

УДК 534.23; 534.4

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ И СПЕКТРАЛЬНО-ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА АВТОМОБИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

С.Р. ГЕЙСТЕР, А.М. ГЛАДЫШЕВ

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

*Поступила в редакцию 18 февраля 2009*

Рассматривается двигатель автомобиля как основной источник акустических сигналов, которые можно использовать для решения задач акустической локации автомобилей в ходе мониторинга охраняемых зон. Представляется математическая модель временной структуры сигнала, а также его основные характеристики — корреляционная функция и энергетический спектр, используемые при синтезе эффективных устройств обнаружения, измерения координат и распознавания. Приводятся результаты моделирования и анализа характеристик акустического сигнала двигателя.

*Ключевые слова:* акустический сигнал, автомобиль.

### Введение

В настоящее время существует потребность в автоматическом мониторинге передвижения автотранспортных средств (АТрС). Это связано с необходимостью решения задач, которые, например, применительно к Республике Беларусь могут быть связаны с природоохранной деятельностью и охраной (блокированием) зон радиоактивного заражения. Заметим, что мониторинг в зонах радиоактивного заражения исключает постоянное присутствие в этих зонах людей и может выполняться исключительно с использованием автоматических систем.

В ходе мониторинга передвижения АТрС решаются задачи обнаружения и измерения координат АТрС, а также распознавания класса (типа) АТрС. Эффективность решения этих задач напрямую зависит от качества функционирования соответствующих устройств, входящих в состав систем мониторинга, а качество их алгоритмов функционирования определяется: полнотой представлений об источниках полезных сигналов и помех; адекватностью моделей сигналов и помех, используемых при синтезе алгоритмов, реальности.

Рассматриваемые АТрС как источники шума достаточно хорошо изучены и описаны, например, в [1–3]. Однако для построения оптимальных алгоритмов обнаружения эти описания мало пригодны по следующим причинам. Во-первых, акустические сигналы АТрС представляются как вредные для человека шумы, а их спектры, как правило, приводятся скорректированными по отношению к физиологическим особенностям слуха человека. Во-вторых, практически отсутствуют примеры временных реализаций акустических сигналов АТрС, а об их корреляционных свойствах лишь иногда упоминается.

Именно поэтому существует потребность в изучении спектрально-временных и корреляционных характеристик акустических сигналов, создаваемых АТрС, с целью их дальнейшего использования при разработке оптимальных алгоритмов обнаружения АТрС.

## Теоретический анализ

Основными источниками акустических сигналов, возникающих при работе АТрС, являются [1] двигатель, включающий систему впуска воздуха и топлива, систему выпуска отработавших газов (входная труба, глушитель, хвостовая труба), вентилятор системы охлаждения, а также трансмиссия и шины. Несмотря на большое количество, все источники сигналов, как правило, связаны с режимом работы двигателя автомобиля и имеют в своем спектре сигналы на частотах, кратных частоте вращения коленчатого вала двигателя  $f_{kv}$ . В связи с этим частоту  $f_{kv}$  можно считать спектрообразующей или базовой частотой акустического сигнала, создаваемого АТрС.

Диапазон частот вращения коленчатого вала мало зависит от типа двигателя и определяется следующим образом. Во-первых, нижняя граница диапазона определяется на холостом ходу минимальной частотой  $f_{kv} = f_{kv-\min}$ , при которой двигатель еще не глохнет и продолжает работать. При этом  $f_{kv-\min} = (10-12)$  Гц (или 600–700 оборотов коленчатого вала в минуту). Во-вторых, верхняя граница диапазона определяется максимальной частотой  $f_{kv} = f_{kv-\max}$ , которая примерно равна  $f_{kv-\max} = (93-110)$  Гц (5600–6600 оборотов в минуту). Кроме того, вращение коленчатого вала можно характеризовать частотой в наиболее часто используемых режимах. Так для грузовых автомобилей наиболее часто используются режимы работы, при которых частота вращения коленчатого вала  $f_{kv} = f_{kv-sr} = 30,8$  Гц (1850 оборотов в минуту) [4].

Движение по полевым и лесным дорогам ограничено по скорости наличием большого количества ям, кочек, ухабов и пр. Поэтому движение по таким дорогам, как правило, осуществляется на первой или второй передачах. Кроме того, даже при разных передачах в установившемся режиме работы двигателя значение частоты вращения коленчатого вала лежит в ограниченном диапазоне  $f_{kv} = f_{kv-ust} = (18-42)$  Гц со средним значением  $f_{kv-sr} = 30$  Гц.

