

УДК 631.3.004.67

DOI 10.52928/2070-1616-2026-53-1-46-50

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АГРЕГАТОВ  
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ОБСЛЕДОВАНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ**

**д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ, В.А. ЗЕНЬКОВ**  
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

*Рассмотрено определение технического состояния наиболее сложного автомобильного агрегата (двигателя) по результатам наблюдения за износом кулачков распределительного вала, который находится в поле зрения диагноста без разборки агрегата. Этот показатель является, с одной стороны, и структурным, и диагностическими параметром, с другой – обладает тесной корреляционной связью с наработкой агрегата. Подчеркнута важность восстановления кулачков распределительного вала путем нанесения покрытия на всю рабочую поверхность с последующим копирным шлифованием профиля, обеспечивающим геометрические параметры, установленные заводом-изготовителем. Эта особенность влияет в эксплуатации на мощность, развиваемую двигателем, и расход топлива.*

**Ключевые слова:** диагностирование, агрегат, автомобильный двигатель, параметр, статистическое распределение.

**Введение.** Диагностирование технического объекта заключается в безразборном определении его технического состояния путем измерения диагностических параметров и сопоставления их значений с допустимыми или предельными с целью поиска неисправностей, установления остаточного ресурса и объема ремонтных работ. Техническое состояние агрегата непосредственно характеризуют изменяющиеся при его использовании структурные параметры (размеры элементов деталей, зазоры или натяги в соединениях деталей и др.), однако определить их без разборки агрегата, как правило, не представляется возможным. В практике для целей диагностирования применяют диагностические параметры (температуру, расход и давление сред, значения перемещений деталей, амплитуду и частоту вибраций стенок корпусных деталей и др.), которые функционально связаны со структурными параметрами, но характеризуют техническое состояние объекта косвенно. Связи между структурными и диагностическими параметрами оценивают значимостью соответствующих коэффициентов корреляции. Некоторые диагностические параметры, например, виброакустические, также измерить затруднительно, а их интерпретация требует высокой квалификации диагноста.

Все детали и соединения агрегата работают и изнашиваются одновременно, но с различной интенсивностью, что позволяет по результатам наблюдения за параметрами отдельных деталей или соединений принимать решения о техническом состоянии всего агрегата. Так, выявлена тесная корреляционная связь между износами отдельных деталей агрегатов и изменениями зазоров в основных соединениях [1]. Проведение диагностирования по результатам исследования параметров отдельных основных деталей агрегата вызвано необходимостью уменьшить трудоемкость и сложность работ и повысить объективность прогноза.

**Цель работы:** уменьшение трудоемкости диагностирования автомобильных агрегатов на примере двигателей с повышением достоверности прогноза.

**Оборудование, приборы и методы.** В качестве объекта исследования рассматривались наиболее сложные автомобильные агрегаты – бензиновые и дизельные двигатели, по результатам обследования кулачков распределительных валов.

Диаметры опорных шеек распределительных валов, цилиндрической части кулачков и разность их размеров ( $A - B$ ) определяли с помощью микрометра МР 25–50<sup>1</sup>. Несоосность опорных шеек измеряли на индикаторном стенде 1К4–025. Средства измерений выбирали по методу безошибочности контроля [2], сопоставляя между собой номинальные размеры элементов деталей, их допуски и погрешности измерений. Допускаемые погрешности измерений при приемочном контроле элементов деталей с линейными размерами до 500 мм устанавливает ГОСТ 8.051-81<sup>2</sup>. Эти погрешности приняты равными 20–35% от допуска на соответствующие размеры детали. Минимальное число измерений  $n_{\min}$  (объем выборки) определяли по формуле<sup>3</sup>

$$n_{\min} = \frac{\sigma^2 t_{\beta}^2}{\varepsilon^2},$$

где  $\sigma^2$  – статистическая оценка дисперсии случайной величины;  $t_{\beta}$  – табличный (табулированный коэффициент, зависящий от заданной (доверительной) вероятности  $\beta$ , принятой 95%;  $\varepsilon$  – доверительный интервал значений, который покрывает неизвестный параметр.

<sup>1</sup> ГОСТ 4381-87. Микрометры рычажные. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1997. – 15 с

<sup>2</sup> ГОСТ 8.051-81. Погрешности, допускаемые при измерении линейных размеров до 500 мм. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 12 с.

<sup>3</sup> ГОСТ 17510-79. Надежность в технике. Система сбора и обработки информации. Планирование наблюдений. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 25 с.

