

УДК 629.4

Оксень Е.И., д.т.н., Гарачук А.В., инж., Быков В.В., инж.

АДИ ДонНТУ, г. Горловка

**ОСОБЕННОСТИ АКУСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДВИГАТЕЛЯ ВАЗ 2103**

*Приведены статистические показатели неравномерности периодичности протекания тактов рабочего хода и амплитудно-частотные показатели проявления дефектов системы зажигания двигателя ВАЗ 2103 автомобиля ВАЗ 2106. Установлены области рациональных значений скоростей вращения коленчатого вала двигателя для сравнительного диагностирования системы зажигания двигателя ВАЗ 2103.*

**Введение**

Акустическое диагностирование двигателей, агрегатов и систем машин – перспективный вид испытаний при проведении анализа технического состояния [1]. Эффективность его применения как неразрушающего вида контроля для установления состояния автомобиля обеспечивается возможностью выявления неисправностей на ранних стадиях их возникновения при относительно небольших трудозатратах. Повышение надёжности выводов о состоянии при акустическом диагностировании может быть достигнуто использованием количественных методов, основанных на оценках спектральных плотностей «зашумлённых» стационарных случайных процессов [2, 3] при реализации компьютерных методов получения и обработки сигналов [4]. Однако для создания цифрового аппаратно-программного комплекса акустического контроля необходимо накопление данных о проявлении конкретных видов неисправностей в акустических параметрах звука, исходящего от работающего в том или ином режиме реального автомобиля. В настоящей работе приведены результаты исследования акустических параметров двигателя автомобиля ВАЗ 2106 при работе в режиме холостого хода.

**Цель работы** – установление влияния неисправности системы зажигания на акустические характеристики двигателя ВАЗ 2103 автомобиля ВАЗ 2106.

**Методика исследований**

Акустические параметры двигателя ВАЗ 2103 фиксировались микрофоном МВ 3000L, установленным в тубусе с внутренним и внешним ворсистым покрытием для обеспечения остронаправленности снятия звукового сигнала (рис. 1).

Полученный сигнал нормировался микрофонным усилителем, выполненным на малошумящих транзисторах КТ 3102, до уровня  $50\text{ мВ}$ , подавался на один из каналов линейного входа компьютера и записывался в файл при следующих параметрах: частота опроса  $SR = 44100\text{ Гц}$ , разрешение сигнала – 16 бит. Оценка влияния неисправности системы зажигания выполнялась сравнением акустических параметров работающего исправного и дефектного двигателей. Неисправность системы зажигания моделировалась установкой в головку блока первого цилиндра свечи с заведомо дефектным электродом. Измерения проводились в режиме холостого хода при малой (порядка  $600\text{ мин}^{-1}$ ), средней (порядка  $2100\text{ мин}^{-1}$ ) и высокой (порядка  $3500\text{ мин}^{-1}$ ) частотах вращения коленчатого вала двигателя.

**Результаты исследований**

Полученные в результате измерений в форме временного ряда акустические сигналы двигателя (рис. 2) характеризуются достаточно широким спектром колебаний. Для более детального анализа особенностей изменения каждой из частотных составляющих к акустиче-



Рис. 1. Общий вид микрофона с остронаправленной характеристикой

долю компонент  $d_2$  и  $d_3$  приходится не более 3 % энергии звуковых колебаний. Представленное распределение энергии сигнала в частотной области явилось основанием для выполнения статистического анализа отклонений периодичности рабочих процессов в цилиндрах двигателя по параметрам аппроксимирующих компонент сигналов  $a_3$ .

