

УДК 534.23; 534.4

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СПЕКТРАЛЬНО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА АВТОМОБИЛЯ НА ХОЛОСТОМ ХОДУ

С.Р. ГЕЙСТЕР, А.М. ГЛАДЫШЕВ

НИИ ВС РБ

Калиновского, 4, Минск, 220103, Беларусь

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 3 августа 2009

Впервые рассматриваются результаты экспериментальных исследований спектрально-временных характеристик акустического сигнала автомобиля на холостом ходу. Установлено наличие высокой корреляции акустического сигнала. Рассмотрено влияние повреждения выхлопной трубы на спектрально-временные характеристики акустического сигнала.

Ключевые слова: акустический сигнал, автомобиль, двигатель.

Введение

Ряд актуальных задач, связанных с автоматическим мониторингом передвижения автотранспортных средств (АТрС), можно успешно решать на основе использования акустических сигналов (АС), создаваемых АТрС. Эффективность решения этих задач напрямую зависит от качества функционирования соответствующих акустических устройств и систем мониторинга. В свою очередь, качество функционирования определяется полнотой представлений об источниках полезных сигналов и помехах, а также адекватностью моделей сигналов и помех, используемых при синтезе алгоритмов, реальности.

Известно [1], что основными источниками АС, возникающих при работе АТрС, являются двигатель, включающий систему впуска воздуха и топлива, систему выпуска отработавших газов (систему выпуска) и вентилятор системы охлаждения, а также трансмиссия и шины. Процессы воспламенения смеси в цилиндрах двигателя и, соответственно, выпуски отработавших газов из хвостовой трубы системы выпуска происходят [1] с частотой выхлопов:

$$f_{vh} = 2f_{kv}N_{cl} / I, \quad (1)$$

где N_{cl} — число цилиндров в двигателе; I — число тактов в двигателе; f_{kv} — частота вращения коленчатого вала двигателя.

Несмотря на разнообразие, все источники сигналов в АТрС, как правило, связаны с режимом работы двигателя и имеют в своем спектре сигналы на частотах, кратных частоте f_{kv} . В связи с этим частоту f_{kv} можно считать спектрообразующей или базовой частотой АС АТрС. Основной вклад в АС АТрС вносит двигатель и система выпуска [1,2]. Поэтому в [3] предложена модель АС, которая позволяет характеризовать:

- сигнал рабочего цикла одного цилиндра $p_{cl}(t)$, представляющий собой совокупность импульсов давления, образующихся в процессе цикла работы одного цилиндра;
- сигнал рабочего цикла двигателя $p_{cd}(t)$, представляющий собой пачку импульсов давления, формируемых при работе всех цилиндров двигателя;

– последовательность пачек импульсов рабочего цикла, образующуюся при повторении рабочих циклов двигателя.

При этом сигнал рабочего цикла одного цилиндра $p_{cl}(t)$, сформированного на выходе глушителя, предложено описывать выражением:

$$p_{cl}(t) = \begin{cases} \frac{2P_{D\max}}{T_D}t, 0 \leq t \leq \frac{T_D}{2}; \frac{-2P_{D\max}}{T_D}(t - T_D), \frac{T_D}{2} < t \leq T_D; \frac{-2P_{R\max}}{T_R}(t - T_D), T_D < t \leq \left(T_D + \frac{T_R}{2}\right); \\ \frac{2P_{R\max}}{T_R}(t - T_D - T_R), \left(T_D + \frac{T_R}{2}\right) < t \leq (T_D + T_R); 0, 0 > t, (T_D + T_R) < t \leq T_T^*, \end{cases} \quad (2)$$

где $P_{D\max}$ — максимальное значение давления АС на интервале формирования избыточного давления; $P_{R\max}$ — максимальное (по модулю) значение давления АС на интервале разрежения, имеющее отрицательный знак; T_D (T_R) — длительность положительной (отрицательной) полуволны давления АС цилиндра двигателя по нулевому уровню; $T_T^* = IT_T / N_{cl}$ — временной интервал, где T_T — длительность такта работы одного цилиндра двигателя.