Расчет объемов исследовательских выборок приведен в таблице 1. Сведения об измерениях элементов деталей изображались в виде эмпирических полигонов распределений, к каждому из которых подбирался один из наиболее подходящих теоретических законов распределения из числа: нормального, Вейбулла, показательного, Релея и гамма-распределения [1]. Соответствие теоретических распределений данным экспериментов определяли с помощью критерия Пирсона  $\chi^2$ .

Таблица 1. – Сведения для определения объемов выборок распределительных валов для исследования их технического состояния

Параметры	Двигатель ЗМЗ-53				Двигатель Д-240			
	$\varepsilon$	$\sigma^2$	Объем выборки		$\varepsilon$	$\sigma^2$	Объем выборки	
			$n_{min}$	принятый			$n_{min}$	принятый
Диаметр опорных шеек	0,01	0,00125	48	84	0,01	0,00054	21	62
Несоосность опорных шеек	0,01	0,00057	21	164	–	–	–	–
Диаметр цилиндрической части кулачков	0,01	0,00166	64	65	0,01	0,00045	17	62
Разность размеров А и В кулачков	0,01	0,00141	54	86	0,01	0,00138	53	80

Мощность  $N$ , развиваемую двигателем, рассчитывали с использованием показаний силомера и тахометра обкаточно-тормозного стенда КИ-2139Б по формуле

$$N = 10^{-3} Pn, \text{ л.с.}, \tag{1}$$

где  $P$  – реактивное усилие на статоре электромашины, фиксируемое силомером стенда на плече длиной 0,7162 м, кгс;  $n$  – частота вращения коленчатого вала, мин<sup>-1</sup>.

Обкаточно-тормозной стенд оснащен устройством для измерения удельного эффективного расхода топлива  $g$ , который определяли как

$$g = m / Nt, \text{ г/эф. л.с.}\cdot\text{ч}, \tag{2}$$

где  $m$  – масса порции расходуемого топлива, г;  $t$  – время сжигания порции топлива, ч.

**Основная часть.** Для некоторых деталей, в частности, находящихся в поле зрения без разборки агрегатов, структурные параметры совпадают с диагностическими. В этом случае техническое состояние агрегата может быть оценено по результатам обследования этих деталей. К таким деталям относят распределительные валы двигателей.

Распределительный вал – сравнительно долговечная деталь автомобильного двигателя. Она не бывает источником рекламационных отказов в гарантийный период эксплуатации, ее не заменяют в эксплуатации, а восстанавливают при капитальном ремонте двигателя. Доля годных распределительных валов при поступлении двигателей в капитальный ремонт составляет около 50%. Техническое состояние этой детали существенно влияет на технико-экономические показатели двигателя – мощность и расход топлива.

Результаты статистического анализа технического состояния распределительных валов приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Результаты статистического анализа технического состояния распределительных валов двигателей

Параметры	Двигатель ЗМЗ-53				Двигатель Д-240			
	Законы распределения параметров в дифференциальном и интегральном выражениях, доли годных деталей	Критерий $\chi^2$		Законы распределения параметров в дифференциальном и интегральном выражениях, доли годных деталей	Критерий $\chi^2$			
		расчетный	табличный		расчетный	табличный		
1	2	3	4	5	6	7		
Износ $\Delta x$ опорных шеек	Вейбулла (рисунок 1, а) $f(\Delta x) := 25,936 \exp \left[ - \left( \frac{\Delta x}{0,063} \right)^{1,634} \right] \left( \frac{\Delta x}{0,063} \right)^0$ $F(\Delta x) := 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\Delta x}{0,063} \right)^{1,634} \right];$ $F(0,03) = 0,258$	1,128	3,84	Вейбулла (рисунок 1, б) $f(\Delta x) := 39,351 \exp \left[ - \left( \frac{\Delta x}{0,042} \right)^{1,653} \right] \left( \frac{\Delta x}{0,042} \right)^0$ $F(\Delta x) := 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\Delta x}{0,042} \right)^{1,653} \right];$ $F(0,03) = 0,436$	0,102	3,84		
Несоосность $\Delta a$ опорных шеек	Вейбулла (рисунок 2) $f(\Delta a) := 38,667 \exp \left[ - \left( \frac{\Delta a}{0,054} \right)^{2,088} \right] \left( \frac{\Delta a}{0,054} \right)^1$ $F(\Delta a) := 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\Delta a}{0,054} \right)^{2,088} \right];$ $F(0,02) = 0,118$	8,410	12,60	–	–	–		

