

УДК 006.91

Н.Ж. ШКАРУБА

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева

ОЦЕНКА СХОДИМОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПРИ ДЕФЕКТАЦИИ ДИАМЕТРОВ ШЕЕК КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА

Одним из факторов, определяющих качество капитального ремонта двигателей, является качество измерений. Оценка качества измерений – трудоемкий процесс, при его реализации можно опираться на рекомендации, представленные в ГОСТ Р 51814.5-2005. При применении методики, описанной в данном стандарте, для оценки качества измерений в ремонтном производстве возникает ряд трудностей, что связано с существенными отличиями от измерений в машиностроении и автомобилестроении. Одна и та же методика и одни и те же средства измерения применяют для контроля как изношенных, так и новых и отремонтированных деталей двигателя. Актуальность указанных выше проблем указывает на необходимость адаптации методики оценки качества измерительных процессов применительно к ремонтному производству.

В статье рассмотрена методика сбора и обработки измерительной информации основных статистических характеристик, используемых для оценки качества и приемлемости измерительных процессов применительно к ремонтному производству. При оценке сходимости и воспроизводимости измерительного процесса использован метод дисперсий, позволяющий провести более детальный анализ.

Методика оценки качества измерений позволяет определить приемлемость рекомендуемых в нормативной документации методов и средств измерений на различных этапах технологического процесса капитального ремонта двигателей.

Результаты анализа приемлемости измерительного процесса при дефектации шеек коленчатых валов двигателей ЯМЗ в условиях ремонтного предприятия свидетельствуют о приемлемости данного измерительного процесса в целом. Наибольший вклад в изменчивость измерительного процесса диаметров изношенных шеек коленчатых валов вносит изменчивость образца. На втором месте по влиянию изменчивости измерительного процесса находится сходимость результатов измерений. Доля влияния изменчивости от оператора также довольно существенна.

Ключевые слова: качество измерений; результат испытаний; воспроизводимость; повторяемость; воспроизводимость стандартного отклонения.

В общем виде методика оценки приемлемости измерительных процессов представлена в ГОСТ Р 51814.5-2005 [1]. Применение этой методики для ремонтного предприятия будет иметь ряд специфических отличий [2]. Кроме этого, предложенная методика может быть рассмотрена как элемент системы менеджмента измерений предприятия [3, 4].

Основными статистическими характеристиками приемлемости измерительного процесса являются сходимость и воспроизводимость. Для оценивания сходимости и воспроизводимости измерительного процесса используют несколько методов: метод размахов, метод средних и размахов и метод дисперсий. Самым точным и трудоемким является метод дисперсий.

Для оценивания статистических характеристик измерительного процесса, отбирают N образцов и

M операторов. Измерение выборки каждым из операторов повторяют Q . По окончании эксперимента массив данных должен содержать ровно Q повторных измерений каждого из N образцов каждым из M операторов, в котором каждое значение X_{ijk} – результат k -го измерения (попытки) i -го образца j -м оператором. Таким образом, индекс i обозначает номер образца от 1 до N , индекс j – номер оператора от 1 до M , k – номер измерения (попытки) каждого образца каждым оператором от 1 до Q .

Оценку дисперсии S_e^2 средств измерительной техники (сходимости) определяют по формуле:

$$S_e^2 = \frac{1}{NM(Q-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^Q (X_{ijk} - \bar{X}_{ij*})^2, \quad (1)$$

где $NM(Q-1)$ – число степеней свободы.

Оценку дисперсии S_o^2 операторов (воспроизводимости) определяют по формуле:

$$S_o^2 = \frac{NQ}{M-1} \sum_{j=1}^M (\bar{X}_{*j*} - \bar{X}_{***})^2, \quad (2)$$

где $M-1$ – число степеней свободы.

Оценку дисперсии S_p^2 образцов рассчитывают по формуле:

$$S_p^2 = \frac{MQ}{N-1} \sum_{i=1}^N (\bar{X}_{i**} - \bar{X}_{***})^2, \quad (3)$$

где $N-1$ – число степеней свободы.

Оценку дисперсии S_{op}^2 взаимодействия операторов и образцов рассчитывают по формуле:

$$S_{op}^2 = \frac{Q}{(N-1)(M-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (\bar{X}_{ij*} - \bar{X}_{i**} - \bar{X}_{*j*} + \bar{X}_{***})^2, \quad (4)$$

где $(N-1)(M-1)$ – число степеней свободы.

Значимость влияния взаимодействия оператора и образца на изменчивость результатов измерений можно оценить по следующему алгоритму.