Модель сигнала рабочего цикла одного цилиндра $p_{cl}(t)$ на выходе глушителя имеет следующие ограничения. *Во-первых*, сигналы колебаний, возникающих в глушителе после поступления в него выхлопных газов, представляются лишь первым максимальным сигналом уплотнения и последующим сигналом разрежения. *Во-вторых*, сигналы рабочих циклов, формируемые разными цилиндрами, не пересекаются между собой во времени, то есть имеют ненулевые значения только в пределах своих тактов работы. С учетом этого ограничения АС двигателя в рабочем цикле можно представить в виде:

$$p_{cd}(t) = \begin{cases} \sum_{i=1}^{N_{cl}} p_{cl}(t - (i-1)T_T^*), 0 \leq t \leq IT_T; \\ 0, t < 0, t > IT_T. \end{cases} \quad (3)$$

Характеристика оборудования и условия проведения эксперимента

Записи сигналов АТрС производились при помощи микрофона производства фирмы “Verbatim”, который закреплялся на треноге на высоте около 40 см. Сигнал с микрофона подавался на звуковую карточку Creative Sound Blaster Audigy 2 ZS Notebook. Принятый АС в виде дискретных отсчетов, сформированных с частотой дискретизации 96 кГц и представленных двоичными 24-разрядными числами, записывался на жесткий диск в формате РСМ (без сжатия). Для уменьшения влияния ветра микрофон был обернут в ворсистую плотную ткань.

Эксперимент проводился при следующих условиях: температура воздуха (4—6) °С; относительная влажность воздуха около 100 %; скорость ветра 3 м/с; облачность сплошная и низкая. Схема проведения эксперимента и фотографии места проведения эксперимента с установленным оборудованием представлены на рис. 1.

Обработка записанных АС осуществлялась в среде Matlab и состояла в формировании оценок автокорреляционной функции (АКФ) и энергетического спектра (ЭС).

Оценка АКФ $\mathcal{C}(m)$ для анализируемых временных фрагментов осуществлялась следующим образом. Для выбранного фрагмента временной реализации, включающего $N = 28800$ дискретных отсчетов сигнала давления $p_i, i = \overline{1, N}$, вычислялась последовательность свертки:

$$\mathcal{C}(m) = \frac{1}{C_{\max}} \sum_{i=1}^{N-|m|} p_i p_{i+m}, \quad (4)$$

где $\mathcal{C}(m)$ — дискретный отсчет оценки АКФ для временного сдвига $\tau = T_{dis}m$ при интервале дискретизации АС по времени T_{dis} ; C_{\max} — максимальное значение свертки, равное $C(0)$.

