

УДК: 62-144.3

OECD: 2.11

Обзор методов субъективной оценки 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, Россия

Аннотация

В статье рассмотрены основные методы субъективной оценки качества звука системы выпуска автомобиля. Объектом исследования является газодинамический шум выпуска отработавших газов. К наиболее используемым методам субъективной оценки относятся жюри тест, метод наименьших квадратов опорных векторов и нейронные сети. Представлен обзор методов, их преимущества и недостатки, а также анализ целесообразного выбора метода субъективной оценки на стадии проектирования системы выпуска. С помощью методов субъективной оценки осуществляется прогнозирование качества звука, создание звуковых образов и подбор индивидуального звука для систем выпуска автомобиля. Применен регрессионный анализ для получения субъективной оценки по качеству газодинамического шума системы выпуска автомобиля. Направлением дальнейших исследований является применение жюри теста для формирования качества и тембра звука системы выпуска под определенный автомобиль по запросу потребителя.

Ключевые слова: качество звука, субъективная оценка, жюри тест, регрессионный анализ, метод опорных векторов, нейронные сети, система выпуска.

Overview the methods of subjective assessment for sound quality of the vehicle exhaust system

Chertishchev A.N.^{1*}, Nadareishvili G.G.², Yudin S.I.³¹ Head of the sector of Antitoxic Systems and Noise Suppression² PhD, head of the department of Antitoxic Systems and Noise Suppression³ Head of the department of Antitoxic Systems and Noise Suppression^{1,2,3} FSUE «NAMI», Moscow, Russia

Abstract

In article review the main methods for subjective assessment of sound quality of the vehicle exhaust system. The object of the study is the gas-dynamic noise of exhaust gases. The most commonly used subjective assessment methods are jury test, least square support vectors, and neural networks. The overview of the methods, their advantages and disadvantages, as well as an analysis of the reasonable choice of the subjective assessment method at the design stage of the exhaust system are presented. With the help of subjective assessment methods, prediction of sound quality, creation of sound images and selection of the individual sound for the vehicle exhaust systems are realized. Regression analysis is applied to obtain a subjective assessment of the quality for the gas-dynamic noise of the vehicle exhaust system. The direction of further research is the use

of test jury in order to form the quality and timbre of the exhaust system sound for a particular vehicle at the request of the consumer.

Keywords: sound quality, subjective assessment, jury test, regression analysis, support vector machine, neural networks, exhaust system.

Введение

С развитием производства автотранспортных средств в современном мире повышенное внимание уделяется качеству звука системы выпуска автомобиля. Качество звука становится неотъемлемой частью потребительских свойств автомобиля по акустическому комфорту. Поэтому очень важное значение имеет проведение субъективной оценки акустического восприятия звука от системы выпуска. Субъективная оценка качества звука - это использование психологических методов для исследования качества звучания.

Наиболее распространенными и основными методами исследования, по отношению к системе выпуска автомобиля, являются: жюри тест, метод наименьших квадратов опорных векторов и нейронные сети. Объект исследования - шум выпуска отработавших газов, исходящий из выхлопной трубы системы выпуска автомобиля.

1. Методы субъективной оценки

1.1. Жюри тест

Существует большое количество методов для выполнения жюри тестов.

Эти методы для определения восприятием человека могут быть разделены на две группы: абсолютный и относительный методы. Примерами относительных методов являются [1]:

- метод парных сравнений: два различных образа звука прослушиваются членами жюри, и далее они определяют какой из двух образов звука наиболее удовлетворяет критерию оценки.

- оценка величины стимула: первоначально представлен стандартный звук, которому присвоено значение 100 единиц.

Каждый звук сравнивается со стандартными членами жюри, которые оценивают звук относительно стандартного.

Примерами абсолютных методов являются методы:

- семантического дифференциала или полярных профилей: после прослушивания звука, члены жюри оценивают его с помощью списка вопросов, например, тихий <> громкий, мягкий <> грубый ... Абсолютная шкала, такая как -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3. Этот метод применяется, если необходима глобальная оценка.

- категориального шкалирования: этот метод является тем же, что и метод семантического дифференциала, но в этом случае член жюри не должен оценивать звук со списком вопросов, а отвечать только на один вопрос для каждого звука. Это необходимо повторить по всем вопросам. Этот подход предполагает большую работу для членов жюри, но точность оценки улучшается значительно.

Какой из этих методов должен быть предпочтительным, зависит от требуемой точности, необходимой информации и членов жюри.

При субъективной оценке главными показателями являются повторяемость и степень согласованности результатов членов жюри.

