

**Ю.В.Кулешков, проф., канд.техн.наук, В.В. Русских, канд.техн.наук,
Т.В. Руденко, канд.техн.наук**

Кировоградский национальный технический университет

Методика исследования технического состояния изношенных шестерен шестеренного насоса типа НШ

В роботі, що пропонується наведена методика дослідження зносного стану шестерень шестеренного насоса типу НШ, яка дозволяє більш ефективно використовувати отримані при дослідженні статистичні дані.

1. Постановка задачи

Износ деталей машин зависит от многочисленных и разнообразных причин, не связанных между собой какой-либо зависимостью и в совокупности своей являющихся случайными. Поэтому для изучения износа деталей целесообразно применение статистических методов исследования. Достаточно надежным способом изучения числовых характеристик износа деталей является их микрометрическое измерение.

Значение величины износа деталей в условиях ремонтного производства необходимо как один из критериев выбора способов восстановления. Экономическая целесообразность применяемых методов восстановления деталей прямым образом зависит от величины наращивания изношенных поверхностей, так как от этого зависит длительность процесса восстановления, расход материалов, энергии и трудовые затраты на ремонт деталей.

В литературных источниках по исследованию надежности и ремонту шестеренного существуют работы [1, 2, 3], в которых собран богатый материал по исследованию износа шестерен шестеренного насоса. Однако использование несовершенной методики при проведении исследований не позволяет получить из собранного материала насоса большей информации. Анализируя приведенные и другие аналогичные работы, складывается впечатление, что за исключением среднего значения износа другой информации исследователям из столь трудоемкого исследования извлечь не удастся. А поэтому, целью данной работы является разработка методики исследования позволяющей извлечь дополнительную информацию по техническому состоянию шестерен шестеренного насоса.

2. Программа исследования технического состояния изношенных шестерен

Программа исследования технического состояния изношенных шестерен предполагает проведение следующих исследований:

- а) сбор статистических данных об износах шестерен насосов, поступивших в ремонт;
- б) определение характера износа;
- в) определение преимущественного вида износа шестерен;
- г) обработка собранных данных методами математической статистики, определение основных числовых характеристик выборки;
- д) графическое отображение опытной информации;
- е) выбор теоретического закона распределения, определение его параметров;
- ж) определение коэффициентов годности без ремонта и коэффициентов восстановления шестерен;
- з) построение корреляционной статистической модели изношенной шестерни.

3. Методика проведения исследований

Для применения методов математической статистики необходимо наличие предварительной информации. Для получения репрезентативной выборки исследуемых шестерен делаем ее случайной, т.е. отбираем ее таким способом, который не имеет никакого отношения к исследуемым признакам и обеспечивает каждому отдельной шестерне одинаковую вероятность попасть в исследуемую выборку. С этой целью на ОАО «Кировоградский ремонтно-механический завод им. В.К.Таратуты» проводилось микрометрические измерения шестерен шестеренного насоса типа НШ-32. Схема замера ведущей шестерни представлена на рис. 1.

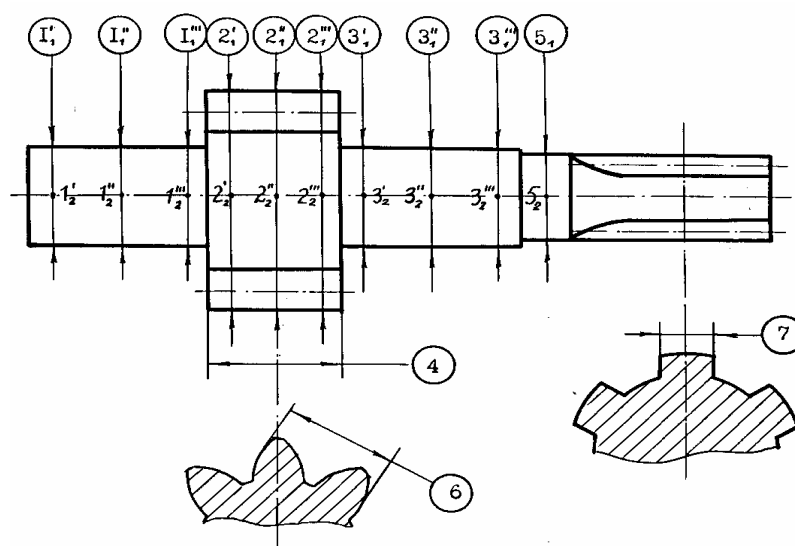
Для детального изучения износов цапф и венца шестерен замеры производились в двух взаимно перпендикулярных плоскостях (см. рис.1).

