

После несложных тригонометрических преобразований в уравнении (5) получим

$$h(t) = \frac{2}{\pi t} \sin \frac{(\omega_2 - \omega_1)t}{2} \cos \left[\frac{(\omega_2 + \omega_1)t}{2} + \varphi_0 \right].$$

В частных случаях можно записать:

$$\varphi_0 = \mp \pi / 2, \quad h(t) = \pm \frac{2}{\pi t} \sin \frac{(\omega_2 - \omega_1)t}{2} \sin \frac{(\omega_2 + \omega_1)t}{2};$$

$$\varphi_0 = \mp \pi / 4, \quad h(t) = \sqrt{2} \cdot \frac{1}{\pi t} \sin \frac{(\omega_2 - \omega_1)t}{2} \left[\cos \frac{(\omega_2 + \omega_1)t}{2} \pm \sin \frac{(\omega_2 + \omega_1)t}{2} \right];$$

$$\varphi_0 = \mp \pi / 6, \quad h(t) = \frac{1}{\pi t} \sin \frac{(\omega_2 - \omega_1)t}{2} \left[\sqrt{3} \cdot \cos \frac{(\omega_2 + \omega_1)t}{2} \pm \sin \frac{(\omega_2 + \omega_1)t}{2} \right];$$

$$\varphi_0 = 0, \quad h(t) = \frac{1}{\pi t} \sin \frac{(\omega_2 - \omega_1)t}{2} \cos \frac{(\omega_2 + \omega_1)t}{2}.$$

Рассмотренный алгоритм построения фазовращателя позволяет моделировать аналитический сигнал с произвольным взаимным фазовым сдвигом вещественной и мнимой составляющих в заданном диапазоне частот.

ЛИТЕРАТУРА

Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Радио и связь, 1986. 512 с.

Сведения об авторе

Сергей Ильич Зиатдинов — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра информационно-сетевых технологий; E-mail: kaf53@guar.ru

Рекомендована кафедрой
информационно-сетевых технологий

Поступила в редакцию
11.03.14 г.

УДК 921.01

Л. В. ЕФРЕМОВ

ЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД УСКОРЕННЫХ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ УЗЛОВ ТРЕНИЯ МАШИН

Рассматривается эффективный метод ускоренных ресурсных испытаний узла трения машин в целях оценки его гамма-процентного ресурса. Метода основан на параметрической модели типа „Веер“ процесса изнашивания узлов путем измерения степени износов способом искусственных баз.

Ключевые слова: вероятность, выборка, испытания, нагрузка, отказ, распределение, ресурс.

Для оценивания показателей долговечности машин (гамма-процентных ресурсов, сроков службы и др.) применяются различные методы ускоренных ресурсных испытаний с учетом особенностей изучаемых процессов. Известны цензурированные, параметрические и комбинированные методы испытаний с использованием соответствующих вероятностных

моделей (типа „Усталость“, „Тренд“, „Верр“, „Экспонента“ и пр.) [1]. Экономическая эффективность и достоверность результатов таких испытаний зависят от ряда факторов, в частности от объема выборки измерений, способа контроля и обнаружения отказа, продолжительности и числа сеансов испытаний.

В основу рассматриваемого в настоящей статье метода положен отраслевой стандарт [2], который содержит описание ускоренных ресурсных испытаний пробкового крана с помощью метода искусственных баз (метода лунок) по ГОСТ 23.301-78 [3].

Сущность метода иллюстрируется рис. 1, где представлена схема нарезания лунок на поверхности трения и приведен способ оценивания глубины износа Δh по уменьшению длины лунки от начального значения l_n до конечного l_k (а); общий вид прибора УПОИ-6 показан на рис. 1, б.