Повторяемость или сходимость результатов оценки – это мера вероятности того, что члены жюри будут давать одинаковую оценку паре звуков каждый раз, когда они повторно слушают данные звуки через определенный промежуток времени при одинаковых условиях. Повторяемость определяется в процентах как отношение количества сравнений, оцененных одинаково, к общему количеству сравнений, как показано в уравнении (1) [2]:

$$\text{Повторяемость}(\%) = 100 \times \frac{\text{Количество сравнений, оцененных одинаково}}{\text{Общее количество сравнений}} \quad (1)$$

Степень согласованности оценивает единое мнение членов жюри по восприятию качества звука.

Степень согласованности определяется от 0 до 1 как коэффициент конкордации Кендалла, характеризующий степень согласованности мнений экспертов (в виде рангов) по совокупности критериев. Значения ближе к 1 соответствуют высокой степени согласия между членами жюри.

Коэффициент конкордации Кендалла (W) рассчитывается по формуле [2]:

$$W = \frac{12R}{p^2(n^3 - n)} \quad (2)$$

где R – сумма квадратов разностей рангов (отклонений от среднего); p – число экспертов (членов жюри), шт.; n – число звуковых образов для оценки, шт.

Субъективная оценка связана с объективными показателями (метриками) качества звука.

Комбинация субъективных данных, полученных в жюри тестах и объективных показателей используется для создания модели субъективного восприятия качества звука. Эта модель определяется с использованием методов регрессионного анализа. Одним из способов корреляции между субъективными и объективными показателями является множественный регрессионный анализ. Этот анализ позволяет описать зависимую переменную y как сочетание влияния независимых переменных x_q . Относительно первоначального подхода использован линейный регрессионный анализ, который можно представить следующей формулой:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_qx_q \quad (3)$$

где, a_q называются коэффициентами регрессии, а объективные показатели качества звука x_q образуют количество q независимых переменных, таких, как громкость, “резкость” звука и т.д. Количество этих показателей может быть до 6 (в зависимости от поставленной задачи по анализу качества звука).

Используя множественный регрессионный анализ, можно определить взаимосвязь между всеми объективными показателями и предпочтением жюри.

1.2. Метод наименьших квадратов опорных векторов

Метод наименьших квадратов опорных векторов – это своего рода алгоритм метода опорных векторов в его модификации наименьших квадратов. Он позволяет вместо исходной нелинейной задачи решить эквивалентную в виде системы линейных уравнений, что эффективно снижает вычислительную сложность. По данному алгоритму решается проблема распознавания и классификации звуковых образов с помощью метода квадратичного программирования, а также данный алгоритм используется для регрессионного анализа.

Метод наименьших квадратов опорных векторов содержит обучающий набор с входными данными и соответствующими метками двоичных классов. Обучающий набор точек (x_i, y_i) формируется на основе распределения вероятности $P(x, y)$, который объективно существует. Уравнение линейной регрессии представлено в виде [3]:

$$f(x) = w^T \varphi(x) + b \quad (4)$$

где w^T – нормальный вектор к разделяющей гиперплоскости, $\varphi(x)$ – функция отображения, которая отображает n – размерный входной вектор x по отношению к многомерному признаковому пространству R , b – смещение по оси ординат.

Версия классификатора опорных векторов методом наименьших квадратов получается переформулировкой задачи минимизации как:

$$\min J(w, \xi) = \frac{1}{2} w^T w + \gamma \frac{1}{2} \sum_{i=1}^l \xi_i^2 \quad (5)$$

$$s.t. \quad y_i = w^T \varphi(x_i) + b + \xi_i, \quad i = 1, \dots, l \quad (6)$$

где $J(w, \xi)$ – функция минимизации, $i = 1, 2, \dots, l$, $x_i \in R_n$ – количество входных векторов, l – размерность входных данных, w – “взвешенный” вектор, ξ_i – ошибка, γ – параметр регуляризации, который контролирует ошибки, y_i – ожидаемое значение прогнозируемой суммы.

Данное уравнение решается с помощью метода множителей Лагранжа:

$$L(w, b, \xi, a) = J(w, \xi) - \sum_{i=1}^l a_i [w^T \varphi(x_i) + b + \xi_i - y_i] \quad (7)$$

где $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_l)^T$ – множители Лагранжа.

Уравнение линейной регрессии может быть выражено через ядерную функцию опорных векторов:

$$f(x) = \sum_{i=1}^l a_i K(x, x_i) + b \quad (8)$$

где $f(x)$ – ядерная функция опорных векторов, $K(x, x_i)$ – функция сходства (называемой ядром) между непомеченным входом x и каждым из тренировочных входов x_i , a_i – линейный коэффициент, $i = 1, 2, \dots, l$ – количество тренировочных входов, b – смещение по оси ординат.