Окончание таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7
Отклонение $\Delta x$ цилиндрической части кулачков от номинального значения	Вейбулла (рисунок 3, а) $f(\Delta x) := 6,568 \exp \left[ - \left( \frac{\Delta x}{0,285} \right)^{1,674} \right] \left( \frac{\Delta x}{0,285} \right)^{0,4}$ $F(\Delta x) := 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\Delta x}{0,285} \right)^{1,674} \right];$ $F(0,30) = 0,664$	3,139	7,81	показательный (рисунок 3, б) $f(\Delta x) := 8,290 e^{-8,290 \Delta x}$ $F(\Delta x) := 1 - e^{-8,290 \Delta x};$ $F(0,40) = 0,964$	1,23	5,99
Разность размеров (А - В) выпускных кулачков	Вейбулла (рисунок 4, а) $f(A-B) := 5,093 \exp \left[ - \left( \frac{A-B}{0,352} \right)^{1,793} \right] \left( \frac{A-B}{0,352} \right)^{0,793}$ $F(A-B) := 1 - \exp \left[ - \left( \frac{A-B}{0,352} \right)^{1,793} \right];$ $F(0,30) = 0,528$	3,056	9,49	Вейбулла (рисунок 4 б) $f(A-B) := 2,463 \exp \left[ - \left( \frac{A-B}{0,705} \right)^{1,737} \right] \left( \frac{A-B}{0,705} \right)^{0,737}$ $F(A-B) := 1 - \exp \left[ - \left( \frac{A-B}{0,705} \right)^{1,737} \right]$ $F(0,50) = 0,423$	6,172	7,83
Разность размеров (А - В) впускных кулачков	Вейбулла (рисунок 5) $f(A-B) := 4,039 \exp \left[ - \left( \frac{A-B}{0,303} \right)^{1,224} \right] \left( \frac{A-B}{0,303} \right)^{0,224}$ $F(A-B) := 1 - \exp \left[ - \left( \frac{A-B}{0,303} \right)^{1,224} \right];$ $F(0,30) = 0,628$	2,160	5,99			

Наблюдается более равномерный и меньший по значению износ опорных шеек, связанный линейной зависимостью с зазором в соединении шейка-втулка (рисунок 1) по сравнению с износом шеек коленчатых валов [3]. Радиальное биение поверхности средней опорной шейки вала относительно поверхностей крайних шеек показано на рисунке 2. Шейки и кулачки распределительных валов дизельных двигателей шлифуют реже, чем одноименные элементы бензиновых двигателей.

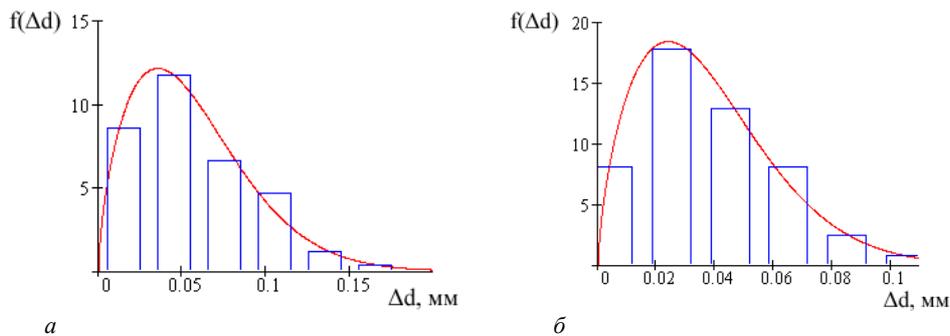


Рисунок 1. – Полигон и плотность вероятности распределения  $f(\Delta d)$  распределительных валов двигателей ЗМЗ-53 (а) и Д-240 (б) по максимальному износу  $\Delta d$  опорных шеек