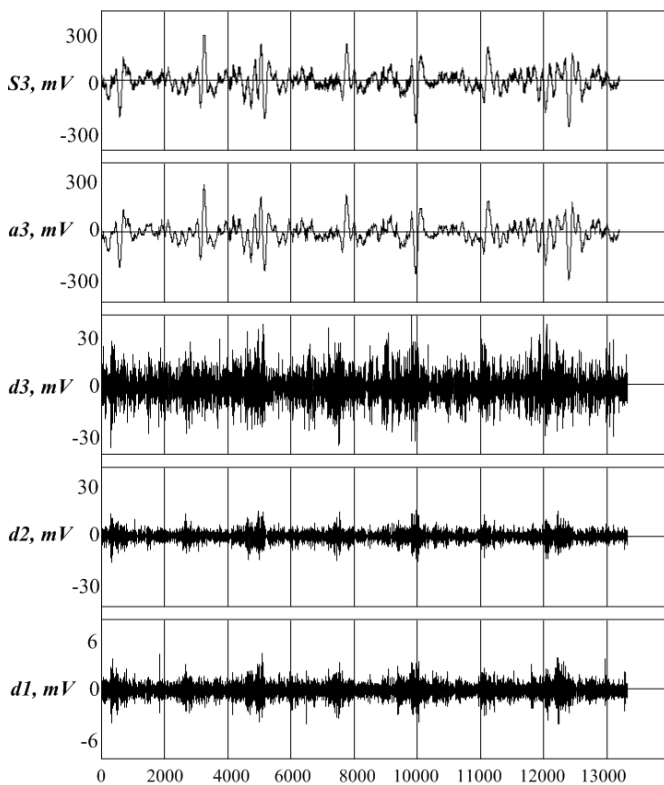
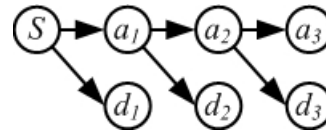


Рис. 2. Разложение исходного сигнала вейвлет-фильтром Добеши-4 на частотные компоненты

ским сигналам применена процедура много-ступенчатого разложения вейвлет-фильтром Добеши-4 [5] по схеме



Таким образом исходный сигнал  $S$  равняется сумме аппроксимирующей компоненты  $a_3$  и трёх детализирующих компонент  $d_i$

$$S = a_3 + d_1 + d_2 + d_3,$$

причём каждая из них занимает 1/4 частотной области сигнала. Выполненный анализ соотношений амплитуд в зафиксированных сигналах позволил установить, что около 90 % энергии колебаний сосредоточено в аппроксимирующей компоненте  $a_3$  (рис. 2). На

Принятый метод измерения позволил в зафиксированных сигналах выявить характерные особенности формирования звуковых излучений работающим двигателем (рис. 3). Так, в сигнале (рис. 3 б) и особенно в аппроксимирующей компоненте (рис. 3 а), достаточно чётко выделяются участки рабочего хода в каждом из цилиндров. За их начало (окончание) на оси времени  $t$  могут быть приняты моменты перехода через ноль аппроксимирующей компоненты (сигнала). Смоделированный дефект на аудиограмме (первый цилиндр) проявляется уменьшением максимального значения пика звукового сигнала в начале фазы выпуска  $h_1$  по сравнению с  $h_2 \div h_4$  (неполное сгорание в цилиндре), относительным увеличением фазы выпуска  $t_1$  по сравнению с  $t_2 \div t_4$  и значительной разницей в продолжительности фаз для каждого из цилиндров (рис. 3 а и 3 б). Так, при моделировании дефекта среднеквадратическое отклонение  $st_d = 0.00875$  с со средним значением продолжительности фазы  $mt_d = 0.05312$  с, что соответствует частоте

вращения коленчатого вала для четырёхтактного двигателя

$$n_d = \frac{30}{mt_d} = \frac{30}{0,05312} = 564,7 \text{ мин}^{-1},$$

в то время как в сигнале без дефекта среднеквадратическое отклонение  $st = 0.000945 \text{ с}$  со средним значением продолжительности фазы  $mt_d = 0.05263 \text{ с}$  (скорость вращения коленчатого вала  $n = 569.9 \text{ с}$ ). При выражении неравномерности продолжительности фаз в относительном виде

$$k_d = \frac{st_i}{mt_i}.$$

Значения коэффициентов  $k_d$ , соответственно, составят 0,1648 и 0,0180.

При обработке результатов испытаний решалась задача построения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ). Для сигналов из векторной формы  $S = \{s_i\}$  длиной  $N = 2^n$  алгоритмом быстрого Фурье-преобразования [4] выполнялся перевод в комплексную форму представления половинной длины ( $N/2$ )

$$C_k = A_k + jB_k,$$

где 
$$A_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} s_i \cos \frac{2\pi}{N} ki;$$

$$B_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} s_i \sin \frac{2\pi}{N} ki, \quad (i = 0, 1, 2, \dots, N-1).$$