Далее основное внимание уделим главному источнику акустических сигналов — двигателю. Импульс газов, образующийся в цилиндре при сгорании топлива и обладающий высоким давлением, в виде выхлопных газов проходит через систему выпуска отработавших газов и излучается в пространство из выходного отверстия хвостовой трубы, считающейся точечным источником [1]. Поскольку аналогичные процессы происходят последовательно во всех цилиндрах, то излучение импульсов выхлопных газов периодически повторяется в течение рабочего цикла двигателя. Периодичность и очередность процессов в каждом из цилиндров многоцилиндрового двигателя определяется газораспределительным механизмом.

Процессы воспламенения смеси в цилиндрах и соответственно выпуски отработавших газов из хвостовой трубы, стоящей после глушителя, происходят с частотой выхлопов [1]

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

где  $N_{cl}$  — число цилиндров в двигателе;  $I$  — число тактов в двигателе.

### Физические процессы в двигателе, сопровождающие формирование акустических сигналов

Математическая модель временной структуры акустических сигналов, создаваемых двигателем на выходе системы выпуска отработавших газов, определяется физическими процессами, происходящими в цилиндрах двигателя и в самой системе. Заметим, что с позиции рассмотрения процессов, связанных с формированием акустических сигналов, карбюраторный и дизельный двигатели внутреннего сгорания практически аналогичны. Отличия состоят лишь в более высоких значениях давлений, имеющих место в дизельных двигателях. Поэтому далее будем рассматривать формирование сигналов на примере карбюраторного двигателя.

Кратко рассмотрим процессы, происходящие в одном цилиндре типового 4-тактного двигателя. Цикл работы одного цилиндра включает четыре такта: впуск бензиново-воздушной смеси; сжатие бензиново-воздушной смеси; расширение газов при сгорании (рабочий ход); выпуск продуктов сгорания. Совокупность этих тактов называется рабочим циклом. В четырех-

тактном двигателе рабочий цикл совершается за четыре хода поршня, то есть за два оборота коленчатого вала (рис. 1).

В первом такте поршень перемещается от верхней мертвой точки (ВМТ) к нижней мертвой точке (НМТ). При этом впускной клапан открыт, а выпускной клапан закрыт (рис. 1,а). В цилиндре создается разрежение, составляющее [5] для легковых автомобилей (сотые–десятые доли) МПа, и горючая смесь, состоящая из паров бензина и воздуха, втягивается в цилиндр.

Во втором такте оба клапана закрыты, и поршень перемещается от НМТ к ВМТ. Давление в цилиндре повышается и в конце такта достигает значения (десятые доли–единицы) МПа.

Третий такт, в ходе которого оба клапана закрыты, начинается после того, как в конце такта сжатия рабочая смесь воспламеняется в результате искрового разряда в свече зажигания. При этом происходит быстрое сгорание смеси, и давление увеличивается в несколько раз, достигая значения единиц — десятков МПа. Давление сформированных газов передается на поршень, опуская его из ВМТ в НМТ. В конце третьего такта открывается выпускной клапан и отработавшие газы начинают выходить во входную трубу системы выпуска.