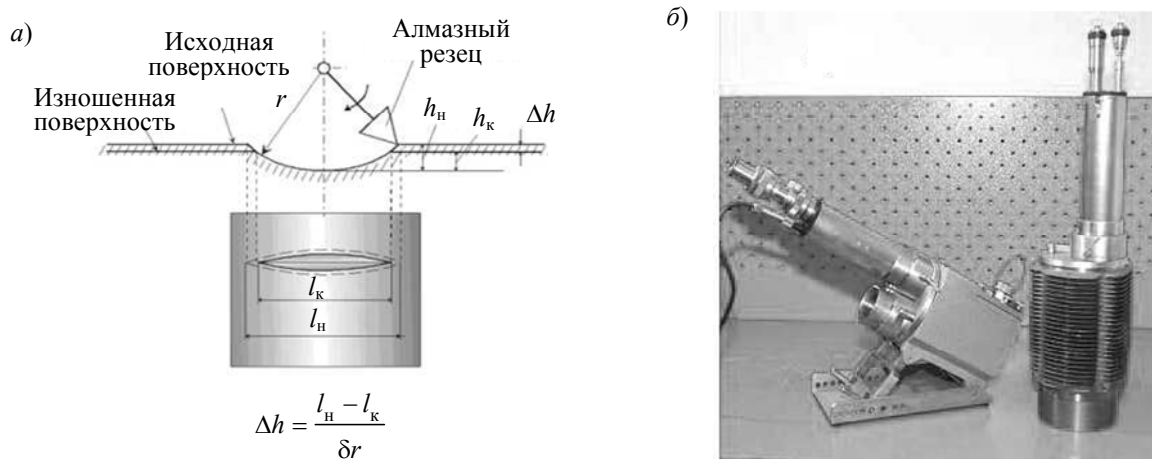


Рис. 1

Оригинальность применения метода заключается в том, что на поверхности трения нарезается не одна лунка, а несколько (в данном случае 42 лунки): это позволяет получить большой объем выборки измерений при испытаниях всего лишь одного образца. Такой способ измерения степени износа после отработки заданного числа циклов возвратно-вращательного движения пробкового крана (1000 циклов) позволяет повысить достоверность оценки случайной погрешности, равной среднеквадратическому отклонению (СКО). В этом заключается первое преимущество предлагаемого метода — вместо 42 образцов испытывается всего лишь один.

Второе преимущество метода связано с линейной моделью изнашивания узла трения после периода приработки, что позволяет не доводить объект до предельного износа, а прервать периодические сеансы измерений при частичной наработке, равной, например, 10—40 % от назначенного ресурса (рис. 2).

На рис. 2 приняты следующие обозначения: 1 — износ после периода приработки T_0 ; 2 — износ после j -го сеанса испытаний T_i ; 3 — предельный износ при достижении назначенного ресурса T_h ; 4 — дисперсия измерений; 5 — медианный процесс изнашивания.

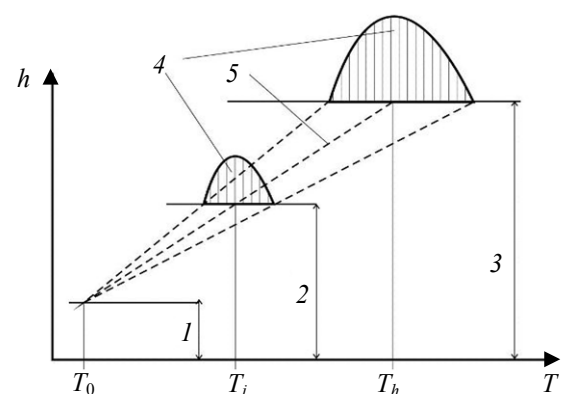


Рис. 2

Указанные принципы были положены в основу эффективного алгоритма испытаний на примере ускоренных ресурсных испытаний коренных подшипников шестицилиндрового четырехтактного дизеля. Одновременно ставилась задача не только оценить ресурс каждого подшипника, но и выявить зависимость этого показателя от места расположения (номера) подшипника на оси вала. Схема

расположения подшипников вдоль оси коленчатого вала показана на рис. 3, где 1—7 — номера подшипников, пунктир — эпюра изгибающего момента.

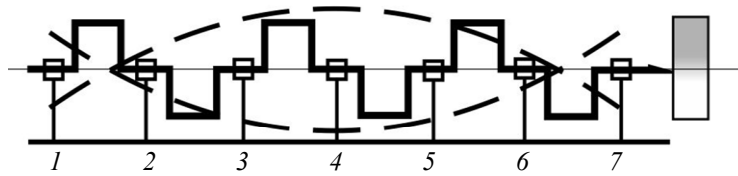


Рис. 3

Для решения поставленной задачи при основном процессе деградации — изнашивании — использовались следующие исходные данные: материал вкладышей — баббит; предельно-допустимый износ — 0,15 мм; назначенный ресурс 7000 ч; количество подшипников — 7; частота вращения вала — 350 об/мин, соответствующая частоте рабочих циклов $350/2 = 175$ циклов/мин (для четырехтактных дизелей).