Для определения износов цапф, венца шестерен по диаметру, шейки под уплотнение и венца шестерни по ширине зуба использовали гладкий микрометр МК 1 класса точности ГОСТ 6507-78. Для определения износов зубьев шестерен по эвольвентному профилю производили замер длины общей нормали микрометром МЗ 25-1 ГОСТ 6507-78. Износ шлицев по ширине определяли штангенциркулем ШЦ-П-250-0,05 ГОСТ 166-80.

Особенностью предлагаемой методики сбора информации об износах шестерен и последующей ее обработки явилось то, что для создания «целостного образа» изношенной детали производили замеры и фиксацию размеров вначале одной детали, а затем переходили к дефектации следующей. Таким образом, в одной строке таблицы получали значение износов всех элементов конкретной детали, что позволяло в дальнейшем искать взаимосвязь между износами элементов шестерни.

Величину износа определяли, как разность между минимальным значением наружной поверхности шестерни по чертежу и истинным значением детали.

Математическая обработка данных производилась на ЭВМ с использованием пакета прикладных программ Microsoft Excel, Mathcad, STATISTICA и Statgraphics 2.1 Plus for Windows.



- 1, 3 – измерение диаметра цапф; 2 – измерение наружного диаметра венца шестерен;
4 - измерение ширины венца шестерен; 5 - измерение диаметра шейки под уплотнение;
6. - измерение общей нормали зубьев шестерен; 7 - измерение шлицев по ширине

Рисунок 1 – Схема замеров ведущей шестерни шестеренного насоса НШ-32У

Дальнейшие расчеты проводились в такой последовательности:

а) составляем вариационный ряд $a_1, a_2 \dots a_n$ в порядке возрастания;

б) определяем размах распределения по формуле:

$$R = a_{\max} - a_{\min} ; \quad (1)$$

в) определяем рациональное число интервалов:

$$k = \sqrt{n} , \quad (2)$$

где n - количество деталей выборки;

г) определяем ширину интервала:

$$h = \frac{R}{k} ; \quad (3)$$

д) составляем начальный статистический ряд распределения. Начальный статистический ряд распределения представлен в таблице 1;

е) определяем точечные характеристики случайной величины:

1) находим среднее арифметическое значение:

$$\bar{a} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} ; \quad (4)$$

2) вычисляем выборочную дисперсию:

$$D_{\text{оп}} = \sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2 ; \quad (5)$$

3) находим стандартное отклонение единичного замера:

$$S_{a_i} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2}{n - 1}} ; \quad (6)$$

Таблица 1 – Начальный статистический ряд распределения случайной величины

№ интервала	Интервал	Середина интервала	Частота m_i	Частость $P_i = \frac{m_i}{N}$	Накопленная частость $\sum P_i$
1	$A1 \dots a1+h$	$a1+0,5h$			
2	$A1+ a1+2h$	$a1+1,5h$			
.	.	.			
.	.	.			
к	$a1(k-1)h \dots a1+kh$	$a1+(k-0,5)h$			
Итого	-	-	$\sum m_i = n$	$\sum P_i = 1$	1

4) определяем моду, значение которой соответствует наибольшее число наблюдений или значение признака в интервале, которому соответствует наибольшая частота [4]:

$$M_o = L + h \left(\frac{\Delta_1}{\Delta_1 + \Delta_2} \right), \quad (7)$$

где L – нижняя граница модального интервала;

h – ширина интервала;

Δ_1 – разность частот модального и домодального интервалов;

Δ_2 – разность частот модального и послемодального интервалов;