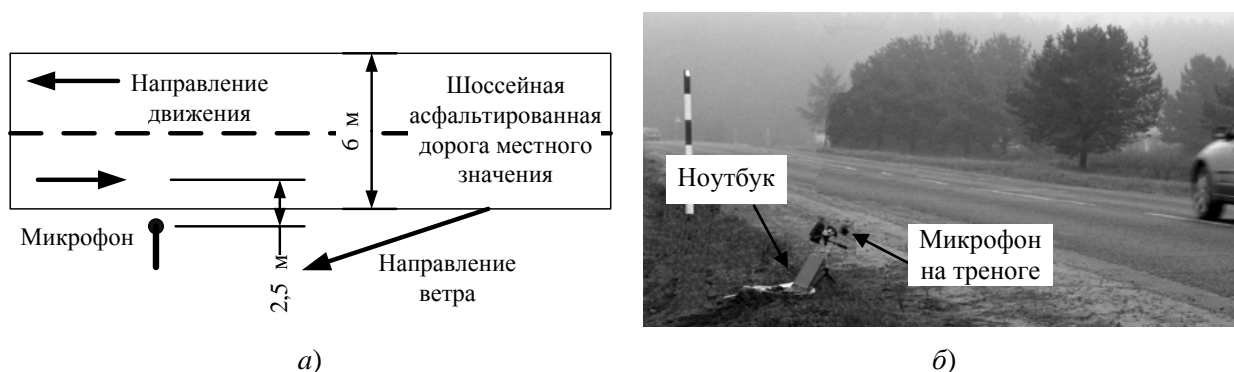


Рис. 1. Схема эксперимента – (а); место проведения эксперимента и расположение оборудования – (б)

Усреднение оценок АКФ осуществлялось по 20 последовательным выборкам сигнала, идущим подряд без перекрытия, с числом отсчетов в каждой выборке $N = 28800$ (длительность 0,3 с).

Время внутрипериодной (междупериодной) корреляции определялось по уровню 0,5 как полуширина основного лепестка АКФ (огibaющей АКФ).

Формирование оценок ЭС сигнала осуществлялось путем возведения в квадрат результата прямого дискретного преобразования Фурье (ДПФ) от совокупности временных отсчетов $p_i, i = \overline{1, N}$, которая для повышения разрешения по частоте [4, с.101] дополнялась нулями до временного интервала 1 с. Сформированный ЭС нормировался относительно своего максимального значения.

Результаты экспериментальных исследований характеристик АС в режиме холостого хода двигателя АТрС

Исследовался средний по литражу легковой автомобиль Honda Accord 1996 г. выпуска с передним приводом, 4-тактным 4-цилиндровым бензиновым двигателем объемом 2,0 л. Микрофон в передней полусфере устанавливался на расстоянии 35 см от капота, а в задней полусфере — в 40 см от выхлопной трубы. АС исследовался при неисправной системе выпуска (наличие отверстия размером примерно 1,5 см на 2 см в выпускном трубопроводе), что создавало повышенное излучение шума, и после ремонта выпускного трубопровода. В обоих вариантах в системе выпуска отсутствовал катализатор нейтрализации отработавших газов, предназначенный для уменьшения вредных веществ, содержащихся в продуктах сгорания топлива. Исследование АС автомобиля до и после починки системы выпуска происходило в схожих условиях, за исключением того, что при исследовании с неисправной системой выпуска сигнал с внешнего микрофона подавался на микрофонный вход ноутбука.

Передняя полусфера. Временная реализация АС $p(t)$ автомобиля Honda в относительных единицах (о.е.) при неисправной системе выпуска приведена на рис. 2,а. Оценка АКФ АС одного цикла двигателя приведена на рис. 2,б, усредненная оценка АКФ — на рис. 2,в, а ЭС — на рис. 2,г. В ходе эксперимента частота f_{kv} , определенная по тахометру, равнялась примерно 12,5 Гц. В соответствии с (1), частота выпуска отработавших газов для двигателя рассматриваемого автомобиля при $f_{kv} = 12,5$ Гц равна 25 Гц, а период следования выхлопов — 40 мс.

Период повторения зубцов АКФ (рис. 2,в) равен 39,1 мс и соответствует периоду повторения АС выхлопов при выпуске отработавших газов. Время внутрипериодной корреляции составляет 0,9 мс (рис. 2,б) и, фактически, характеризует длительность сигнала цилиндра. Время междупериодной корреляции как с учетом ограниченной длительности исследуемого временного фрагмента (300 мс, рис. 2,в), так и при отсутствии этого ограничения имеет значение около 40 мс.

В ЭС на рис. 2,г основную мощность имеют сигналы на частотах 26, 51 и 152 Гц, соответствующие 1, 2 и 6 гармоникам частоты выпуска отработавших газов для двигателя рассматриваемого автомобиля. Мощность 6-ой гармоники составляет около 55 % от мощности первой.

