

# ОБЗОР АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ АКТИВНОГО ШУМОПОДАВЛЕНИЯ

Янгулов И.П.<sup>1</sup>, Елистратов К.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Янгулов Игорь Петрович - студент, ФГБОУ ВО «Пензенский  
государственный университет»

<sup>2</sup>Елистратов Кирилл Владиславович - студент, ФГБОУ ВО «Пензенский  
государственный университет»  
г. Пенза, Российская Федерация

**Аннотация:** в данной статье приведен сравнительный обзор адаптивных алгоритмов шумоподавления. Рассматривается путь развития систем активного шумоподавления, и их аспекты.

**Ключевые слова:** алгоритмы шумоподавления, активный контроль шума, контроль шума трансмиссии, подавление шумов в автомобиле.

## OVERVIEW OF ADAPTIVE ALGORITHMS FOR ACTIVE NOISE REDUCTION

Yangulov I.P.<sup>1</sup>, Elistratov K.V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Yangulov Igor Petrovich - student, «Penza state University»

<sup>2</sup>Elistratov Kirill Vladislavovich - student, «Penza state University»  
Penza, Russian Federation

**Abstract:** this article provides a comparative overview of adaptive noise reduction algorithms. The ways of development of active noise reduction systems and their aspects are considered.

**Keywords:** noise reduction algorithms, active noise control, transmission noise control, car noise suppression.

УДК 624

Характеристика шума, вибрации и жесткости транспортных средств является одним из наиболее важных факторов при проектировании современных транспортных средств, поскольку она вносит значительный вклад в воспринимаемое качество продукции, удовольствие от вождения и общую удовлетворенность клиентов. За последнее десятилетие перед инженерами



транспортных средств возникли новые проблемы, а именно спрос на более экономичные транспортные средства. Эта проблема побудила производителей стремиться к разработке более легких транспортных средств [1, 2, 3].

К сожалению, легкий вес конструкции часто приводит к большему шуму передается в кабину транспортного средства. Чтобы компенсировать этот нежелательный эффект, инженеры должны усилить применение контроля шума в этих транспортных средствах. Как правило, в салоне транспортного средства используются две категории методов контроля шума, а именно пассивное и активное управление. Методы пассивного управления снижают уровень шума в салоне за счет изменения конструкции автомобиля, таких как добавление массы, настройка жесткости и/или увеличение демпфирования. Эти методы пассивного контроля шума могут нанести ущерб цели более легкого транспортного средства. Кроме того, пассивное управление менее эффективно в нижнем диапазоне частот. В целом, стремление к более легкой конструкции автомобиля ограничивает возможность эффективного применения пассивного контроля шума. Поэтому было разработано альтернативное решение, а именно активное управление шумом (*ANC (active noise control)*), чтобы компенсировать ограничение пассивных подходов. Фундаментальная концепция *ANC* основана на суперпозиции разрушительных звуковых волн, которая уменьшает нежелательный шум, путем наложения внефазного вторичного источника на нежелательное звуковое поле [4, 5, 6, 7].

Хотя концепция *ANC* была предложена в 1930-х годах, она привлекла внимание автомобильной промышленности только в последние несколько десятилетий. Это в основном связано с развитием цифровых сигнальных процессоров, которые сделали технологию *ANC* более осуществимой и доступной для автомобильных приложений. Большинство современных систем *ANC* используют традиционный алгоритм наименьших квадратов с фильтром (*FXLMS*) или его модифицированные версии. Несмотря на свои недавние успехи, алгоритм *FXLMS* страдает от низкой скорости сходимости и большой вычислительной нагрузки. Основной причиной низкой скорости сходимости



является существование вторичного пути, который также известен как электроакустический путь, от управляющего динамика к микрофону ошибки [8].

Для обеспечения сходимости системы входной опорный сигнал обычно фильтруется по расчетной модели вторичного пути, а скорость сходимости составляет пропорционально мощности отфильтрованного входного опорного сигнала. Поэтому быстрая сходимость может быть достигнута только вблизи резонанса динамики вторичного пути.

В последнее время был проведен значительный объем исследовательских работ по повышению производительности алгоритма *FXLMS*. Этот алгоритм был независимо выведен Видроу в контексте адаптивного управления и Берджессом для приложений *ANC* в 1980 году. Алгоритм *Modified-FXLMS (MFXLMS)* был предложен Бао в 1993. Алгоритм *MFXLMS* использует преимущества модификация структуры контроллера таким образом, что метод градиентного спуска ведет себя как стандартный алгоритм *LMS*. Алгоритм *MFXLMS* был дополнительно усовершенствован Оливейрой в 2010 году. Это было сделано путем добавления фильтра нормализации перед контроллером. Этот новый алгоритм известен как алгоритм *NX-LMS*. В алгоритме *NXLMS*, эффект изменения амплитуды вторичного пути сводится на нет, используя фильтр нормализации [9, 10, 11].

В 2008 году, Томас разработал относительно более простую структуру для улучшения сходимости алгоритма *FXLMS*. Этот алгоритм известен как метод выравнивания собственных значений наименьшее среднее квадратическое (*EE-FXLMS*) алгоритм. Общее поведение сходимости значительно улучшается за счет сглаживания отклика на величину оцененного вторичного пути, оставляя при этом фазу неизменной [10, 11].