5) определяем медиану:

$$M_e = L_{Me} + h \cdot \frac{\frac{h+1}{2} - S_{(-1)}}{m_{Me}}, \quad (8)$$

где L_{Me} – нижняя граница медианного интервала;

m_{Me} – частота медианного интервала;

$S_{(-1)}$ – накопленная частость интервала, предшествующая медианному интервалу;

6) вычисляем показатель асимметрии, который показывает направление и степень асимметрии дифференциальной кривой распределения плотностей вероятности относительно среднего значения:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (a_i - \bar{a})^3}{S_{a_i}}, \quad (9)$$

где m_i – опытная частота в i -ом интервале статистического ряда;

7) определяем показатель эксцесса, который характеризует кривизну графика распределения, относительно кривой нормального распределения:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (a_i - \bar{a})^4}{S_{a_i}}; \quad (10)$$

ж) проводим проверку информации для резко выделяющихся наблюдений по критерию Ирвина. Этот метод выбран как один из наиболее простых и эффективных, использование которого гарантирует достаточную точность с ростом числа опытов.

Для этого фактическое значение критерия определяют по зависимости:

$$\lambda_{оп} = \frac{a_i - a_{i-1}}{S_{a_i}}, \quad (11)$$

где a_{i-1} , a_i – смежные точки вариационного ряда износков.

Если полученное значение $\lambda_{оп}$ больше значения, соответствующего табличному при $n = 100$ с заданной доверительной вероятностью 0,95, то полученное значение следует отбросить, если менее, то его следует оставить ;

з) определяем коэффициент вариации

$$V = \frac{S_{a_i}}{\bar{a}} ; \quad (12)$$

и) находим стандартное отклонение среднего значения:

$$S_{\bar{a}} = \frac{S_{a_i}}{\sqrt{n}} ; \quad (13)$$

к) строим гистограмму, полигон и кривую накопления опытных вероятностей;

л) определяем интервальные характеристики распределения:

1) находим интервал для единичного замера:

$$\bar{a} - t_{\alpha} \cdot S_{a_i} \leq a_i \leq \bar{a} + t_{\alpha} \cdot S_{a_i} ; \quad (14)$$

2) вычисляем доверительный интервал для среднего значения:

$$\bar{a} - t_{\alpha} \cdot S_{\bar{a}} \leq \bar{a} \leq \bar{a} + t_{\alpha} \cdot S_{\bar{a}} , \quad (15)$$

где t_{α} - коэффициент Стьюдента, определяемый для наперед заданной доверительной вероятности α и числа замеров N .

Данные неравенств (14) и (15) свидетельствуют о том, что случайная величина a_i (неравенство (14)) или среднее значение случайной величины $\bar{a}$ (неравенство (15)) с заданной доверительной вероятностью α попадают в указанный интервал;

м) располагая этими сведениями можно определить абсолютную и относительную погрешность:

1) абсолютная погрешность для отдельного замера:

$$\Delta a_i = t_{\alpha} \cdot S_{a_i} ; \quad (16)$$

2) абсолютная погрешность для среднего значения или серии опытов:

$$\Delta \bar{a} = t_{\alpha} \cdot S_{\bar{a}} ; \quad (17)$$

н) находим относительную погрешность:

1) относительная погрешность для отдельного замера:

$$\varepsilon = \frac{\Delta a_i}{a_i} ; \quad (18)$$

2) относительная погрешность для среднего значения или серии опытов:

$$\varepsilon = \frac{\Delta \bar{a}}{\bar{a}} . \quad (19)$$

Формулы (14) и (15) справедливы для относительного небольшого числа замеров $N \leq 25$. При числе замеров $N > 25$ вместо коэффициента Стьюдента t_{α} следует подставить коэффициент k_{α} [3]. Коэффициент k_{α} – коэффициент, определяемый по нормальному распределению Гаусса для доверительной вероятности α .

В результате проведенных замеров и обработки их с использованием методов математической статистики были получены 8 групп одинаковых параметров для каждой плоскости замеров.