Метод наименьших квадратов опорных векторов предназначен для прогнозирования качества звука. Модель прогнозирования создается с помощью пакета прикладных программ MATLAB. Процесс моделирования включает в себя проведение объективной оценки и жюри тестов. Гауссова радиально-базисная ядерная функция наиболее часто используется в модели прогнозирования качества звука и имеет меньшую среднюю относительную ошибку:

$$K(x, x_i) = \exp(-\|x - x_i\|^2 / 2\sigma^2) \quad (9)$$

где σ – параметр ядерной функции, который указывает ширину полосы пропускания для звукового сигнала.

Для проверки модели прогнозирования качества звука используется обучающий набор звуковых образов. Для этого применяется машинное обучение с учителем для прогнозирования качества газодинамического звука системы выпуска. Объективные параметры качества звука используют как входные данные для модели. Определяется взаимосвязь между объективной и субъективной оценками.

1.3. Нейронные сети

Структура искусственной нейронной сети была определена, реализована и оптимизирована с целью прогнозирования воспринимаемого качества звука для нормального слуха человека и слабослышащих людей [4]. Она имитирует работу естественной нейронной сети - человеческого мозга. Искусственная нейронная сеть состоит из множества простых, нелинейных вычислительных элементов, которые работают параллельно и взаимосвязаны. Представляет собой структуру, состоящую из искусственных нейронов (скрытые слои), определенным образом связанных друг с другом и внешней средой с помощью связей, каждая из которых имеет определенный весовой коэффициент (w), на который умножается поступающее через него значение. Каждый нейрон получает через свои соединения ряд входных сигналов x_n (данные входных значений по качеству звука от звукового сигнала) и выдает один выходной сигнал Y (субъективную оценку по качеству звука) (см. рис.1).

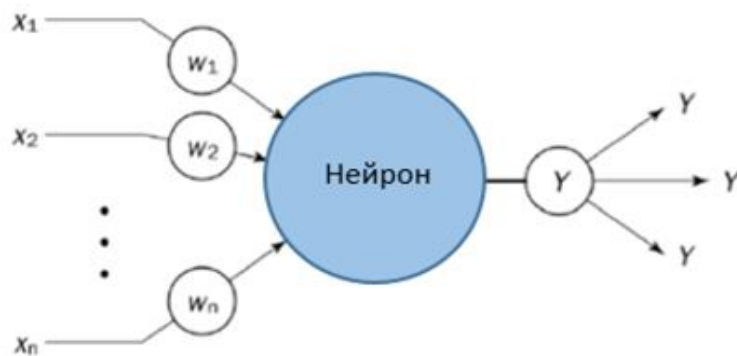


Рис. 1. Нейронная сеть с одним нейроном

$x_{(1,2...n)}$ - входные сигналы; $w_{(1,2...n)}$ - весовые коэффициенты; Y - выходной сигнал

В основном нейронная сеть состоит из трех типов слоев: входного, скрытого (вычислительного) и выходного (см. рис.2). Сеть имеет один входной и один выходной слой, но может иметь несколько скрытых слоев в зависимости от решаемой задачи.

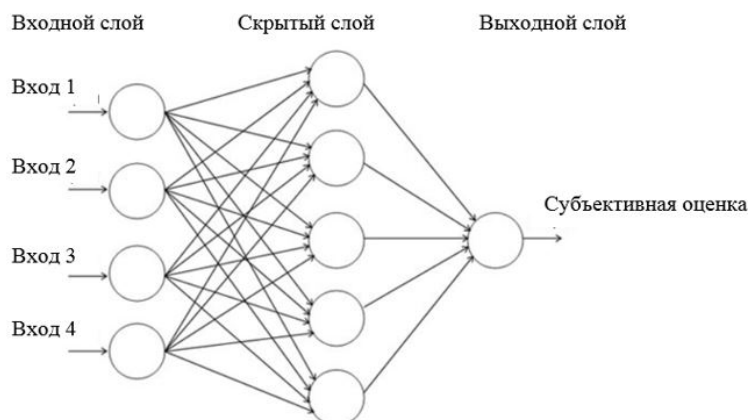


Рис. 2. Многослойная архитектура нейронной сети

Нейронная сеть принимает на входе числовые значения и выдает на выходе также числовые значения. Передаточная функция для каждого элемента сети выбирается таким образом, чтобы ее входной параметр мог принимать произвольные значения, а выходные значения находились в строго ограниченном диапазоне.

В нейронных сетях широко используется метод обратного распространения ошибки. После процесса передачи входных значений в нейронную сеть и получения выходных данных, которые называются прогнозируемым значением вычисляют ошибку. Чтобы вычислить ошибку сравниваются прогнозируемое и фактическое значения с помощью функции потерь. Далее вычисляется производная от значения ошибки по каждому весовому коэффициенту в нейронной сети. Этот процесс повторяется до вычисления градиента каждого весового коэффициента, чтобы уменьшить значение ошибки, тем самым получить минимальные потери.