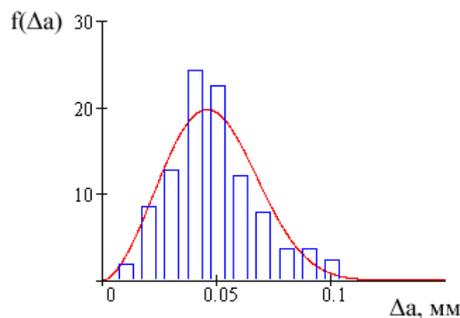
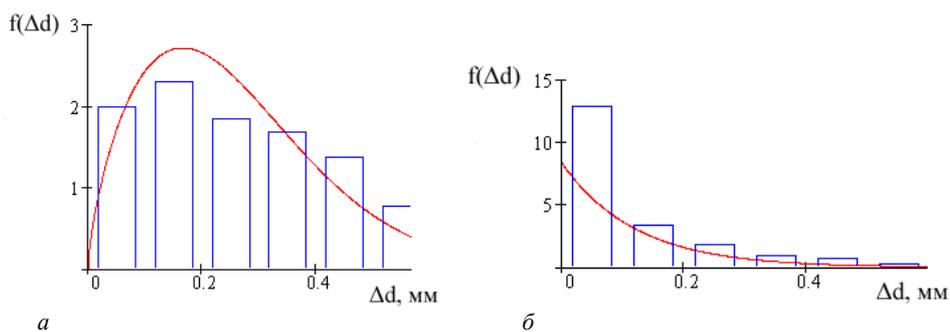
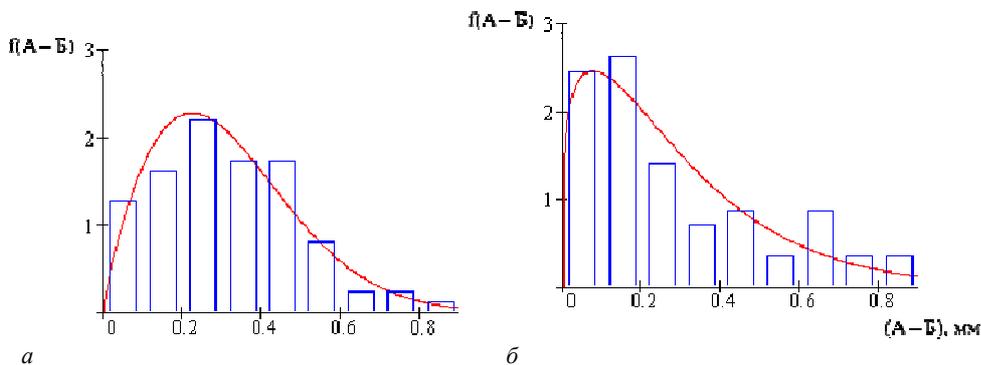


Рисунок 2. – Полигон и плотность вероятности распределения  $f(\Delta a)$  распределительных валов двигателей ЗМЗ-53 по отклонению от соосности  $\Delta a$  средней опорной шейки относительно крайних опорных шеек

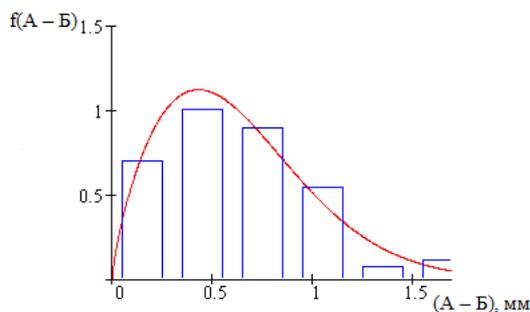
Диаметр цилиндрической части кулачков и разность размеров  $(A - B) = h$  у двигателя с расположением распределительного вала в головке цилиндров легко определить без разборки двигателя (здесь  $A$  – наибольший размер кулачка,  $B$  – диаметр цилиндрической части кулачка,  $h$  – высота подъема клапана). У двигателей с расположением распределительного вала в блоке цилиндров размер  $(A - B)$  определяют измерением длины перемещения толкателя  $h$  с помощью индикаторного прибора. Значимой разницы между износами впускных и выпускных кулачков нет. Кулачки практически не изнашиваются по цилиндрической части, где трение незначительно по причине того, что при закрытом клапане усилие от сжатой клапанной пружины на кулачок не передается. Изменение размеров указанных элементов обусловлено копирным шлифованием кулачков при восстановлении валов (рисунке 3). Наблюдается значительный износ вершин кулачков (до 0,75 мм для двигателей ЗМЗ-53, рисунок 4; и до 1,0 мм для двигателей Д-240, рисунок 5). Это явление объясняется тем, что при работе двигателя на вершину кулачка, имеющую минимальный радиус кривизны профиля, приходится максимальное радиальное усилие до отказа сжатой пружины клапана, а условия смазывания в этом случае самые неблагоприятные.



**Рисунок 3. – Полигон и плотность вероятности распределения  $f(\Delta d)$  распределительных валов двигателей ЗМЗ-53 (а) и Д-240 (б) по отклонению  $\Delta d$  диаметра цилиндрической части кулачков от номинального значения**



**Рисунок 4. – Полигон и плотность вероятности распределения  $f(A - B)$  распределительных валов двигателей ЗМЗ-53 по разности размеров  $(A - B)$  выпускных (а) и впускных (б) кулачков**



**Рисунок 5. – Полигон и плотность вероятности распределения  $f(A - B)$  распределительных валов двигателей Д-240 по разности размеров «А – В» кулачков**

Таким образом, вершины кулачков распределительного вала – наиболее изнашиваемые элементы детали, а параметр  $(A - B)$  из всех параметров вала, одновременно являясь как диагностическим, так и структурным параметром, – самый изменчивый. Если считать, что в течение срока службы агрегата уменьшение параметра  $(A - B)$  пропорционально наработке агрегата до предельного состояния, то по значению этого уменьшения легко вычисляются остаточный ресурс агрегата и значение наработки, при которых двигатель необходимо направить в капитальный ремонт или списать.