Поскольку такое количество информации затрудняет проведение анализа полученных результатов, то возникает задача: нельзя ли уменьшить количество этих статистических параметров путем объединения схожих распределений;

о) эта задача с успехом может быть решена путем определения случайности расхождения между двумя выборочными дисперсиями. Для решения этой задачи используют F-распределение Фишера [5]. Для этого определяют величину:

$$F_B = 1,15129 \cdot \lg \frac{S_1^2}{S_2^2} . \quad (20)$$

При этом считают, что

$$S_1 < S_2 . \quad (21)$$

Далее, для числа степеней свободы $n_1 = N_1 - 1$ и $n_2 = N_2 - 1$ и доверительной вероятности α определяют $F_{табл.}$. Затем сравнивают значение F_B и $F_{табл.}$.

Если $F_B < F_{табл.}$, то с доверительной вероятностью α расхождение между дисперсиями можно считать несущественным, случайным, а выборки принадлежащих к одной генеральной совокупности;

п) допустим, что имеются две выборки N_1 и N_2 и мы определили по выше приведенной методике, что эти две выборки принадлежат одной генеральной совокупности. Тогда мы можем заменить эти выборки третьей - $(N_1 + N_2)$ с параметрами, которые вычислены по следующим зависимостям [4].

Среднее значение случайной величины:

$$\bar{x} = \frac{N_1 \cdot \bar{x}_1 + N_2 \cdot \bar{x}_2}{N_1 + N_2} . \quad (22)$$

Дисперсия выборки:

$$S^2 = \frac{N_1 \cdot S_1^2 + N_2 \cdot S_2^2}{N_1 + N_2} + \frac{N_1 (\bar{x}_1 - \bar{x})^2 + N_2 (\bar{x}_2 - \bar{x})^2}{N_1 + N_2} . \quad (23)$$

Составленный по данным исходной информации уточненный статистический ряд дает полную характеристику опытного распределения. Дальнейшее обобщение и сворачивание первичной информации возможно путем получения математической модели в виде выражения дифференциального закона распределения плотности вероятности или интегрального закона распределения вероятности;

п) подбор соответствующего теоретического распределения осуществляли по внешнему виду эмпирической кривой, области применения теоретического закона распределения (ТЗР), коэффициенту вариации и другим признакам. Из литературных источников известно, что коэффициенту вариации $V < 0,30$, соответствует нормальный закон распределения (ЗНР), в случае $V > 0,50$ – закон распределения Вейбулла (ЗРВ), если $V = 0,30 \dots 0,50$ можно пользоваться ЗНР или ЗРВ [6]. Известно также, что если мода и медиана равные по величине со средним значением, то имеет место нормальный закон распределения [2].

Чаще всего для изучения технического состояния изношенных деталей машин используют нормальный закон распределения, для которого дифференциальная функция или распределение плотности вероятности определяют по уравнению:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t - \bar{t})^2}{2\sigma^2}\right), \quad (24)$$

где $\bar{t}$ - среднее значение;
 σ - стандартное отклонение.

Интегральная функция нормального распределения в общем виде выглядит:

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} \exp\left[-\frac{(t - \bar{t})^2}{2\sigma^2}\right] dt. \quad (25)$$

Реже используется закон распределения Вейбулла, для которого дифференциальную и интегральную функции находят соответственно [2]:

$$f(t) = \frac{b}{a} \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^{b-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{t}{a}\right)^b\right], \quad (26)$$

где a и b – параметры распределения Вейбулла.

$$F(t) = 1 - \exp\left[1 - \left(\frac{t}{a}\right)^b\right]. \quad (27)$$

Иногда применяют такие законы распределения: лог-нормальный, показательный, экспоненциальный, Релея, гамма-распределение, Пуансона, биномиальный и др.

После предварительного выравнивания теоретическим законом распределения, проверяют совпадение его с экспериментальными данными по критериям согласия. Чаще всего используют критерий согласия Пирсона - χ^2 , для чего определяют значение критерия:

$$\chi^2 = \sum_i \frac{|m_i - m_{Ti}|^2}{m_{Ti}}, \quad (28)$$

где m_i – опытная частота в i – ом интервале статистического ряда;

m_{Ti} – теоретическая частота в i -ом интервале.