Исследовался износ нижних вкладышей, на поверхностях которых было нарезано по 25 лунок в соответствии со схемой подготовки подшипника к испытаниям методом лунок (рис. 4).

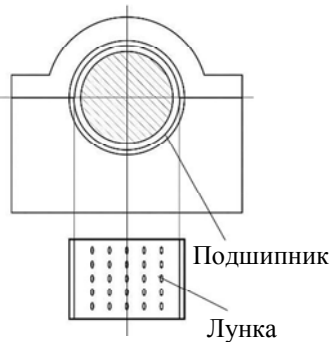


Рис. 4

Алгоритм ускоренных ресурсных испытаний подшипников содержит следующие этапы и операции. На подготовительном этапе необходимо в первую очередь выбрать наиболее качественные образцы вкладышей с проверкой твердости их поверхностей. Далее следует выполнить первичные измерения всех лунок для формирования исходной базы данных. К нарезанию и обмерам лунок должны допускаться аттестованные операторы. Ресурсные испытания подшипников выполняются во время стендовых испытаний двигателя. Продолжительность испытаний должна составлять не менее 10—15 % от назначенного ресурса (например, 750 ч). Это время разбивается на n сеансов, например $n = 3$, не считая периода прира-

ботки (10 ч). По завершении каждого j -го сеанса исследуемые подшипники выкатываются и измеряется износ в каждой i -й лунке. Таким образом, для каждого подшипника можно сформировать матрицу износов, которая состоит из 3 столбцов и 25 строк (см. таблицу: матрица выделена полужирным). Для демонстрации методики применялся генератор случайных чисел для распределения Вейбулла [4].

i	Приработка при T_0	h_j , мм, при T_{ij} , ч		
	10	250	500	750
1	0,001	0,0041	0,0071	0,0103
2	0,001	0,0043	0,0074	0,0105
3	0,001	0,0044	0,0077	0,0105
4	0,001	0,0045	0,0078	0,0112
.....				
22	0,001	0,0051	0,0095	0,0137
23	0,001	0,0052	0,0097	0,0137
24	0,001	0,0054	0,0098	0,014
25	0,001	0,0055	0,0099	0,0144

Эта матрица является базой данных для расчета износостойкости C_i и прогнозируемого ресурса R_i :

$$C_{ij} = \frac{T_{ij} - T_0}{h_{ij} - h_0}, \quad R_{ij} = C_{ij} (h_{\text{пр}} - h_0), \quad (1)$$

где T_0 и h_0 — время и износ после периода приработки; T_{ij} и h_{ij} — время и износы после j -го сеанса испытаний; $h_{пр}$ — предельно-допустимый износ.

Для проверки гипотезы о постоянстве износостойкости при нормальной эксплуатации был проведен сравнительный анализ рассчитанных средних ресурсов по сеансам (9800,17, 9889,19, 9920,36). Малое различие этих значений (около 1 %) подтверждает постоянство параметра C и возможность применения вероятностной модели типа „Вейер“. В этом случае можно допустить объединение векторов ресурсов по сеансам с ранжированием объединенного вектора выборки объемом $25n = 75$.

Рассмотренные операции являются подготовительным этапом для определения параметров (формы b и масштаба a) распределения Вейбулла в целях оценки гамма-процентного ресурса $R(\gamma)$. В данном случае для отказов, вызванных износом, принимается $\gamma = 0,8$.

Предусмотрено два способа оценки параметров a и b : приближенный способ заключается в применении метода моментов и эмпирических формул для оценки коэффициента вариации V и математического ожидания прогнозируемого ресурса $R_{ср}$ по объединенной выборке:

$$a = R_{ср} / K(b), \text{ где } K(b) = 0,885 + 0,45 \left(\frac{1}{b} - 0,49 \right)^2;$$

$$b = \begin{cases} 0,953 / (V - 0,047), & \text{если } V \geq 0,25, \\ 1,037 / V^{1,07}, & \text{если } V < 0,25. \end{cases} \quad (2)$$

В данном примере при $R_{ср} = 12\,449,8$ ч и $V = 0,417$ получаем $a = 13\,973,9$ и $b = 2,67$.