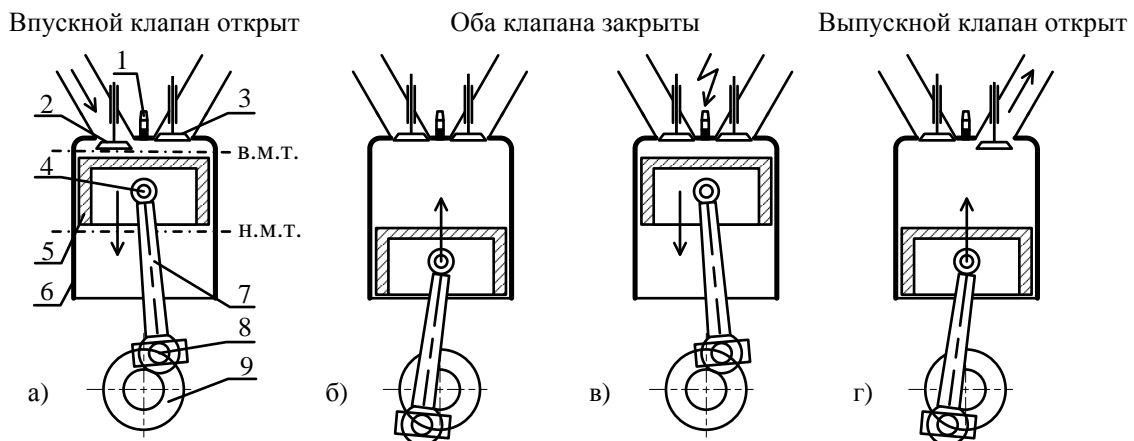


Рис. 1. Рабочий цикл 4-тактного двигателя а) впуск; б) сжатие; в) рабочий ход; г) выпуск (1 — свеча зажигания; 2 — впускной клапан; 3 — выпускной клапан; 4 — поршневой палец; 5 — поршень; 6 — головка цилиндра; 7 — шатун; 8 — коленчатый вал; 9 — маховик)

В ходе четвертого такта при открытом выпускном клапане поршень перемещается от НМТ к ВМТ и отработавшие газы из цилиндра выталкиваются во входную трубу и через глушитель и хвостовую трубу выходят в свободное пространство. К концу такта давление в цилиндре понижается до десятых долей МПа.

На рис. 2 представлена структура тракта формирования акустического сигнала в четырехцилиндровом карбюраторном двигателе.

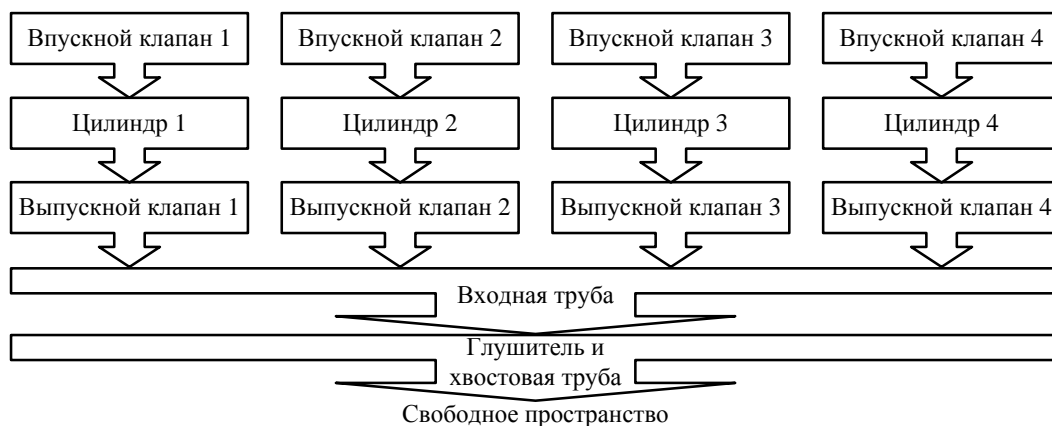


Рис. 2. Структура тракта формирования акустического сигнала в четырехцилиндровом карбюраторном двигателе

Кратко охарактеризуем ее элементы и их взаимодействие. В таком двигателе цилиндры выполняют рабочие циклы поочередно, причем последовательность может быть вида "1-3-4-2" или "1-2-4-3". При работе цилиндра на границе тактов выпуска отработавших газов и впуска горючей смеси возникает их перекрытие, при котором открыты оба клапана рассматриваемого цилиндра и часть отработавших газов может снова вернуться в цилиндр (только в режиме холостого хода). В интервале перекрытия возникает воздушное соединение системы впуска, системы выпуска и соответствующего цилиндра, а отношение временного интервала одновременного открытия выпускного и впускного клапанов к периоду одного оборота коленчатого вала равно  $30/360 \cong 0,0833$ . На рис. 3 представлены временные диаграммы, поясняющие взаимное временное положение зон впуска и выпуска для 4-тактного 4-цилиндрового карбюраторного двигателя, работающего по схеме "1-3-4-2", где  $T_T$  — длительность такта,  $T_C$  — длительность цикла. Необходимо заметить, что частота выхлопов описывается выражением (1), а взаимная расстановка и форма сигналов на входе системы выпуска определяется взаимной расстановкой и формой кулачков распределительного вала.