Определив число степеней свободы и, пользуясь таблицей 12 [2], находим значение $P(\chi^2)$. Считают, что эмпирическая кривая согласуется с теоретической, если вероятность согласия более 0,05.

4. Результаты статистического исследования износов рабочих поверхностей шестерен насоса

В процессе исследования технического состояния шестерен насосов типу НШ-32У были исследованы более 100 насосов, поступивших в ремонт.

Минимально необходимое количество наблюдений определяли после сбора данных по 15...20 шестерням, опираясь на данные износного состояния одной поверхности, которая имеет максимальный коэффициент вариации. Максимальное значение коэффициента вариации соответствует износу шлицев ведущей шестерни по толщине. При среднем значении износа шлицев $\bar{a} = 0,290$ и стандартном отклонении $S_{a_i} = 0,125$, коэффициент вариации составляет:

$$V = \frac{0,125}{0,290} \cdot 100\% = 43,10 \%$$

Тогда задавшись относительной ошибкой измерений $\varepsilon = 0,1$ и доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$, которой соответствует коэффициент Стьюдента $t_\alpha = 2,3$ при числе измерений $n = 15$ и при $\bar{a} = 0,290$ и $S_{a_i} = 0,125$, минимально необходимое количество обследований в соответствии с предложенной составит:

$$n = \frac{t_{\alpha,n}^2 \cdot S_{a_i}^2}{\varepsilon^2 \cdot \bar{a}^2} = \frac{2,3^2 \cdot 0,125^2}{0,1^2 \cdot 0,290^2} = 98,28.$$

Таким образом, необходимое количество шестерен, подлежащих обследованию, составляет $n = 100$ шестерен.

Для проведения первичной обработки данных использовали пакет прикладных программ STATISTICA версии 5.5. Этот модуль позволяет определить основные параметры статистической обработки данных.

Таким образом, в результате статистической обработки данных были получены точечные и интервальные характеристики вариационных рядов износов элементов шестерен насосов НШ – 32У, которые представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты статистической обработки данных износов элементов шестерен насоса НШ – 32У

Статистические параметры и формулы, по каким они могут быть вычислены	Износы элементов шестерен					
	DZ – износ цапф по диаметру	DS - износ диаметра шейки под сальник ведущей шестерни ;	B – износ ширины венца шестерни	D – износ диаметра выступов вершин зубьев шестерни ,	W – износ длины общей нормали шестерни	SLJ – износ ширины шлицев ведущей шестерни .
1	2	3	4	5	6	7
1. Выборочная средняя, $\bar{a}$	0,102800	0,080082	0,318170	0,293750	0,071229	0,277424
8. Дисперсия одиночного износа, D_{a_i}	0,000289	0,000063	0,007001	0,007532	0,000875	0,019150

10.Стандартное отклонение одиночного измерения, S_{a_i}	0,017	0,007967	0,083671	0,086784	0,029586	0,138384
12.Дисперсия среднего выборки, $D_{\bar{a}}$	2,89 10-5	0,63 10-5	70,1 10-5	75,32 10-5	8,75 10-5	191,5 10-5
14.Стандартное отклонение среднего выборки, $S_{\bar{a}}$	0,0017	0,0007967	0,008367	0,008678	0,002959	0,013838
18.Абсолютная погрешность единичного измерения, Δa	0,03332	0,0156153	00,163995	0,1701096	0,0579886	0,271233
19.Относительная погрешность единичного измерения, ε_{a_i} , %	32,41245	19,49916	51,54326	57,90524	81,41144	97,76828
20.Абсолютная погрешность среднего выборки, $\Delta \bar{a}$	0,003332	0,0015615	0,0163995	0,017011	0,0057989	0,027123
21.Относительная погрешность среднего выборки, $\varepsilon_{\bar{a}}$, %	3,241245	1,949916	5,154326	5,790524	8,141144	9,7768278

Анализируя систематизированные данные, которые приведены в итоговой таблице 3 приходим к следующим выводам.