Тогда, в соответствии с [3], амплитудно-частотная характеристика сигнала строилась как зависимость мощности амплитуд сигнала от спектральной частоты  $P(v_k)$ , где мощность амплитуд сигнала

$$P_k = |C_k| = \left\{ \sqrt{A_k^2 + B_k^2} \right\},$$

а спектральная частота

$$v_k = \frac{k}{SR \cdot N}.$$

Анализ АЧХ аудиограмм двигателя с учётом дискретного представления (см. рис. 3 в) показывает соответствие первого амплитудного максимума (частота  $v = 18.84 \text{ Гц}$ ) частоте протекания тактов рабочего хода

$$v_{px} = \frac{2 \cdot n_d}{60} = \frac{2 \cdot 564.7}{60} = 18.82 \text{ Гц},$$

а второго амплитудного максимума ( $v = 37,68 \text{ Гц}$ ) – удвоенной частоте тактов рабочего хода, при работе, как без дефекта, так и с дефектом в системе зажигания. Основное же отличие АЧХ аудиограммы двигателя с дефектом свечи зажигания **I** заключается в наличии значительно более интенсивных колебаний в области 60 до 240 Гц (рис. 3 в).

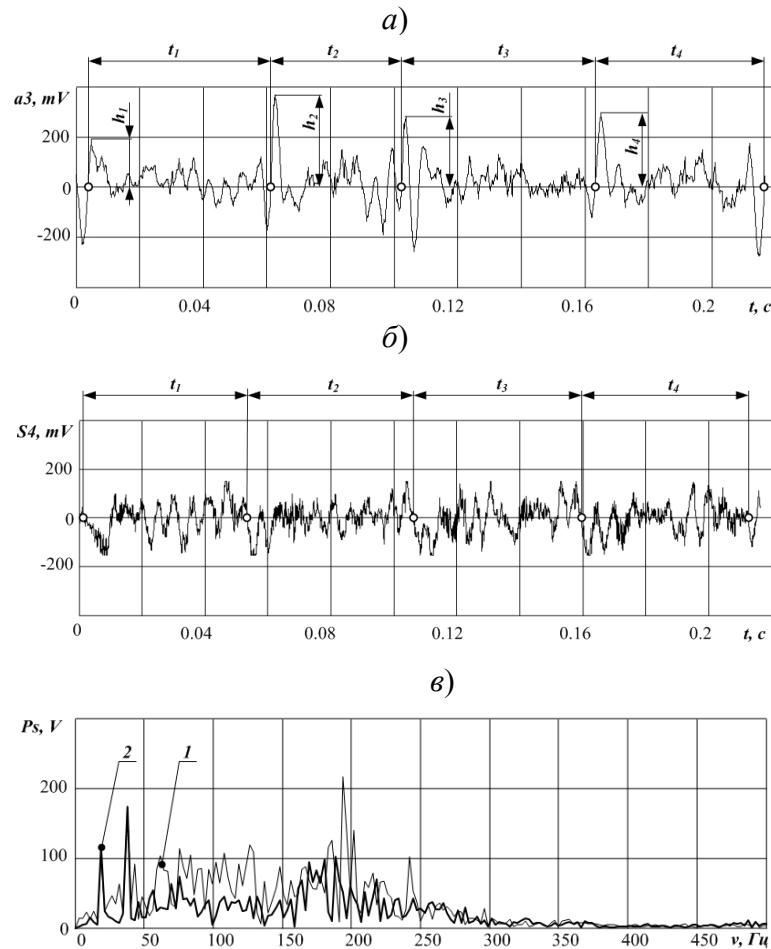


Рис. 3. Аудиограммы двигателя при скорости вращения коленчатого вала  $600 \text{ мин}^{-1}$ : *а* – схема оценки периодичности в аппроксимирующей компоненте (наличие дефекта); *б* – периодичность в основном сигнале без дефекта; *в* – амплитудно-частотные характеристики основных сигналов (1 – наличие дефекта; 2 – без дефекта)

В соответствии с изложенной методикой был проведен сравнительный анализ аудиограмм двигателя при скорости вращения коленчатого вала порядка  $2100$  и  $3500 \text{ мин}^{-1}$  (рис. 4). Статистическая обработка периодичности протекания тактов рабочего хода показала сохранение тенденции увеличения длины фазы звукового импульса дефектного цилиндра (табл. 1). Однако, при возрастании скорости вращения коленчатого вала изменение коэффициента неравномерности продолжительности фаз  $k_d$  носит параболический характер с наличием максимума в области  $1600 \text{ мин}^{-1}$  (рис. 5), с сохранением этой особенности как при наличии дефекта 1, так и без дефекта в системе зажигания 2.