При изучении технического состояния двигателя УМЗ-451М был проведен следующий эксперимент. На двигатель последовательно установили распределительные валы: новый и вал с кулачками, которые были подвергнуты копирному шлифованию на станке 3М433 с получением размеров цилиндрической части кулачков на 1 мм меньше номинальных. При этом были выдержаны нормативная разница размеров кулачков  $(A - B)$  и их профилей, тем самым и высота подъема клапанов. При работе двигателей под нагрузкой на обкаточно-тормозном стенде КИ-2139Б для каждого случая измерялись развиваемая двигателем мощность (формула (1)) и удельный расход топлива (формула (2)) при частоте вращения коленчатого вала  $2500 \text{ мин}^{-1}$ . При новой детали и детали со шлифованными кулачками показания силомера стенда составляли 23 и 19,5 кгс, соответственно, т.е. двигатель развивал в каждом случае мощность 57,5 и 47,5 л.с., а время сжигания навески топлива массой 300 г составляло 72 и 70 с, т.е. удельный эффективный расход топлива равнялся 261 и 324 г/эф. л.с.ч. Таким образом, уменьшение развиваемой максимальной мощности двигателем при использовании вала со шлифованными кулачками составило 17%, а увеличение удельного расхода топлива – 24%. Результат объясняется недопустимым уменьшением параметра «время–сечение» подъема клапанов [4]. Полученные данные подчеркивают сохранение технико-экономических показателей работы двигателя в эксплуатации за счет восстановления кулачков распределительного вала нанесением покрытия на всю поверхность кулачков, например, газопорошковым напылением, а не просто обработкой их эквидистантным шлифованием, как это делается на большинстве предприятий.

**Заключение.** Обоснована возможность определения технического состояния агрегата по результатам наблюдения за изменением параметров отдельных, наиболее изнашиваемых, деталей, которые находятся в поле зрения диагноста без разборки агрегата. Эти параметры, с одной стороны, должны являться одновременно как структурными, так и диагностическими, с другой – обладать тесной корреляционной связью с наработкой агрегата. Установлена важность восстановления кулачков распределительного вала путем нанесения покрытия на всю рабочую поверхность с последующим копирным шлифованием, обеспечивающим геометрические параметры, установленные заводом-изготовителем. Это существенно влияет в эксплуатации на мощность, развиваемую двигателем, и на расход топлива.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гурвич И.Б., Сыркин П.Э. Эксплуатационная надежность автомобильных двигателей. – М.: Транспорт, 1984. – 141 с.
2. Точность и производственный контроль в машиностроении: Справочник / И.И. Болонкина, А.К. Кутай, Б.М. Сорочкин и др.; под общ. ред. А.К. Кутая, Б.М. Сорочкина. – Л.: Машиностроение, 1983. – 368 с.
3. Кастрюк А.П. Техническое состояние деталей ремонтного фонда двигателей // Инновационные технологии в машиностроении: материалы междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 35-летию машиностроит. фак. ПГУ / Новополоцк (19–20 окт. 2011 г.) / Полоц. гос. ун-т; под общ. ред. А.И. Гордиенко, В.К. Шелега. – Новополоцк, 2011. – С. 39–42.
4. Шароглазов Б.А., Фарафонов М.Ф., Клементьев В.В. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчет процессов: учеб. – Челябинск: Изд. ЮжУрГУ. – 2005. – 403 с.

Поступила 05.01.2026

#### DETERMINING THE TECHNICAL CONDITION OF UNITS BASED ON THE RESULTS OF INSPECTION OF INDIVIDUAL PARTS

V. IVANOV, V. ZENKOV  
(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

*This paper examines the determination of the technical condition of the most complex automotive unit (engine) based on the results of monitoring camshaft cam wear, which is visible to the diagnostician without disassembling the unit or where removal of the camshaft is possible with minimal effort. This parameter, on the one hand, serves both structural and diagnostic purposes, and, on the other, is closely correlated with the unit's operating life. The importance of restoring the camshaft cams by applying a coating over the entire working surface followed by copy grinding, ensuring the geometric parameters specified by the manufacturer, is also established. This feature affects the engine's power output and fuel consumption during operation.*

**Keywords:** diagnostics, unit, automotive engine, parameter, statistical distribution.