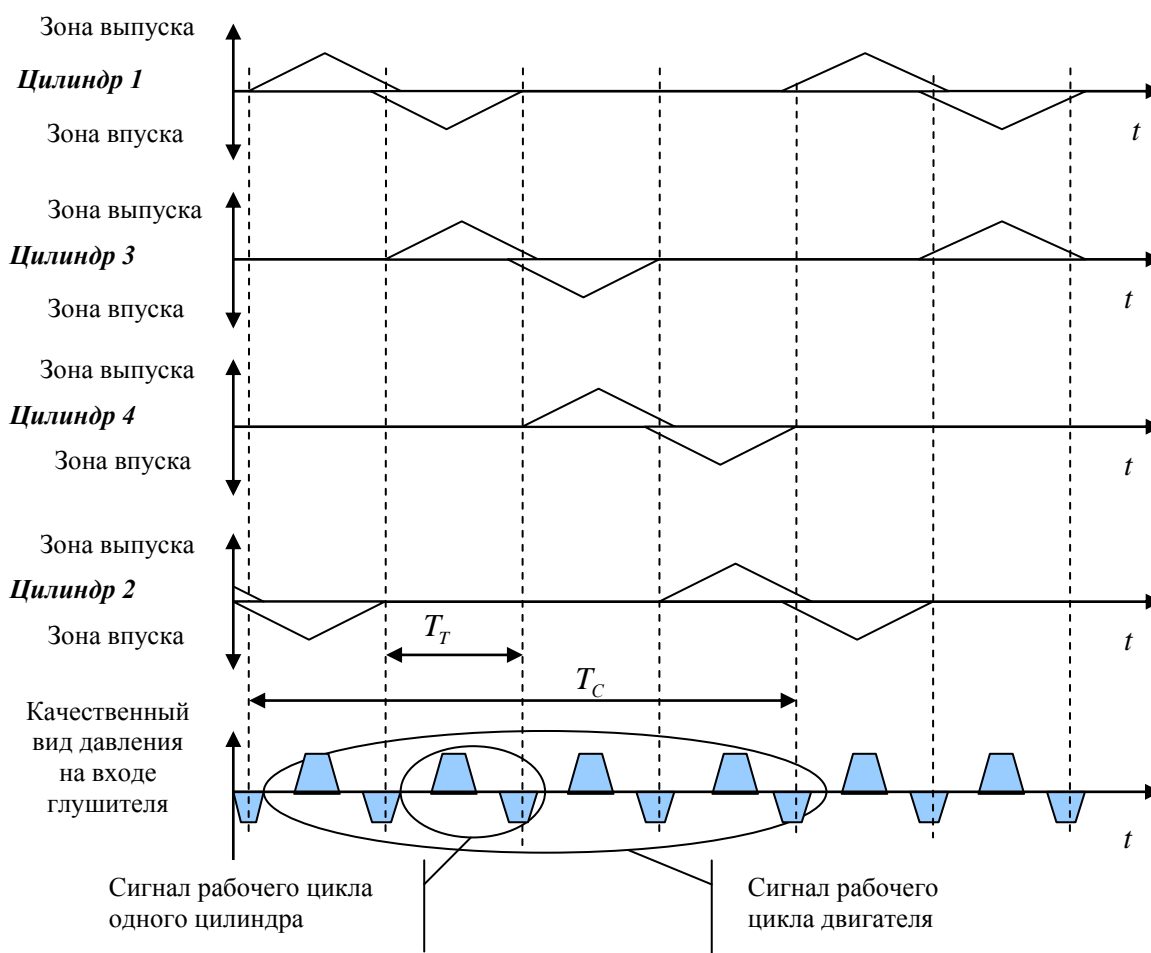


Рис. 3. Временное положение зон впуска и выпуска для 4-цилиндрового 4-тактного двигателя

Глушитель автомобиля, установленный между выпускными клапанами и свободным пространством и предназначенный для снижения уровня сигнала выхлопа, возникающего при прохождении отработавших газов через выпускной клапан [1], является акустическим фильтром и оказывает существенное влияние на параметры сигнала, излучаемого в пространство. Действие глушителя проявляется в уменьшении скорости движения газов с увеличением длительности выхлопа и его фронтов, что приводит к существенному уменьшению ширины спектра сигнала. Заметим, что в глушителе возникают отраженные сигналы, и соответствующий выходной сигнал глушителя является результатом взаимодействия прямых и отраженных сигналов.

## Математическая модель временной структуры акустических сигналов автомобильного двигателя

Акустический сигнал двигателя можно разбить на следующие временные составляющие: 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 (в предположении — бесконечная или ограниченная временем наблюдения).

