического звука является волатильность изменения громкости в зависимости от оборотов коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания и времени (*Time Varying Loudness vs RPM*). Изменение громкости звука во временном диапазоне в зависимости от оборотов коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания определяется по DIN45631/A1 [3].

1.2. “Резкость” звука (*Sharpness*)

“Резкость” является значением высокочастотного звука. Чем больше высоких частот, тем “резче” звук. Как правило, “резкость” увеличивается за счет добавления высоких частот и уменьшается за счет добавления низких частот. Единица измерения “резкости” асум. “Резкость” в один асум создается одной критической полосой звука с центром в 1кГц, имеющий уровень 60 дБ.

Значение “резкости” звука по Цвикеру для системы выпуска в режиме холостого хода двигателя и движения автомобиля с постоянной скоростью [1]:

$$S = 0,11 \frac{\int_0^{24Bark} N' g(z) z dz}{\int_0^{24Bark} N' dz} acum \quad (2)$$

Значение “взвешанной” функции $g'(z)$ равно единице для критических частотных полос от 0 до 16 Барк и возрастает до значения 4,0 к моменту достижения 24 Барк.

Для системы выпуска в режиме разгона автомобиля параметром газодинамического звука также является волатильность изменения “резкости” звука в зависимости от оборотов коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания и времени (Time Varying Sharpness vs RPM). Изменение “резкости” звука во временном диапазоне определяется по DIN45692 [3].

1.3. “Грубость” звука (*Roughness*)

“Грубость” звука количественно определяет субъективное восприятие амплитудной модуляции звука (с частотой амплитудной модуляции (f_{mod}) от 20 Гц до 300 Гц), эффект которой присутствует в звуке. Модуляция звука – это процесс объединения звукового сигнала, различной формы. Итоговый звуковой сигнал, в самом простом случае, формируется несущей волной и модулирующей волной, изменяющая несущую волну.

Многочастотные тоны, присутствующие в звуке, конструктивно и деструктивно мешают друг другу, вызывая модуляцию. Например, если тон 100 Гц и тон 120 Гц одинаковой амплитуды воспроизводятся в одно и тоже время (т.е. суммируются), они создают амплитудную модуляцию 20 Гц, т.е. 20 модуляций в секунду. Эта частота модуляции основана на разнице в частоте и не зависит от фактических задействованных частот.

Амплитудно-модулированные сигналы, присутствующие в звуке, звучат “грубо” для человеческого уха. Единица измерения “грубости” звука asper. Один asper определяется как “грубость” звука, создаваемая тоном 1000 Гц в 60 дБ со 100% частотой амплитудной модуляции 70 Гц.

Значение “грубости” звука [1]:

$$R \sim f_{mod} \int_0^{24Bark} \Delta L_E(z) dz \quad (3)$$

где L_E – глубина колебаний шаблона временной маскировки, создаваемого модулированным звуком; f_{mod} – частота амплитудной модуляции.

1.4. Степень флуктуации (*Fluctuation strength*)

Степень флуктуации аналогична “грубости” звука, но количественно определяет субъективное восприятие амплитудной модуляции звука с частотой амплитудной модуляции до 20 Гц.

Единица измерения Степени флуктуации *vasil*. Один *vasil* определяется как степень флуктуации, создаваемая тоном 1000 Гц в 60 дБ со 100% частотой амплитудной модуляцией 4 Гц.

Значение Степени флуктуации [1]:

$$F \sim \frac{\Delta L}{(f_{mod}/4Hz) + (4Hz/f_{mod})} \quad (4)$$

где ΔL – глубина колебаний шаблона временной маскировки, создаваемого модулированным звуком; f_{mod} – частота амплитудной модуляции.

1.5. Тональность (*Tonality*)

Звук, который концентрируется в узкой части спектра или содержит высокую долю энергии на одной частоте относится к тональному звуку. Тональность используется для определения состоит ли звук из тональных составляющих. Измеряется относительная сила тонов в сигнале по сравнению с общим сигналом. Единица измерения тональности *tu*. Чистый тон 1кГц на 60 дБ дает тональность 1 *tu*.

Для оценки тональности звука системы выпуска в режиме холостого хода двигателя внутреннего сгорания и движения автомобиля с постоянной скоростью использование меры звука как децибел недостаточно для характеристики тонов. Вместо этого используют метрику “отношение тон/шум” (*Tone-to-Noise Ratio*) для количественной оценки присутствия отчетливо слышимых тонов в звуковом сигнале.

Оценку психоакустического восприятия тональности звука в зависимости от оборотов коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания и времени в режиме разгона автомобиля определяют методом *Tonality (Hearing Model) vs. Time or RPM*. Данный метод отображает зависимости частоты от времени и частоты от времени с максимальной тональностью, а также возможность устанавливать пороговое значение слышимости тона [4].

В качестве примеров на рис.1 представлены графики по психоакустическим параметрам системы выпуска 4-х автомобилей (*Car A, Car B, Car C* и *Car D*) с трехцилиндровым поршневым двигателем внутреннего сгорания в зависимости от оборотов коленчатого вала двигателя в режиме разгона [5].