В 2009 году Дуань предложил алгоритм *FXLMS* в частотно-временной области (*TF FXLMS*), который значительно снижает вычислительные затраты, сохраняя при этом относительно хорошую производительность. Он успешно применил его для управления шумом агрегатов автомобиля. Совсем недавно Ли предложил алгоритм наименьшего среднего квадрата обратной модели (*IMLMS*)



для управления гармоническим шумом. В его алгоритме обратная модель вторичного пути помещается последовательно с фактическим вторичным путем, чтобы противодействовать его эффекту и еще больше улучшить сходимость. Однако одним из ограничений алгоритма *IMLMS* является высокая вычислительная потребность. Поэтому был предложен адаптивный режекторный фильтр с алгоритмом наименьших квадратов обратной модели (*ANF-IMLMS*). По сравнению с обычным адаптивным режекторным фильтром с фильтрованным наименьшим средним квадратом (*ANF-FXLMS*), алгоритм *ANF-IMLMS* может эффективно снизить уровень шума в более широком диапазоне частот. Однако сравнение между алгоритмом *ANF-IMLMS* и другими алгоритмами, которые были упомянуты ранее, остается неизвестным [11, 12, 13].

В общем, шум в салоне автомобиля можно разделить на две категории. Первая категория - шум трансмиссии. Этот шум синхронизируется с вращением двигателя и является шумом, который обычно заметен во время холостого хода автомобиля и во время быстрого ускорения. Хороший контроль этого шума необходим для того, чтобы обеспечить комфорт в салоне автомобиля.

Другая категория шума - это шум, вызванный случайными источниками, такими как неровности дорожного покрытия и турбулентный поток воздуха.

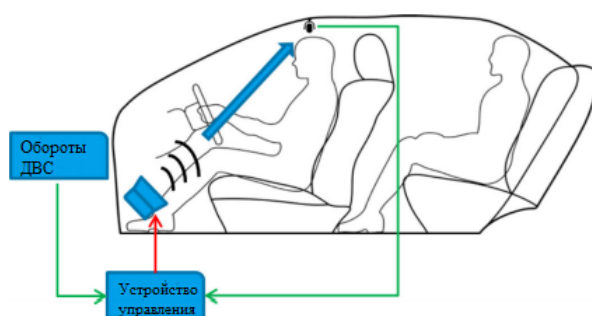


Рисунок 1. Блок-схема системы для подавления шума трансмиссии.

На рисунке 1 показана блок-схема системы *ANC* для шума трансмиссии. В шуме трансмиссии преобладают гармоники частоты вращения двигателя. Доминирующие гармонические компоненты зависят от количества цилиндров и порядка срабатывания цилиндров. Когерентные опорные сигналы могут быть синтезированы с использованием расчетной частоты вращения двигателя,



которая измеряется тахометром. Затем опорные сигналы могут быть созданы генератором гармонических волн, который может быть выражен в виде:

$$x_0(n) = a_i \cos\left(\frac{\omega_i n}{f_s}\right) = a_i \cos(\omega'_i n) \quad (1)$$

$$x_1(n) = a_i \sin\left(\frac{\omega_i n}{f_s}\right) = a_i \sin(\omega'_i n), \quad (2)$$

где  $a_i$  - амплитуда опорного сигнала  $i$ -го порядка,  $n$  - индекс времени,  $\omega_i$  - частота  $i$ -го возмущения, а  $f_s$  - частота дискретизации.  $\omega_i$  обычно является субмножеством или кратным скорости вращения двигателя (т. е.  $\omega_i = 2\pi\nu/60$ ,  $\nu$ -частота вращения двигателя в об/мин (оборот в минуту)), а  $\omega'_i$  - обобщенная частота. Целью системы ANC является минимизация квадрата остаточного шума на целевой частоте.

#### *Список литературы*

1. Allman-Ward, M., Venor, J., Williams, R., Cockrill, M. et al., "The Interactive NVH Simulator as a Practical Engineering Tool," SAE Technical Paper 2003-01-1505, 2003.
2. Wang, X., "Vehicle noise and vibration refinement". 2010: Elsevier ISBN: 1845698045.
3. Yi, L., Tianfei, M., and Weimin, Y., "The summary of study on vehicle NVH performance". Automotive Engineering, 2002. 24(3): p. 177-186.
4. Kuo, S.M. and Morgan, D.R., "Active noise control: a tutorial review". Proceedings of the IEEE, 1999. 87(6): p. 943-973.
5. Kuo, S.M. and Morgan, D., Active noise control systems: algorithms and DSP implementations. 1995: John Wiley & Sons, Inc. ISBN: 0471134244.
6. Elliott, S.J. and Nelson, P.A., "Active noise control". Signal Processing Magazine, IEEE, 1993. 10(4): p. 12-35.
7. Lago, T., "Overview on ANVC Systems and the Future with Smart Embedded Solutions," SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst. 8(3):855- 861, 2015, doi:10.4271/2015-01-2215.
8. Paul, L., "Process of silencing sound oscillations". U.S. Patent US 2,043,416, June 9, 1936.
9. Shoureshi, R. and Knurek, T., "Automotive applications of a hybrid active noise and vibration control". Control Systems, IEEE, 1996. 16(6): p. 72-78.
10. Kinoshita, A. and Aoki, H., "Active noise control system for automotive vehicle". U.S. Patent US 5,245,664, Sep. 14, 1993.
11. Elliott, S., Stothers, I., Nelson, P., et al. "The active control of engine noise inside cars". in INTER-NOISE Congress and Conference Proceedings. 1988. Institute of Noise Control Engineering.



12. Duan, J., Li, M., and Lim, T.C., “A computational-efficient active sound tuning system for steady-state and transient vehicle powertrain response”. *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*, 2014. 10(1): p. 77-92.
13. Widrow, B. and Walach, E., “Adaptive Inverse Control, Reissue Edition: A Signal Processing Approach”. 2008: John Wiley & Sons ISBN: 0470231602.