В общем виде акустический сигнал автомобильного двигателя на интервале  $JT_C$  можно записать следующим образом:

$$p_{dv}(t) = \begin{cases} \sum_{j=1}^J p_{cd}(t - (j-1)T_C), & 0 \leq t \leq JT_C; \\ 0, & t < 0, t > JT_C, \end{cases} \quad (2)$$

где  $J$  — число циклов работы двигателя, в ходе которых режим работы автомобильного двигателя и его относительное местоположение практически не изменялись.

Сигнал рабочего цикла одного цилиндра  $p_{cl}(t)$  на выходе глушителя целесообразно рассматривать с учетом следующих ограничений. Во-первых, сигналы колебаний, возникающих в глушителе после поступления в него выхлопных газов, представляются лишь первым максимальным сигналом уплотнения и последующим сигналом разрежения. Это справедливо для основных режимов работы двигателя за исключением холостого хода на низких оборотах. Во-вторых, сигналы рабочих циклов, формируемые разными цилиндрами, не пересекаются между собой во времени, т.е. имеют ненулевые значения только в пределах своих тактов работы.

С учетом этого ограничения акустический сигнал двигателя в рабочем цикле можно представить в виде

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

где  $I$  — число тактов в цикле работы двигателя,  $N_{cl}$  — количество цилиндров двигателя, а временной интервал  $T_T^* = IT_T / N_{cl}$ .

С учетом рис. 3 сигнал рабочего цикла одного цилиндра  $p_{cl}(t)$ , сформированного на выходе глушителя, включает в себя: сигнал избыточного давления, соответствующий выпуску отработавших газов; сигнал разрежения, соответствующий переотраженной в глушителе волне фазе разрежения после прохождения через точку наблюдения фронта избыточного давления и части фазы впуска в цилиндр горючей смеси.

При работе двигателя на средних и высоких оборотах акустический сигнал рабочего цикла цилиндра  $p_{cl}(t)$  можно представить в виде двух сигналов треугольной формы положительной и отрицательной полярности, что иллюстрируется рис. 4.

В качестве примера на рис. 5 представлена временная реализация акустического сигнала  $p_{dv}(t)$  с треугольной аппроксимацией вида (4) для 4-цилиндрового 4-тактного двигателя при следующих значениях параметров —  $T_D = 9$  мс,  $T_R = 8$  мс,  $T_T^* = 20$  мс,  $P_{D_{\max}} = 1$  и  $P_{R_{\max}} = 0,9$ . За нулевой уровень на рис. 4 и 5 принят уровень статического давления атмосферы, которое равно 101,3 кПа на уровне моря при температуре 15 °С.

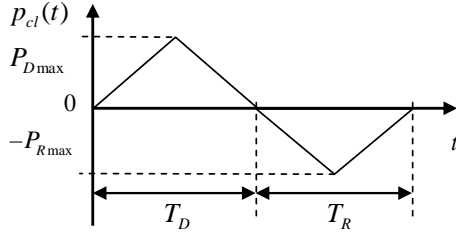


Рис. 4. Временная структура акустического сигнала рабочего цикла цилиндра при треугольной аппроксимации

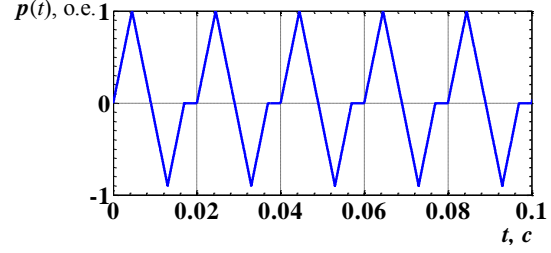


Рис. 5. Временная реализация сигнала с треугольной аппроксимацией для 4-цилиндрового 4-тактного двигателя

Для данной аппроксимации математическая модель акустического сигнала одного рабочего цикла цилиндра описывается выражением

$$p_{cl}(t) = \begin{cases} \frac{2P_{D\max}}{T_D}t, & 0 \leq t \leq \frac{T_D}{2}; \\ \frac{-2P_{D\max}}{T_D}t - T_D, & \frac{T_D}{2} < t \leq T_D; \\ \frac{-2P_{R\max}}{T_R}t - T_D, & T_D < t \leq \left(T_D + \frac{T_R}{2}\right); \\ \frac{2P_{R\max}}{T_R}t - T_D - T_R, & \left(T_D + \frac{T_R}{2}\right) < t \leq T_D + T_R; \\ 0, & 0 > t, (T_D + T_R) < t \leq T_T^*. \end{cases} \quad (4)$$

### Спектрально-временные характеристики акустического сигнала двигателя

Акустический сигнал может характеризоваться следующими характеристиками: амплитудо-фазочастотным спектром; корреляционной функцией; энергетическим спектром.