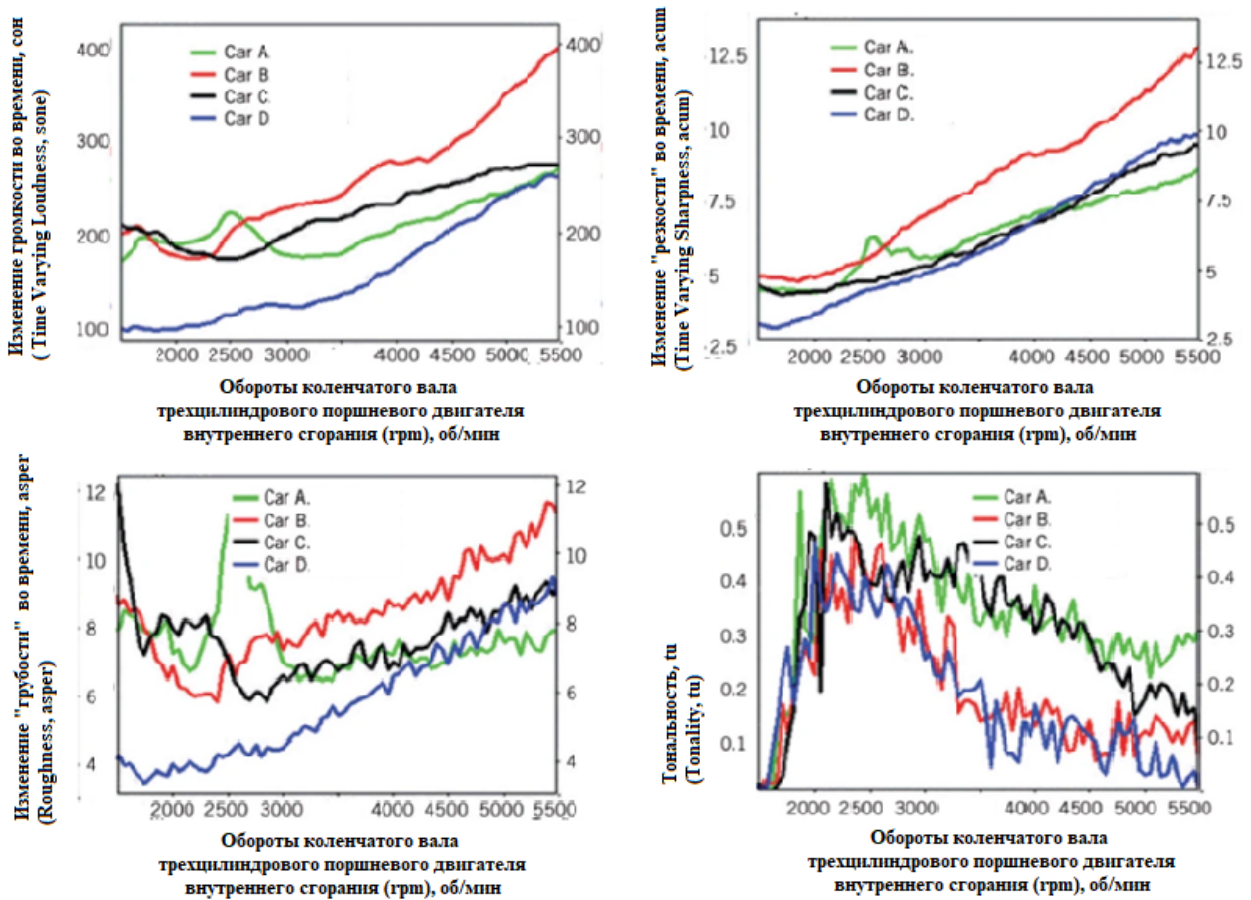


Рис. 1. Психоакустически параметры системы выпуска автомобилей

На графиках автомобили Car A и Car C представлены с одинаковым объемом двигателя и номинальной мощностью. Автомобиль Car B с объемом двигателя как у автомобилей Car A и Car C, но с менее низкой номинальной мощностью. И автомобиль Car C с большим объемом двигателя, чем у автомобилей Car A, Car B, Car C и с номинальной мощностью как у автомобиля Car B. Если сравнивать газодинамический звук системы выпуска автомобилей по громкости, то тихим автомобилем будет Car D.

2. Психоакустическое раздражение и приятное восприятие звука

2.1. Психоакустическое раздражение (*Psychoacoustic annoyance*)

Модель психоакустического раздражения от звука по Цвикеру объединяет несколько психоакустических характеристик в одну характеристику для количественного определения раздражения в тонах (sones) по формуле [1]:

$$PA = L \left(1 + \sqrt{\left(\frac{3(S - 1,75) \log(L + 10)}{4} \right)^2 + \left(\frac{2,18(0,4F + 0,6R)}{L^{0,4}} \right)^2} \right) \quad (5)$$

где L – громкость звука (Loudness); S – “резкость” звука (Sharpness); F – степень флуктуации звука (Fluctuation strength); R – “Грубость” звука (Roughness).