Заметим, что кроме отмеченных спектральных компонент в ЭС присутствуют высокочастотные составляющие на частотах выше 500 Гц, но их мощности имеют значения менее 0,05 от мощности максимальной составляющей. С учетом того, что при распространении АС в атмосфере наибольшее затухание имеют составляющие на высоких частотах, далее отмеченные высокочастотные составляющие рассматриваться не будут.

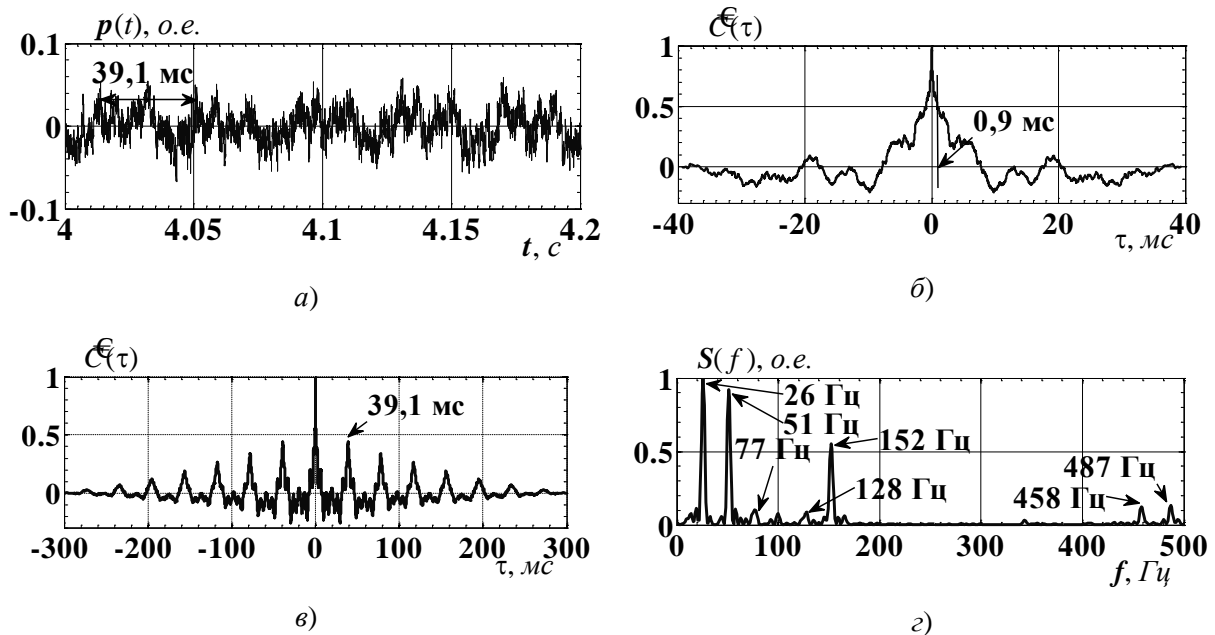


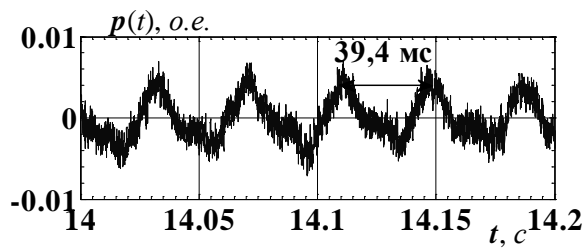
Рис. 2. Характеристики АС автомобиля Honda с неисправной системой выпуска: (а) – временная реализация; (б) – оценка АКФ АС одного цилиндра; (в) – усредненная оценка АКФ; (г) – ЭС