Амплитудо-фазочастотный спектр акустического сигнала автомобильного двигателя описывается прямым преобразованием Фурье от временной структуры

$$G_{dv}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} p_{dv}(t) \exp(-i\omega t) dt. \quad (5)$$

Корреляционная функция  $C_{dv}(\tau)$  акустического сигнала двигателя, оценка которой может быть сформирована путем анализа временного фрагмента принятого сигнала длительностью  $J$  циклов работы двигателя, описывается выражением

$$C_{dv}(\tau) = \frac{1}{JT_C} \int_{-\infty}^{\infty} p_{dv}(t) p_{dv}(t - \tau) dt = \frac{1}{J} \sum_{k,l=1}^J \frac{1}{T_C} \int_{-\infty}^{\infty} p_{cd}(t - (k-1)T_C) p_{cd}(t - \tau - (l-1)T_C) dt. \quad (6)$$

В случае идентичности работы цилиндров, что проявляется в одинаковых параметрах выхлопов, выражение (6) можно преобразовать к виду

$$C_{dv}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{k,l=1}^N \frac{1}{T_T^*} \int_{-\infty}^{\infty} p_{cl}(t - (k-1)T_T^*) p_{cl}(t - \tau - (l-1)T_T^*) dt = \frac{1}{N} \sum_{k,l=1}^N C_{cl}(\tau - (k-l)T_T^*), \quad (7)$$

где  $N = IJ$  — произведение числа тактов  $I$  в цикле работы двигателя на число циклов  $J$ ;

$C_{cl}(\tau) = \frac{1}{T_T^*} \int_{-\infty}^{\infty} p_{cl}(t) p_{cl}(t - \tau) dt$  — корреляционная функция сигнала рабочего цикла цилиндра.

В дальнейших преобразованиях используем подход, изложенный в [6]. Осуществив в (7) переход от суммирования по  $k$  и  $l$  к суммированию по  $n = (k-l)$ , можно представить  $C_{dv}(\tau)$  в виде

$$C_{dv}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=-N}^N (N - |n|) C_{cl}(\tau - nT_T^*) = \sum_{n=-N}^N r_N(nT_T^*) C_{cl}(\tau - nT_T^*) \cong r_N(\tau) \sum_{n=-N}^N C_{cl}(\tau - nT_T^*), \quad |\tau| \leq NT_T^*, \quad (8)$$

где  $r_N(\tau) = 1 - |\tau|/NT_T^*$ ,  $|\tau| \leq NT_T^*$  — корреляционная функция прямоугольной огибающей последовательности сигналов рабочих циклов цилиндра;  $r_N(nT_T^*) = 1 - |n|/N$  — междупериодные значения корреляционной функции  $r_N(\tau)$ .

Для удобства анализа энергетического спектра целесообразно использовать приближенное выражение для корреляционной функции  $C_{dv}(\tau)$ , которое следует из (8) при аппроксимации корреляционной функции огибающей последовательности  $r_N(\tau) = 1 - |\tau|/NT_T^*$  экспоненциальной функцией вида  $r_N(\tau) = \exp -\alpha|\tau|/NT_T^*$ , а также замене линейных весовых множителей  $r_N(nT_T^*) = 1 - |n|/N$  на экспоненциальные  $r_N(nT_T^*) = \exp -\alpha|n|/N$ , где коэффициент  $\alpha$  для выполнения условия сохранения эффективной длительности ограниченной последовательности сигналов выбирается [6] равным 2.

С учетом этих замен корреляционная функция  $C_{dv}(\tau)$  акустического сигнала вида (8) преобразуется к виду

$$C_{dv}(\tau) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp -2|n|/N C_{cl}(\tau - nT_T^*) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} r_N^{|n|} C_{cl}(\tau - nT_T^*) \cong r_N(\tau) \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_{cl}(\tau - nT_T^*), \quad (9)$$

где  $r_N = \exp -2/N$  — коэффициент междупериодной корреляции сигналов соседних циклов длительностью  $T_T^*$ .