Рассчитывается соотношение:

$$F = \frac{S_{op}^2}{S_e^2}. \quad (5)$$

По таблице F -распределения (распределения Фишера-Снедекора) [4] при уровне значимости $\alpha = 0,05$ определяют критическое значение распределения $F_a(k_1, k_2)$, где k_1 – число степеней свободы большей дисперсии (из S_{op}^2 и S_e^2), k_2 – число степеней свободы меньшей дисперсии (из S_{op}^2 и S_e^2). Числа степеней свободы S_{op}^2 и S_e^2 равны $(N-1)(M-1)$ и $NM(Q-1)$ соответственно. Если $F < F_a(k_1, k_2)$, то влияние изменчивости взаимодействия между оператором и образцом признается незначимым и в дальнейших расчетах не участвует. В противном случае влияние изменчивости взаимодействия между оператором и образцом признается значимым.

Для составляющих изменчивости измерительного процесса на заданном уровне значимости α рассчитывают доверительные интервалы.

Сходимость EV (повторяемость) результатов измерений рассчитывают по формуле:

$$EV = K_\alpha \cdot S_e. \quad (6)$$

Воспроизводимость AV (изменчивость от операторов) результатов измерений рассчитывают по формуле:

$$EV = K_\alpha \sqrt{\frac{S_o^2 - S_{op}^2}{NQ}}. \quad (7)$$

Изменчивость PV образцов рассчитывают по формуле:

$$PV = K_\alpha \cdot S_p. \quad (8)$$

При анализе изменчивости по методу дисперсий в случае, если влияние взаимодействия между оператором и образцом признано значимым, формула для расчета изменчивости образцов имеет вид:

$$PV = K_\alpha \sqrt{\frac{S_p^2 - S_e^2}{MQ}}. \quad (9)$$

Изменчивость INT , обусловленную взаимодействием операторов и образцов, рассчитывают по формуле:

$$INT = K_\alpha \sqrt{\frac{S_{op}^2 - S_e^2}{Q}}. \quad (9)$$

Сходимость и воспроизводимость $R\&R$ результатов измерений рассчитывают по формуле:

$$R\&R = \sqrt{EV^2 + AV^2 + INT^2}. \quad (10)$$

Полную изменчивость TV измерительного процесса рассчитывают по формуле:

$$TV = \sqrt{R\&R^2 + PV^2}. \quad (11)$$

Приемлемость измерительного процесса, применяемую для оценки соответствия измеряемого параметра образца допуску на него, определяют исходя из анализа величины относительной сходимости и воспроизводимости $\%R\&R_{SL}$, рассчитываемой по формуле:

$$\%R\&R_{SL} = \frac{R\&R}{USL - LSL} 100, \quad (12)$$

где USL, LSL – верхняя и нижняя контрольные границы измеряемого параметра.

Для более полного анализа измерительного процесса вычисляют относительные значения составляющих изменчивости (сходимость, воспроизводимость, изменчивость образца, взаимодействие оператора и образца) по формулам:

$$\%EV_{TV} = \frac{EV}{TV} 100; \quad (13)$$

Таблица 1

$$\%AV_{TV} = \frac{AV}{USL - LSL} 100; \quad (14)$$

$$\%PV_{TV} = \frac{PV}{TV} 100. \quad (15)$$

При подстановке в формулы вместо полной изменчивости измерительного процесса величины допуска получают относительную изменчивость составляющих процесса относительно допуска.

Рассмотрим применение метода дисперсий на примере оценки приемлемости измерительного процесса при дефектации шеек коленчатых валов. Для эксперимента были выбраны коленчатые валы от двигателей ЯМЗ-238, поступивших на 1-й капитальный ремонт.

В рекомендациях на капитальный ремонт двигателей ЯМЗ для контроля износа диаметров коренных и шатунных шеек коленчатых валов указано средство измерения – скоба рычажная. Реально это средство измерения для контроля износа применить невозможно, т.к. в принципе работы рычажной скобы заложен дифференциальный метод сравнения с мерой (или относительный). Поэтому для настройки этого прибора необходимо знать априори номинальный размер, который используется для расчета установочного размера. При дефектации деталей нельзя заранее знать номинальное значение, поэтому настроить прибор не получится. Таким образом, ясно, что при дефектации нельзя использовать приборы, реализующие дифференциальный (относительный) метод измерения, что значительно ограничивает выбор измерительного прибора.

С учетом вышесказанного наиболее подходящим средством измерения, близким к рычажной скобе по точности, является рычажный микрометр. С помощью рычажного микрометра можно провести измерения как дифференциальным (относительным) методом, так и методом непосредственной оценки (абсолютным), что в условиях проведения дефектации является очень важным.

На каждом валу измеряются по две шатунные и две коренные шейки. Измерения диаметров шатунных и коренных шеек проводят три оператора, каждый из них повторяет измерения по три раза (методика измерения диаметров шеек коленчатых валов описана [5]).