Временные реализации АС $p(t)$ автомобиля Honda в относительных единицах (о.е.) после ремонта трубопровода системы выпуска приведены на рис. 3,а (до включения расположенного впереди электрического вентилятора системы охлаждения) и на рис. 4,а (после включения вентилятора в момент времени 14,33 с). Видно, что сигнал при работающем вентиляторе (рис. 4,а) отличается более изрезанной формой (появляется составляющая с частотой, в несколько раз большей, чем частота повторения сигнала) и большей амплитудой. В ходе эксперимента частота f_{kv} , определенная по тахометру, равнялась 13,3 Гц. В соответствии с (1), частота выпуска отработавших газов для двигателя рассматриваемого автомобиля при $f_{kv} = 13,3$ Гц будет равна 26,6 Гц, что соответствует частоте (25,5—24,8) Гц повторения основных сигналов, представленных на рис. 3,а и 4,а. Небольшие отличия в частотах вызваны неточностью определения частоты f_{kv} .

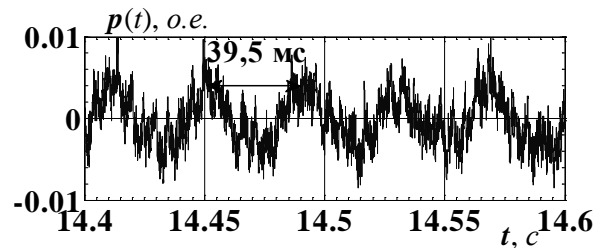
Рассмотрим усредненные оценки АКФ (рис. 3,б; 4,б), полученные для временных реализаций на рис. 3,а и 4,а путем усреднения оценок, вычисленных в соответствии с (4). Усредненные оценки АКФ схожи между собой и отличаются только более изрезанной формой АКФ при работающем вентиляторе (рис. 4,б). Период повторения зубцов АКФ соответствует периоду повторения АС выхлопов при выпуске отработавших газов. Время внутрипериодной корреляции имеет значение около 4,9 мс в обоих случаях и характеризует длительность сигнала выхлопа (сигнала цилиндра). Время междупериодной корреляции как с учетом ограниченной длительности исследуемого временного фрагмента (300 мс, рис. 3,б; 4,б), так и при отсутствии этого ограничения имеет значение, превышающее 300 мс.

Энергетические спектры АС, изображенных на рис. 3,а и 4,а, приведены на рис. 3,в и 4,в соответственно. В спектре на рис. 3,в основную мощность имеют сигналы на частотах 26 и 52 Гц, соответствующие 1 и 2 гармоникам частоты выпуска отработавших газов для двигателя рассматриваемого автомобиля. Мощность 2-ой гармоники составляет около 15 % от мощности первой. Видно, что ЭС сигнала на рис. 4,в отличается наличием составляющей 194 Гц, соответствующей частоте вращения электрического вентилятора системы охлаждения

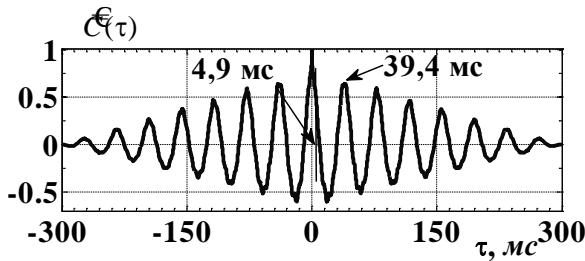
двигателя. Вентилятор не связан с приводом АТрС, поэтому его частота вращения не кратна частоте выхлопов.



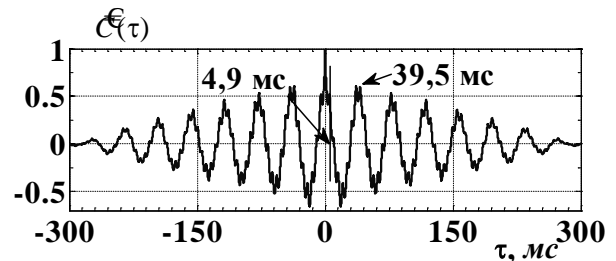
a)