Судя по точечным характеристикам распределения величин износов, в частности, близкому значению среднего значения моды и медианы, по коэффициенту вариации, который менее 30% [274], незначительным значениям коэффициента асимметрии и эксцесса приходим к выводу, что распределение износов элементов шестерен насоса НШ-32У очень близко к нормальному закону распределения.

Обращает на себя внимание, завышенное значение коэффициента вариации и относительной погрешности единичного измерения износов шестерен по эвольвентному профилю и шлицев ведущей шестерни по ширине. Это можно объяснить чрезмерным разбросом износов указанных элементов шестерен насоса, что нами объясняется неоднородностью технического состояния насосов, поступающих в ремонт. Причиной этого является сильно различающиеся условия эксплуатации.

Следующим этапом наших исследований является подбор теоретического закона распределения и согласование подобранного закона распределения с экспериментальными данными износов элементов шестерен насоса НШ-32У. В табл. 3 представлены выбранные теоретические законы распределения износов элементов шестерен.

Опираясь на полученные результаты для примера были построены графические зависимости износов диаметров цапф шестерен, которые наглядно иллюстрируют полученные статистические зависимости в виде гистограмм, полигонов, теоретических кривых распределения плотности вероятностей (дифференциальные кривые) и гистограмм, полигонов, теоретических кривых распределения вероятностей (интегральные кривые) (см. рис. 1 и рис. 2).

Таблица 3. Теоретические законы распределения износов элементов шестерен насоса НШ-32У

Износы элементов шестерен	Принятый закон распределения	Числовые параметры эмпирического распределения	Теоретический закон распределения и его параметры
DZ –износ цапф по диаметру	Распределение Вейбула	$\bar{x} = 0,102800$ $S_{x_i} = 0,017$ $V = 16,53697\%$	Дифференциальная функция нормального закона распределения: $f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}$ Интегральная функция нормального распределения: $F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} dx$
DS - износ диаметра шейки под сальник ведущей шестерни	Распределение Вейбула	$\bar{x} = 0,080082$ $S_{x_i} = 0,007967$ $V = 9,948552\%$	
B – износ ширины венца шестерни	Распределение Вейбула	$\bar{x} = 0,318170$ $S_{x_i} = 0,083671$ $V = 26,297265\%$	
D – износ диаметра выступов вершин зубьев шестерни,	Распределение Вейбула	$\bar{x} = 0,293750$ $S_{x_i} = 0,086784$ $V = 29,54349\%$	
W – износ длины общей нормали шестерни	Распределение Вейбула	$\bar{x} = 0,071229$ $S_{x_i} = 0,029586$ $V = 41,53645\%$	
SLJ – износ ширины шлицев ведущей шестерни	Экспотенциальный	$\bar{x} = 0,277424$ $S_{x_i} = 0,138384$ $V = 49,88177\%$	

Анализ гистограмм, полигонов и теоретических кривых распределения плотности вероятностей и вероятностей износов элементов деталей (рис. 1 и рис.2) дает основание утверждать, что распределения износов в своем большинстве подчиняются нормальному закону распределения с параметрами $\bar{x}$ и S_{a_i} .

Кроме этого следует отметить тот факт, что, все распределения имеют положительную или правостороннюю асимметрию (см. табл. 2 строка 26) и моду, как правило, превосходящую среднее значение. Это свидетельствует о том, что элементы шестерен недоиспользовали заложенный в них ресурс – об этом свидетельствует то, что основная масса деталей имеют износ меньше среднего значения. Одним из объяснений этого является недостаточный ресурс радиального сопряжения, в частности вершин зубьев шестерен.

Выводы. В предлагаемой работе систематизирована и целенаправленно изложена методика статистической обработки экспериментальных данных, что дает возможность после обработки первичной информации получить достоверные и объективные сведения об изучаемом явлении или процессе.