Производим расчет оценок дисперсий, составляющих изменчивости данного измерительного процесса, по формулам 1–4. Поскольку дисперсия выборки равна квадрату среднее квадратического отклонения (СКО) этой выборки, то полученные данные можно преобразовать в соответствующие значения СКО. Результаты заносим в таблицу 1.

По формуле (5) оцениваем значимость влияния взаимодействия оператора и образца на изменчивость результатов измерений:

- шатунная шейка $F = 0,19 < F_a = 1,85$;
- коренная шейка $F = 0,21 < F_a = 1,85$.

Результаты расчетов оценок СКО результатов измерений диаметров изношенных шеек коленчатых валов

Составляющая изменчивости	Оценка СКО, мм	
	шатунная шейка	коренная шейка
Сходимость (повторяемость изменчивости ИС)	0,0023	0,0027
Воспроизводимость (изменчивость от оператора)	0,0011	0,0015
Изменчивость параметров образца	3,5968	3,8491
Взаимодействие оператора и образца	0,0010	0,0013

И для шатунной, и для коренной шейки выполняется условие $F < F_a(k_1, k_2)$, поэтому влияние изменчивости взаимодействия между оператором и образцом можно признать незначимым и в дальнейших расчетах не учитывать.

По формулам 6, 7 и 8 рассчитываем составляющие изменчивости измерительного процесса. Значение коэффициента K_a , определяем, исходя из уровня значимости α и таблицы значений функции Лапласа [1]. Для уровня значимости $\alpha = 0,99$ – значение $K_a = 5,15$. Результаты расчетов представим в таблицу 2.

Таблица 2

Результаты расчетов составляющих изменчивости результатов измерений диаметров изношенных шеек коленчатых валов

Составляющая изменчивости	Составляющие изменчивости, мм	
	шатунная шейка	коренная шейка
Сходимость (повторяемость изменчивости ИС), EV	0,0119	0,0139
Воспроизводимость (изменчивость от оператора), AV	0,0055	0,0078
Изменчивость параметров образца, PV	6,174	6,607

Оценка приемлемости измерительного процесса заключается в сравнении его сходимости и воспроизводимости с полем допуска или полной изменчивостью измеряемого параметра образца. Для процесса дефектации определение допуска является очень спорным, так как нет однозначного

Таблица 4

Результаты расчетов относительных составляющих изменчивости измерительного процесса диаметров изношенных шеек коленчатых валов

Составляющая изменчивости	Составляющие изменчивости, %	
	шатунная шейка	коренная шейка
Относительная сходимос-ть (повторяемость) результатов, $\%EV_{TV}$	19,86	23,31
Относительная изменчивость от оператора, $\%AV_{TV}$	9,18	13,04
Относительная изменчивость параметров образца, $\%PV_{TV}$	30872,4	33038,2

ответа о том, что следует принимать за допуск при дефектации: допуск на износ, допуск новой детали, припуск на обработку. При оценке приемлемости измерительного процесса дефектации следует сравнивать сходимости и воспроизводимости не с полем допуска новой шейки вала, а с припуском на обработку, который составляет 0,06 мм, т.к. при дефектации необходимо определить возможность восстановления шейки под ремонтный размер с учетом именно этого размера.

Используя значения из таблицы 3 и формулы 10, 11, 12, находим сходимость и воспроизводимость результатов измерений, полную изменчивость измерительного процесса и относительную сходимость и воспроизводимость измерительного процесса. Полученные результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты расчетов приемлемости измерительного процесса диаметров изношенных шеек коленчатых валов

Составляющая изменчивости	Составляющие изменчивости, мм	
	шатунная шейка	коренная шейка
Сходимость и воспроизводимость результатов измерений, $R \& R$	0,0119	0,0139
Полная изменчивость измерительного процесса, TV	0,0055	0,0078
Относительная сходимость и воспроизводимость измерительного процесса, $\%R \& R_{SL}$	18,52	19,82

На основании полученных значений можно сделать вывод о том, что измерительный процесс может быть приемлем в зависимости от важности применения, стоимости средств измерительной техники и т.п.

Для более полного анализа измерительного процесса по формулам 13, 14, 15 определяем относительные значения составляющих изменчивости (сходимость, воспроизводимость, изменчивость образца). Полученные значения сводим в таблицу 4.

Полученные показатели свидетельствуют о приемлемости данного измерительного процесса в целом.

Из полученных результатов следует, что наибольший вклад в изменчивость измерительного процесса диаметров изношенных шеек коленчатых валов вносит изменчивость образца. На эту составляющую изменчивости повлиять практически невозможно, т.к. в процессе дефектации размеры

деталей имеют значительный разброс, который зависит от степени износа. На втором месте по влиянию изменчивости измерительного процесса находится сходимость результатов измерений. На это значение наибольшее влияние оказывают средство и метод измерения, поэтому для снижения изменчивости измерительного процесса следует изменить метод измерения или выбрать более точное средство измерения. Доля влияния изменчивости от оператора также довольно существенна.