Искусственные нейронные сети относят к математическим моделям, основанным на машинном обучении, которое заключается в итеративной подстройке весовых коэффициентов сети по некоторому правилу, называемому алгоритмом обучения. Важное значение имеет скорость обучения. Она определяет, как быстро будет обновлено значение весового коэффициента в процессе обратного распространения. Скорость обучения должна быть высокой, но такой, чтобы алгоритм обучения не расходился. При низкой скорости обучения алгоритм обучения будет сходиться медленно. Чтобы не возникло переобучения (проблем работы с новыми данными из-за высокой скорости) используют регуляризацию-понижение сложности модели с сохранением параметров. При этом учитываются потеря и вектор весового коэффициента. Для того, чтобы нейронная сеть могла корректно решать поставленные задачи, требуется провести ее обучение на большом количестве наборов входных данных.

2. Преимущества и недостатки методов субъективной оценки

2.1. Преимущества

1. При сравнении методов субъективной оценки качества звука наибольшую точность, по субъективной оценке, имеют искусственные нейронные сети, имеющие процесс обратного распространения ошибки.

2. Метод наименьших квадратов опорных векторов и нейронные сети могут прогнозировать качество звука на основе обученных моделей без проведения жюри тестов, при этом отсутствует необходимость создавать одинаковые условия для проведения повторных жюри тестов.

3. Жюри тесты являются основной оценкой для создания звуковых образцов, в том числе для субъективной оценки качества звука методом наименьших квадратов опорных векторов и к нейронным сетям. На стадии проектирования систем выпуска автомобиля качество и тембр звука при жюри тестах может формироваться под определенный автомобиль по запросу потребителя.

4. При исследовании качества звука могут быть использованы метод наименьших квадратов опорных векторов и нейронные сети для решения задач регрессионного анализа.

2.2. Недостатки

1. Недостатком метода наименьших квадратов опорных векторов и нейронной сети является трудоемкость и длительность обучения моделей. Необходим большой набор входных данных для создания звуковых образцов по качеству звука.

2. Звуковые образцы для метода наименьших квадратов опорных векторов и нейронных сетей формируются на основании жюри тестов. Необходимо проводить подготовку для проведения жюри тестов.

3. Метод наименьших квадратов опорных векторов и нейронные сети предназначены в основном для проверки изготавливаемых систем выпуска и для вновь проектируемых, но с прогнозированием качества звука по отношению к существующим

наборам звуковых образцов.

4. Для жюри тестов необходимым условием является создание одинаковых условий для проведения испытаний для каждого образца системы выпуска, и в частности, если испытания проводятся в течение длительного времени.

Заключение

До настоящего времени качество шума выпуска отработавших газов автомобиля является наименее изученным. Целесообразным решением для субъективной оценки качества звука при проектировании системы выпуска будет выбор жюри теста. Жюри тест широко используется на стадии разработки системы выпуска для создания индивидуального звукового образа для различных автомобилей. В дальнейших исследованиях предполагается изучение качества звука, по субъективной оценке, системы выпуска с помощью средств программного пакета Siemcenter Test.Lab Jury Testing.

Список литературы

1. L. Dedenev, R. Valgaeren, M. Van Overmeirev and P. Guillaumev. Correlation of subjective perception of exhaust systems with sound quality metrics // Proceeding of SPIE.- January 1998.
2. Kunte D.S. Sound Quality Prediction Using Neural Networks // KTH Royal Institute of Technology School of Industrial Engineering and Management Paper.-Stockholm, Sweden, 2020.
3. C.W. Xiao, Y.S. Wang, L. Shi and H. Guo. Sound Quality Prediction of Vehicle Interior Noise During Acceleration Using Least Square Support Vector Machine // Journal of Applied Sciences 13 (12): 2288-2293, 2013.
4. Nielsen L.B. A Neural Network Model for Prediction of Sound Quality/ The Acoustics Laboratory of Technical University of Denmark.-1993.-Report No.53.

References

1. L. Dedenev, R. Valgaeren, M. Van Overmeirev and P. Guillaumev. Correlation of subjective perception of exhaust systems with sound quality metrics // Proceeding of SPIE.- January 1998.
2. Kunte D.S. Sound Quality Prediction Using Neural Networks // KTH Royal Institute of Technology School of Industrial Engineering and Management Paper.-Stockholm, Sweden, 2020.
3. C.W. Xiao, Y.S. Wang, L. Shi and H. Guo. Sound Quality Prediction of Vehicle Interior Noise During Acceleration Using Least Square Support Vector Machine // Journal of Applied Sciences 13 (12): 2288-2293, 2013.
4. Nielsen L.B. A Neural Network Model for Prediction of Sound Quality/ The Acoustics Laboratory of Technical University of Denmark.-1993.-Report No.53.