Таблица 1

Параметры периодичности протекания тактов рабочего хода

	Наличие дефекта в системе зажигания					
	с дефектом			без дефекта		
Угловая скорость вала, $\text{мин}^{-1}$	564.7	1860.7	3274.7	569.9	2081.0	3328.3
Коэффициент неравномерности продолжительности фаз, $k_d$	0.1648	0.2462	0.0914	0.0180	0.0583	0.0063

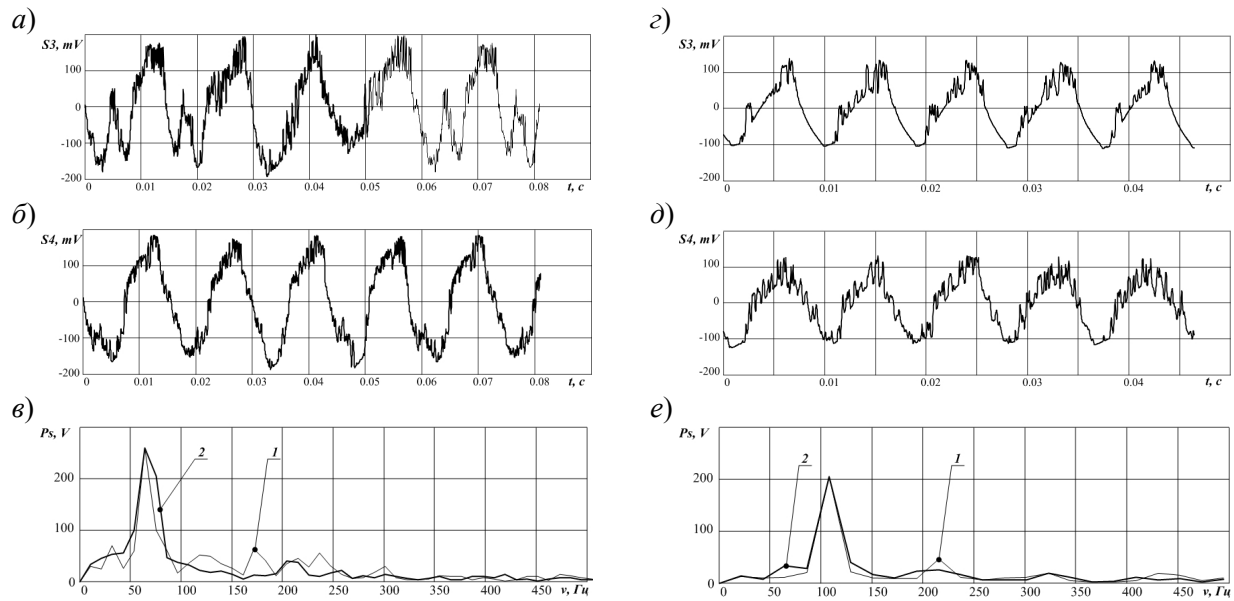


Рис. 4. Аудиограммы двигателя при скорости вращения коленчатого вала  $2100$  (а – в) и  $3500 \text{ мин}^{-1}$  (г – д):

а и г – периодичность в основном сигнале при наличии дефекта; б и д – периодичность в основном сигнале без дефекта; в – амплитудно-частотные характеристики основных сигналов (1 – наличие дефекта; 2 – без дефекта)

Визуально выявляемые максимумы в области  $120\text{--}240 \text{ Гц}$  на АХЧ, характеризующие наличие дефектов в системе зажигания, при увеличении скорости вращения вала двигателя с  $2100$  до  $3500 \text{ мин}^{-1}$  становится менее выразительными.

Помимо уменьшения коэффициента  $k_d$  со скорости  $1600 \text{ мин}^{-1}$  характер звуковых колебаний (рис. 4) двигателя при работе с дефектом и без становится всё более близким. Так, визуально локализуемые на скорости  $2100 \text{ мин}^{-1}$  участки дефектного первого цилиндра при скорости  $3500 \text{ мин}^{-1}$  не являются столь значительными. Амплитудные максимумы на АЧХ основной и удвоенной частоты тактов рабочего хода, как для  $2100$ , так и  $3500 \text{ мин}^{-1}$ , сливаются в один (рис. 4 в и 4 е), соответствующие частоте тактов рабочего хода ( $64,6$  и  $107,7 \text{ Гц}$ ). Визуально выявляемые дефекты в системе зажигания при скорости  $2100 \text{ мин}^{-1}$  на АЧХ максимумы в области  $120\text{--}240 \text{ Гц}$  при скорости  $3500 \text{ мин}^{-1}$  значительно уменьшаются.