Таким образом, желательно заменить средство измерений на более точное, чтобы снизить изменчивость измерительного процесса и провести дополнительное обучение по методике микрометража деталей при дефектации с операторами, выполняющими измерения.

Библиографический список

- ГОСТ Р 51814.5-2005 «Системы менеджмента качества в автомобилестроении. Анализ измерительных и контрольных процессов».
- Леонов О.А., Бондарева Г.И., Шкаруба Н.Ж. Оценка качества измерительных процессов в ремонтном производстве // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина». 2013. № 2. С. 36–38.
- Шкаруба Н.Ж., Левчанова Е.А. Анализ основных элементов системы менеджмента измерений // Международный технико-экономический журнал. 2014. № 5. С. 41–46.
- Шкаруба Н.Ж. Современные организационные подходы к метрологическому обеспечению ремонтного производства // Вестник Федерально-

го государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина». 2013. № 3. С. 41–44.

5. Шкаруба Н.Ж. Техничко-экономические критерии выбора универсальных средств измерения при ремонте сельскохозяйственной техники: Монография. М.: МГАУ, 2009. 120 с.

Шкаруба Нина Жоровна – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры метрологии, стандартизации и управления качеством Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К.А. Тимирязева, Институт механики и энергетики имени В.П. Горячкина; тел.: 8-916-606-23-59; e-mail: nina_sh@mail.ru.

EVALUATION OF THE PRECISION AND REPRODUCIBILITY OF THE MEASUREMENT PROCESS WHEN DETECTING THE FAULTS OF CRANKSHAFT NECKS DIAMETERS

N.J. SHKARUBA

Russian State Agrarian University – MAA named after K.A. Timiryazev

One of the factors determining the quality of the engines overhaul is the quality of measurements. Assessment of measurements quality is a laborious process, during which it is possible to rely on the recommendations given in GOST R 51814.5-2005. When applying the methodology described in this standard to assess the quality of measurements in the repair work a number of difficulties arises connected with considerable differences in measurements of the machine-building and automobile industries. The same methodology and the same measurement tools are used for checking both worn-out and new and repaired components of the engine. The urgency of the above problems indicates to the necessity of adaptation of the quality assessment method and measuring processes to the repair production.

In the article there is considered a method of collecting and processing the measurement information of the main static characteristics used for evaluation of the quality and acceptability of the measurement processes with regard to the repair production. When evaluating the precision and reproducibility of the measurement process method there was used a method of dispersions allowing carrying out a more detailed analysis.

The method of assessing the quality of measurements makes it possible to determine the acceptability of the recommended in the normative documentation methods and means of measurements at different stages of the technological process of engines overhauling. The results of the analysis of the acceptability of the measurement process when inspecting crankshafts necks of engines JAMZ under the conditions of the repair company indicate to the acceptability of the given measurement process as a whole. The greatest contribution to the variability of the measurement process of diameters of crankshafts worn necks is the change of the sample. In the second place as for the impact of the variability of the measurement process is the precision of the measurement results. The share of the operator's influence on the variability is also rather significant.

Key words: quality of measurement, test result, reproducibility; repeatability; reproducibility of standard deviation.

References

1. GOST R 51814.5-2005 «Quality management System in automotive industry. Analysis measuring and control processes».

2. Leonov O.A., Bondareva, G.I., Shkaruba N.W. Assessment of the quality measurement processes in repair and production. The Bulletin of the Federal state educational institution of higher professional education «Moscow state Agroengineering University. V.P. Goryachkin». 2013. № 2. P. 36–38.

3. Shkaruba N.W., Lisanova E.A. Analysis of the main elements of the management system of measu-

rements. International techno-economic journal. 2014. № 5. P. 41–46.

4. Shkaruba N.W. Modern organizational approaches to metrological provision of repair production. The Bulletin of the Federal state educational institution of higher professional education «Moscow state Agroengineering University. V.P. Goryachkin». 2013. № 3. P. 41–44.

5. Shkaruba N.W. Techno-economic selection criteria universal measurement tools in the repair of agricultural machinery: a monograph. M.: MSAU, 2009. 120 p.

Shkaruba Nina Gorovna – candidate of technical Sciences, Professor of the Department of Metrology, standardization and quality management the Russian State Agrarian University – MAA; Russia, 127550, Moscow, Timiryazevskaya street, 49; tel.: 8-916-606-23-59; e-mail: nina_sh@mail.ru.