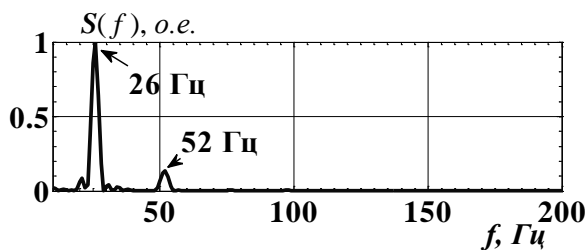
a)



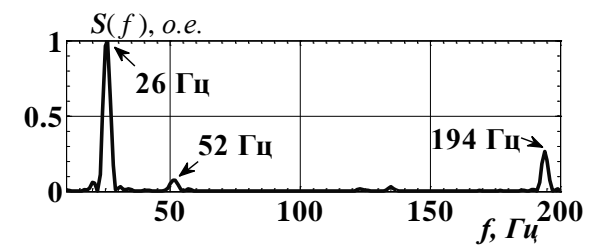
б)



б)



в)



в)

Рис. 3. Характеристики АС автомобиля Honda после ремонта системы выпуска при выключенном вентиляторе: (а) – временная реализация; (б) – усредненная оценка АКФ; (в) – ЭС

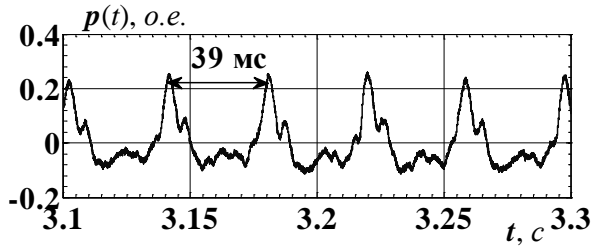
Рис. 4. Характеристики АС автомобиля Honda после ремонта системы выпуска при включенном вентиляторе: (а) – временная реализация; (б) – усредненная оценка АКФ; (в) – ЭС

Как известно [1, 2], система выпуска проектируется исходя из задач снижения уровня шума АТрС и вредных выбросов продуктов сгорания топлива, а также для обеспечения оптимального режима работы двигателя (повышения эффективности продувки цилиндров и т.д.). Снижение шума АТрС и улучшение работы двигателя при исправной системе выпуска приводит к изменению спектрально-временных характеристик АС автомобиля. Во-первых, более четко проявляется периодическая структура АС на рис. 3,а, 4,а по сравнению с рис. 2,а. Во-вторых, форма АКФ становится более ровной и увеличивается время межпериодной и внутрипериодной корреляции (рис. 3,б; 4,б по сравнению с рис. 2,в). В-третьих, существенно (практически до нуля) уменьшается уровень высокочастотных составляющих спектра на рис. 3,в; 4,в по сравнению с рис. 2,г.

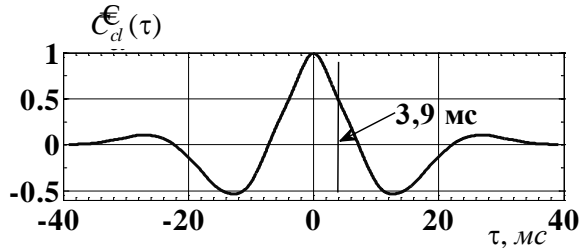
Задняя полусфера. Характеристики АС автомобиля Honda в задней полусфере при неисправной системе выпуска приведены на рис. 5,а после ремонта трубопровода системы выпуска — на рис. 6.

Из временной реализации АС автомобиля Honda (рис. 5,а) следует, что период повторения выхлопов составляет 39 мс. Этому периоду соответствует частота выхлопов 25,6 Гц, что примерно соответствует частоте 25 Гц, вычисленной по (1) для частоты $f_{kv} = 12,5$ Гц или 750 оборотов в минуту (об/мин), определенной по тахометру. Временная реализация АС на

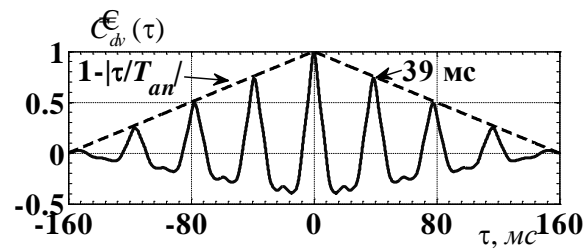
рис. 6,а отличается от рис. 5,а более сглаженной формой, схожей с синусоидальной, что связано с подавлением основного числа гармонических составляющих глушителем.