Недостатком данной формулы является то, что не учитывается тональность в психоакустическом раздражении. Необходимо исследование с учетом тональности звука.

2.2. Приятное восприятие звука (*Sensory Pleasantness*)

Приятное восприятие звука - противоположность ощущению “резкости” звука. Оно также зависит от громкости, “грубости”, Степени флуктуации и тональности звука. Взаимосвязь между ними определяется по формуле Цвикера и Фастля [1]:

$$\frac{P}{P_0} = e^{-0,7R/R_0} e^{-1,08S/S_0} (1,24 - e^{-2,43T/T_0}) e^{-(0,023N/N_0)^2} \quad (6)$$

где P_0, N_0, S_0, R_0 и T_0 соответственно приятное восприятие, громкость, “резкость”, “грубость”, Степень флуктуации и тональность эталонного звука. В качестве эталонного звука можно принимать звук аналогов системы выпуска автомобилей.

Психоакустические характеристики качества звука относятся к объективным показателям (метриками) качества звука. Комбинация данных по объективным и субъективным показателям используется для создания модели субъективного восприятия качества звука. Эта модель определяется с использованием методов регрессионного анализа. Например, для автомобилей с дизельным двигателем расчетная регрессионная модель “спортивного” звучания в режиме холостого хода двигателя может иметь вид [6]:

$$\eta_{idle} = -6,29 + 0,1L + 0,67F + 0,93S \quad (7)$$

где L, F и S обозначаются как громкость, степень флуктуации и “резкость” звука соответственно, а η_{idle} субъективная оценка восприятия звука. В зависимости от решения задачи по качеству звука могут включены все характеристики в расчетную регрессионную модель.

Как видно из модели выбор характеристик качества газодинамического звука системы выпуска автомобиля зависит от соотношения между ними.

Заключение

Рассмотренные основные психоакустические характеристики относятся к системе выпуска автомобиля и являются малоизученными. Необходимы исследования данных характеристик по внешнему шуму. Отсутствует общий систематизированный подход, а также методики по оценке качества газодинамического звука системы выпуска. В основном производители используют свои внутренние методики по прогнозированию и разработке качества звука для системы выпуска. Возникает задача в исследовании и разработке методики по оценке и улучшению качества газодинамического звука на стадии проектирования системы выпуска и при ее настройке. Важными параметрами являются целевые значения по каждой характеристике качества газодинамического звука, которые должны быть стандартизированы для различных классов автомобилей. Формирование целевых значений должно быть на взаимосвязи объективных и субъективных оценок, а также на исследовании автомобилей аналогов. Дальнейшим направлением является разработка методики по определению и расчету психоакустических характеристик качества газодинамического звука для системы выпуска автомобиля с использованием средств программного пакета Siemcenter Test.Lab.

Список литературы

1. E.Zwicker, H.Fastl. Psychoacoustics: Facts and Models//Springer.-Munich, Germany, 2007

2. Bark scale. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Bark_scale (дата обращения 02.02.2021).
3. M.Panza. A review of experimental techniques for NVH analysis on a commercial vehicle// Journal Energy Procedia 82(2015)1017-1023.
4. Using the new psychoacoustic tonality analyses//Head acoustics GmbH.-Application Note-07/18. URL: https://cdn.head-acoustics.com/fileadmin/data/global/Application-Notes/SVP/Application-Note-Tonality_Hearing_Model_e.pdf (дата обращения 04.02.2021).
5. N.Driot, N.Michel, V.Goigoux and D.Wiemeler. Tilepape sound quality in a three-cylinder engine// Journal Vehicle Technology-January 2010.
6. J.Garcia, J.Iturbe and J.Planas. Exhaust Noise Design Based on Psycho-Acoustic Parameters//FISITA Word Automotive Congress.-Seoul, Korea, June 12-15, 2020

References

1. E.Zwicker, H.Fastl. Psychoacoustics: Facts and Models//Springer.-Munich, Germany, 2007
2. Bark scale. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Bark_scale (date of the application 02.02.2021).
3. M.Panza. A review of experimental techniques for NVH analysis on a commercial vehicle// Journal Energy Procedia 82(2015)1017-1023.
4. Using the new psychoacoustic tonality analyses//Head acoustics GmbH.-Application Note-07/18. URL: https://cdn.head-acoustics.com/fileadmin/data/global/Application-Notes/SVP/Application-Note-Tonality_Hearing_Model_e.pdf (date of the application 04.02.2021).
5. N.Driot, N.Michel, V.Goigoux and D.Wiemeler. Tilepape sound quality in a three-cylinder engine// Journal Vehicle Technology-January 2010.
6. J.Garcia, J.Iturbe and J.Planas. Exhaust Noise Design Based on Psycho-Acoustic Parameters//FISITA Word Automotive Congress.-Seoul, Korea, June 12-15, 2020