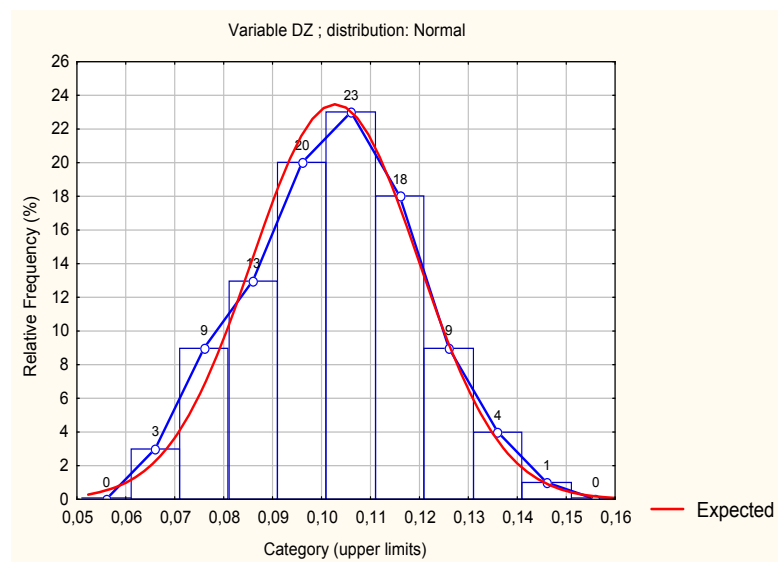


Рисунок 1 – Гистограмма, полигон и теоретическая кривая распределения плотностей вероятностей износов диаметров цапф шестерен насоса НШ-32У

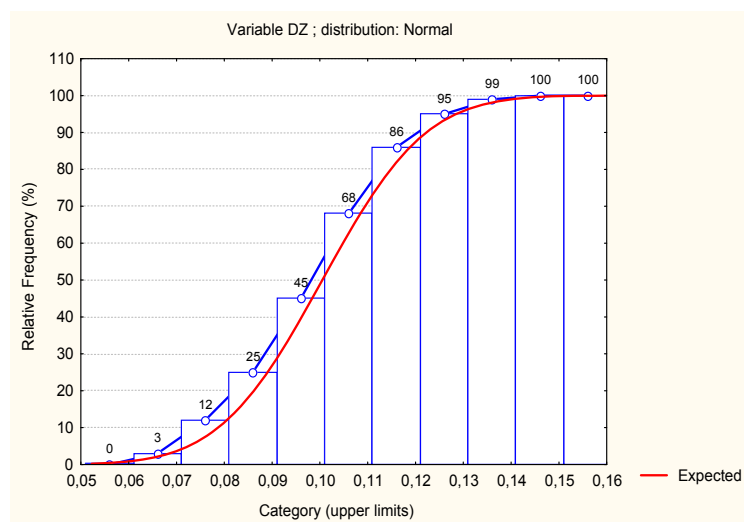


Рисунок 2 – Гистограмма, полигон и теоретическая кривая распределения вероятностей износов диаметров цапф шестерен насоса НШ-32У

Аннотация. В предлагаемой работе представлена методика исследования износного состояния износного состояния шестерен шестеренного насоса типа НШ втулок верхней головки шатуна двигателей семейства СМД-14. Результаты работы получены путем экспериментального исследования технического состояния элементов шестерен насосов НШ и последующей обработки первичной информации методами математической статистики по предлагаемой методике.

Список літератури

1. Кане М.М. Основы научных исследований в технологии машиностроения. Минск: Выш. шк., 1987.-231 с.
2. Селиванов А.И., Артемьев Ю.Н. Теоретические основы ремонта и надежности сельскохозяйственной техники. – М.: Колос, 1978.-248 с.
3. Михацев С.В., Васильев П.М., Погорелый Л.В. Основы научных исследований. К., Вища шк., 1985.-266 с.
4. Колкер Я.Д. Математический анализ точности механической обработки деталей. К. Техніка, 1976 – 187 с.
5. Статистические методы обработки эмпирических данных. – М.: Издательство Стандартов, 1978.-232 с.
6. Артемьев Ю.Н. Качество ремонта и надежность машин в сельском хозяйстве. - М.: Колос, 1981.- 239 с.