Энергетический спектр  $S_{dv}(\omega)$  акустического сигнала двигателя является прямым преобразованием Фурье от корреляционной функции  $C_{dv}(\tau)$ . Исходя из выражения (9) и используя замену переменной интегрирования  $\tau$  на  $(\tau_1 - nT_T^*)$ , можно записать

$$\begin{aligned} S_{dv}(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} C_{dv}(\tau) \exp -i\omega\tau \, d\tau = \sum_{n=-\infty}^{\infty} r_N(nT_T^*) \int_{-\infty}^{\infty} C_{cl}(\tau - nT_T^*) \exp -i\omega\tau \, d\tau = \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} r_N(nT_T^*) \exp(-i\omega nT_T^*) \int_{-\infty}^{\infty} C_{cl}(\tau_1) \exp -i\omega\tau_1 \, d\tau_1 = S_N(\omega T_T^*) S_{cl}(\omega), \end{aligned} \quad (10)$$

где  $S_{cl}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} C_{cl}(\tau) \exp -i\omega\tau \, d\tau$  — энергетический спектр акустического сигнала одного рабочего цикла цилиндра;  $S_N(\omega T_T^*) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} r_N(nT_T^*) \exp(-i\omega nT_T^*)$  — энергетический спектр ограниченной последовательности  $\delta$ -модулированных импульсов  $p_\delta(t) = \sum_{n=1}^N \delta[t - (n-1)T_T^*]$ .

Используя выражение для суммы членов бесконечной геометрической прогрессии  $\sum_{n=1}^{\infty} d^n = d/1-d$ , выражение для  $S_N(\omega T_T^*)$  может быть преобразовано [6] к виду, соответствующему гребенчатой функции:

$$S_N(\omega T_T^*) = \frac{1 - r_N^2}{1 - 2r_N \cos \omega T_T^* + r_N^2}, \quad (11)$$

зубцы которой по оси частот расходятся вправо и влево в бесконечность.

Ширина зубцов спектра  $S_N(\omega T_T^*)$  в общем случае определяется как  $\Delta F_N = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi F_T}^{\pi F_T} S_N(\omega T_T^*) d\omega / [S_{N \max}(\omega T_T^*)]$ , которое преобразуется [6] к виду

$$\Delta F_N = F_T \frac{1-r_N}{1+r_N} \cong \frac{F_T}{N}, \quad (12)$$

где  $F_T = 1/T_T^*$  - частота следования циклов.

### Результаты и их обсуждение

В качестве примера на рис. 6 представлен вид оценки корреляционной функции сигнала одного рабочего цикла цилиндра  $C_{cl}(\tau)$  для параметров, отмеченных в комментариях к рис. 5. Соответственно на рис. 8 и 10 представлены корреляционные функции  $C_{dv}(\tau)$  ограниченных последовательностей акустических сигналов циклов при  $N = 4$  и  $N = 40$ .

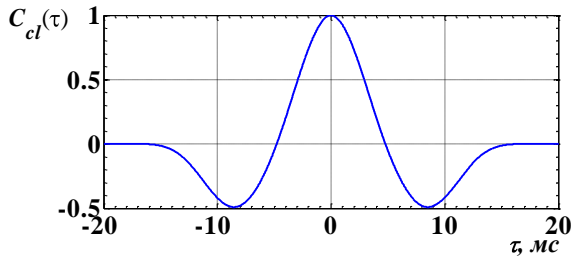


Рис. 6. Оценка корреляционной функции сигнала одного рабочего цикла цилиндра

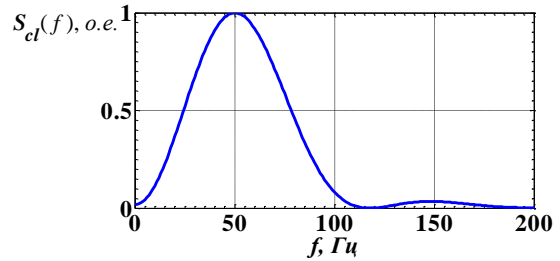


Рис. 7. Энергетический спектр акустического сигнала одного рабочего цикла цилиндра