Для выявления рациональных областей диагностирования неисправностей системы зажигания по относительным статистическим показателям для исследованного диапазона скорости вращения коленчатого вала двигателя были рассчитаны значения коэффициента регистрации неравномерности рабочего хода

$$k_p = \frac{k_{d1}}{k_{d2}},$$

где  $k_{d1}$  и  $k_{d2}$  – коэффициент неравномерности продолжительности фаз при наличии и без дефекта, соответственно.

При этом, числовые зависимости  $k_{d1}$  и  $k_{d2}$  от скорости вращения коленчатого вала получены аппроксимацией кубическими сплайнами (кривые 1 и 2 на рис. 5 а) экспериментальных данных (см. табл. 1).

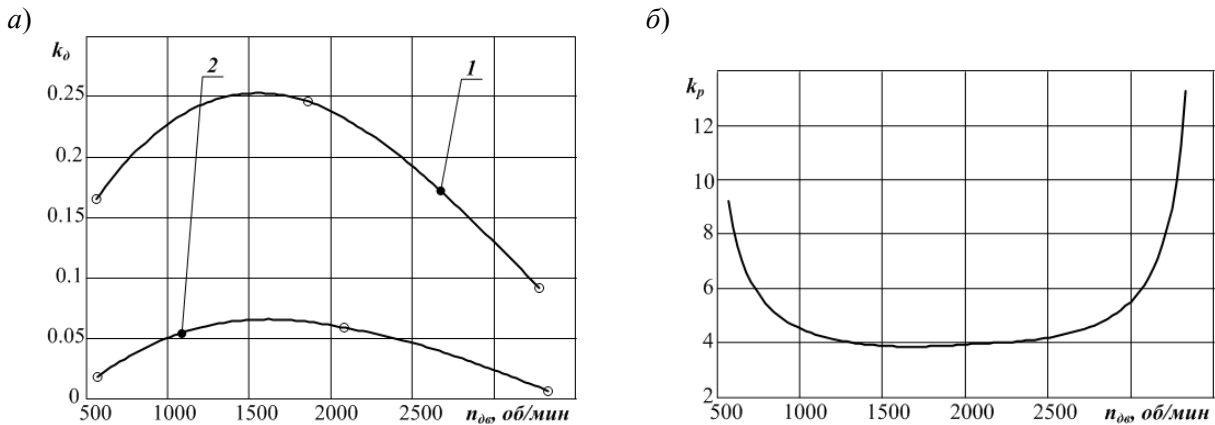


Рис. 5. Показатели неравномерности протекания тактов рабочего хода: *a* – коэффициент неравномерности продолжительности фаз (1 – наличие дефекта; 2 – без дефекта); *б* – коэффициент регистрации неравномерности рабочего хода

Особенностью графика  $k_p(n_{\delta e})$  (см. рис. 5 б) является наличие областей повышенных значений ( $k_p > 5$ ) при скорости вращения коленчатого вала до  $800 \text{ мин}^{-1}$  и свыше  $3000 \text{ мин}^{-1}$ , в которых при выполнении сравнительного диагностирования по параметрам периодичности протекания тактов рабочего хода надёжность выявления дефекта возрастает.

### Выводы

1. Проявление дефектов системы зажигания двигателя ВАЗ 2103 автомобиля ВАЗ 2106 заключается в возрастании неравномерности периодичности протекания тактов рабочего хода аудиограммы работы двигателя до величины коэффициента неравномерности 0,15–0,25 и увеличении амплитуды звуковых колебаний в области 100–240 Гц.

2. Для сравнительного диагностирования системы зажигания двигателя ВАЗ 2103 автомобиля ВАЗ 2106 по параметрам периодичности протекания тактов рабочего хода могут быть рекомендованы скорости вращения коленчатого вала до  $800 \text{ мин}^{-1}$  и свыше  $3000 \text{ мин}^{-1}$ .

### Список литературы

1. Римский-Корсаков А.В. Электроакустика. – М.: Связь, 1973. – 272 с.
2. Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов. – М.: Мир, 1976. – 757 с.
3. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / Пер. с англ. – Москва: Мир, 1990. – 387 с.
4. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – Санкт-Петербург: Питер, 2002. – 608 с.
5. Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 304 с.

Стаття надійшла до редакції 12.05.06  
© Оксень Е.И., д.т.н., Гарачук А.В., Быков В.В., 2006