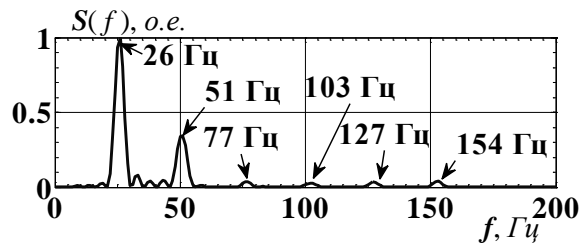
а)



б)

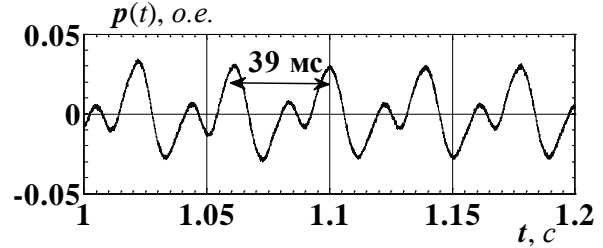


в)

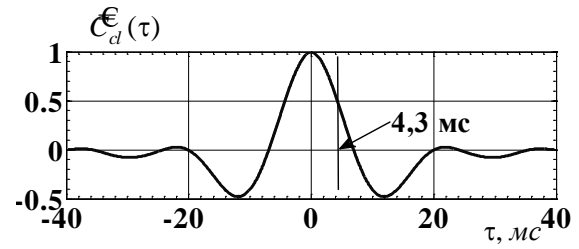


з)

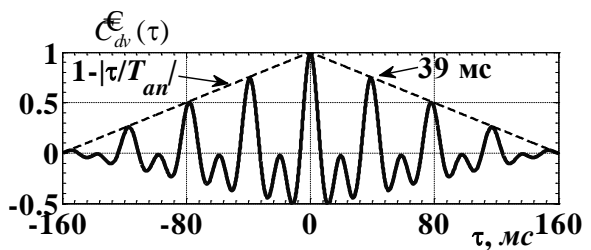
Рис. 5. Характеристики АС автомобиля Honda при неисправной системе выпуска: (а) – временная реализация; (б) – оценка АКФ АС одного цилиндра; (в) – усредненная оценка АКФ; (з) – ЭС



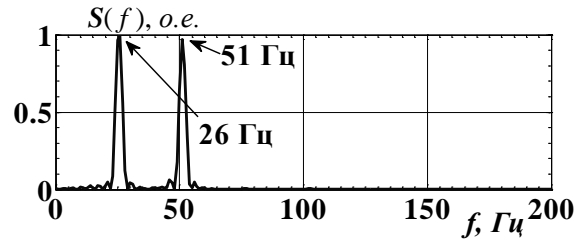
а)



б)



в)



з)

Рис. 6. Характеристики АС автомобиля Honda после ремонта системы выпуска: (а) – временная реализация; (б) – оценка АКФ АС одного цилиндра; (в) – усредненная оценка АКФ; (з) – ЭС

Формы АКФ сигнала цикла цилиндра (рис. 5,б, и 6,б) и усредненных оценок АКФ (рис. 5,в, и 6,в) схожи между собой. Время внутривыпускной корреляции составляет 3,9 (4,3) мс для рис. 5,б (6,б) и характеризует длительность сигнала выхлопа. Период повторения зубцов АКФ на рис. 5,в, и 6,в равен 39 мс и соответствует периоду повторения АС на рис. 5,а, и 6,а. Время междувыпускной корреляции как с учетом ограниченной длительности исследуемого временного фрагмента (160 мс, рис. 5,в; 6,в), так и при отсутствии этого ограничения имеет значение, превышающее 160 мс.