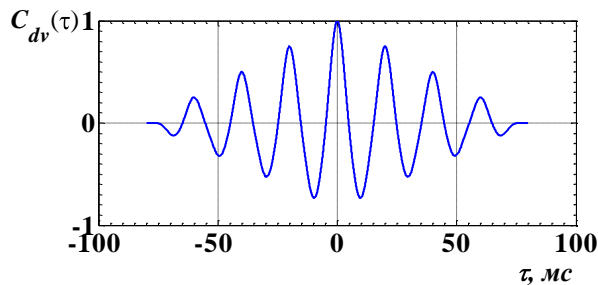


Рис. 8. Корреляционная функция ограниченной последовательности сигналов циклов

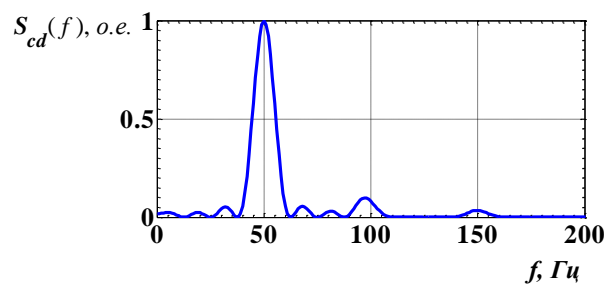


Рис. 9. Энергетический спектр ограниченной последовательности сигналов циклов

На рис. 7 для отмеченных параметров представлен энергетический спектр сигнала одного рабочего цикла цилиндра (рис. 6), а на рис. 9 и 11 — энергетические спектры ограниченных последовательностей акустических сигналов циклов при  $N = 4$  и  $N = 40$ .

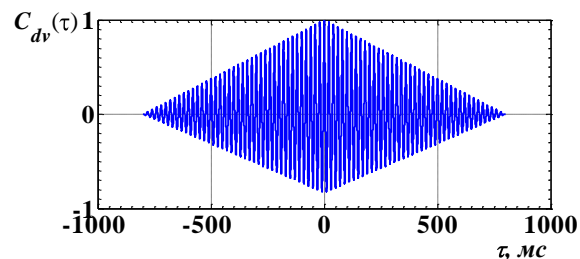


Рис. 10. Корреляционная функция ограниченной последовательности сигналов циклов

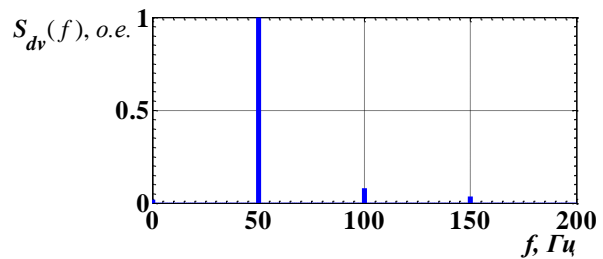


Рис. 11. Энергетический спектр ограниченной последовательности сигналов циклов



## Заключение

Результаты моделирования акустического сигнала на выходе глушителя системы выпуска показывают следующее. Во-первых, предложенная временная модель сигнала позволяет описать как сигнал одного цилиндра, так и сигнал, соответствующий рабочему циклу (последовательности рабочих циклов) двигателя. Временная структура акустического сигнала двигателя имеет периодический характер, что определяет периодичность в корреляционной функции и спектре сигнала. Во-вторых, корреляционная функция одного рабочего цикла двигателя носит периодический характер, а период повторения зубцов корреляционной функции соответствует периоду повторения сигналов рабочих циклов цилиндров. Форма огибающей корреляционной функции близка к треугольному виду, что связано с ограниченностью временного фрагмента, используемого для формирования оценки корреляционной функции. В-третьих, спектр акустического сигнала имеет максимумы на частотах, кратных целым значениям частоты выхлопов (1).

## SPECTRAL AND TIME CHARACTERISTICS OF ACOUSTIC SIGNAL OF VEHICLE ENGINE

S.R. HEISTER, A.M. GLADISHEV

### Abstract

A car engine is studied as the main source of acoustic signals which can be used to solve the task of acoustic location of cars during protected zones monitoring is considered. Described are the mathematical model of a signal time structure, and also its basic characteristics — correlation function and the power spectrum, used to synthesize effective detection devices, measure coordinates and recognition. Results of an engine acoustic signal characteristics analysis and modelling are represented.

### Литература

1. Луканин В.Н., Гудцов В.Н., Бочаров Н.Ф. Снижение шума автомобиля. М., 1981.
2. Тольский В.Е., Корчемный Р.В., Латышев Г.В., Минкин Л.М. Колебания силового агрегата автомобиля. М., 1976.
3. Тольский В.Е. Виброакустика автомобиля. М., 1988.
4. Никишин В.Н. // Автомобильная промышленность. 2007. № 2. С. 11–14.
5. Хачиян А.С., Морозов К.А., Луканин В.Н. и др. Двигатели внутреннего сгорания: Учеб. для вузов / Под ред. В.Н. Луканина. М., 1985.
6. Охрименко А.Е. Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба. Ч. 1. Основы радиолокации. М., 1983.