В ЭС АС на рис. 5,з основную мощность имеют сигналы на частотах 26 и 51 Гц, соответствующие 1 и 2 гармоникам частоты выпуска отработавших газов. Мощность 2-ой гармоники составляет около 37 % от мощности первой. Кроме этого, в спектре присутствуют сигналы

на частотах 77, 103, 127 и 154 Гц, которые примерно соответствуют 3, 4, 5 и 6 гармоникам выхлопов. В результате ремонта системы выпуска фильтрация АС стала происходить более эффективно, поэтому уровень гармоник ЭС (рис. 6,з) АС, показанного на рис. 6,а с номерами 3 и выше стал практически равен нулю, а уровень основной гармоники 26 Гц значительно снизился и стал сопоставим с уровнем 2-ой гармоники 51 Гц (рис. 6,з).

В [3] были промоделированы АКФ для сигналов одного цилиндра, цикла двигателя и последовательности циклов двигателя. Для реального АС автомобиля Honda сигналу одного цилиндра соответствует период повторения 39 мс (рис. 5,а; 6,а), а циклу двигателя — 4 периода. Результаты моделирования, полученные в [3], в основном хорошо согласуются с результатами экспериментальных исследований, а небольшие отличия обусловлены только отличиями сигнала одного цикла цилиндра, аппроксимированного треугольниками [3].

В итоге можно сделать следующие выводы. *Во-первых*, для задней и передней полусфер наблюдения сигналы автомобиля в режиме холостого хода двигателя и их основные спектрально-временные характеристики весьма близки. *Во-вторых*, предложенная в [3] математическая модель сигнала выхлопа соответствует результатам экспериментальных исследований АС как в задней, так и в передней полусферах. Наибольшее соответствие наблюдается для исправной системы выпуска. *В-третьих*, стабильная форма усредненных оценок АКФ АС выхлопов на холостом ходу свидетельствует о высокой схожести оценок АКФ во всех 20 фрагментах.

Заключение

Во-первых, АС выпускаемых из двигателя отработавших газов имеет периодическую структуру, параметры которой зависят от режима работы двигателя. Период повторения выхлопов отработавших газов определяет периодичность как спектра, так и корреляционной функции АС. *Во-вторых*, система выпуска газов обеспечивает существенное снижение мощности спектральных компонент на частоте выхлопов газов и ее удвоенном значении (низкочастотные компоненты), а также практически полное подавление спектральных компонент с более высокими частотами (высокочастотные компоненты). *В-третьих*, экспериментально установлено, что предложенная в [3] математическая модель АС выхлопов отработавших газов соответствует АС, зарегистрированным в ходе экспериментальных исследований автомобиля как в задней, так и в передней полусферах наблюдения.

THE RESULTS OF AN EXPERIMENTAL STUDY OF SPECTRAL AND TIME CHARACTERISTICS OF A VEHICLE ACOUSTIC SIGNAL IN IDLING

S.R. HEISTER, A.M. GLADYSHEV

Abstract

For the first time the results of experimental research of the spectral-time characteristics of acoustical signals of light vehicles when idle are considered. The high correlation of the acoustical signals has been determined. The effect of exhaust pipe injury on the spectral-time characteristics of acoustical signals of vehicles is considered.

Литература

1. Луканин В.Н., Гудцов В.Н., Бочаров Н.Ф. Снижение шума автомобиля. М., 1981.
2. Тольский В.Е. Виброакустика автомобиля. М., 1988.
3. Гейстер С.Р., Гладышев А.М. // Докл. БГУИР. 2009. № 3(41). С. 17–25.
4. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов. / Пер. с англ. 2-е изд. М., 2007.