Второй более точный способ основан на построении эмпирического распределения вероятности по формуле

$$P_i = 1 - i/N, \quad (3)$$

где $N = 75$ — объем выборки, с последующим уточнением параметров распределения одним из известных методов.

В литературе, как правило, рекомендуется применять метод наименьших квадратов или метод максимального правдоподобия. Однако наибольшую достоверность можно обеспечить с помощью оператора Minerr в редакторе MathCad13 и выше [1].

На рис. 5 приведены зависимости распределения вероятности (a) и плотности распределения (b), где 1, 2 — эмпирическое и теоретическое распределение вероятности; 3 — уровень 80 %-ного ресурса; 4, 5 — эмпирическая и теоретическая плотность распределения.

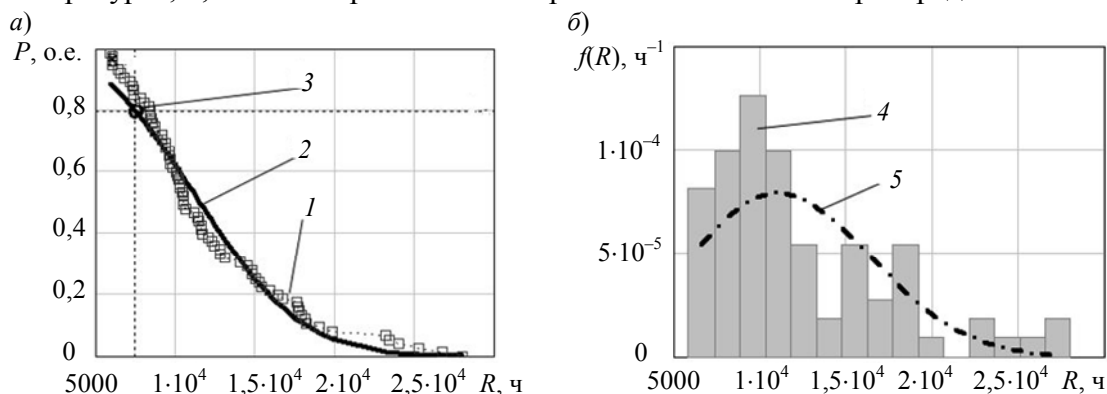


Рис. 5

Расчеты, выполненные по предлагаемой методике ускоренных ресурсных испытаний, показали, что 80 %-ный ресурс подшипника составляет 7110 ч и превышает назначенный ресурс (7000 ч). Следует отметить, что предложенный метод позволил оценить эту величину при коэффициенте ускорения испытаний $k = R(80\%) / 750 \approx 9,5$.

Фрагмент программы в редакторе MathCad показан на рис. 6.

ВБР $p_i := 1 - \frac{ii}{no}$

Целевая функция

$pp(Tt, bb, aa) := \exp\left[-\left(\frac{Tt}{aa}\right)^{bb}\right]$ Уравнение $res(bb, aa) := p - pp(Tt, bb, aa)$

Решение Given $0 = res(bb, aa)$

$\begin{pmatrix} b \\ a \end{pmatrix} := \text{Minerr}(bb, aa)$ $\begin{pmatrix} b \\ a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.181 \\ 1.139 \times 10^4 \end{pmatrix}$ $a = 11394.809$ $b = 3.181$

Результаты

$Kbb := \Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right)$ $Vv := \frac{\sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{b}\right) - Kbb^2}}{Kbb}$ $Rvs := a \cdot Kbb$ $RV(\gamma) := a \cdot \ln\left(\frac{1}{\gamma}\right)^{\frac{1}{b}}$

$Pv(t) := \exp\left[-\left(\frac{t}{a}\right)^b\right]$ $\lambda V(t) := \frac{b}{a} \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^{b-1}$ $\overline{fV}(t) := Pv(t) \cdot \lambda V(t)$ $Vv = 0.345$

Коэффициент корреляции (согласие) $KOR := \text{corr}(p, Pv(Tt))$ $KOR = 0.99$

Ресурсы $Rvs = 10202.797$ $RV(50\%) = 10154.549$ $RV(80\%) = 7110.4$

Рис. 6

Исследования и расчеты были выполнены для всех семи подшипников с моделированием зависимости их долговечности (ресурса) от места расположения (номера M) подшипника (рис. 7). Как видно, ресурс подшипников, расположенных посередине коленчатого вала, заметно ниже, чем подшипников, расположенных по краям.

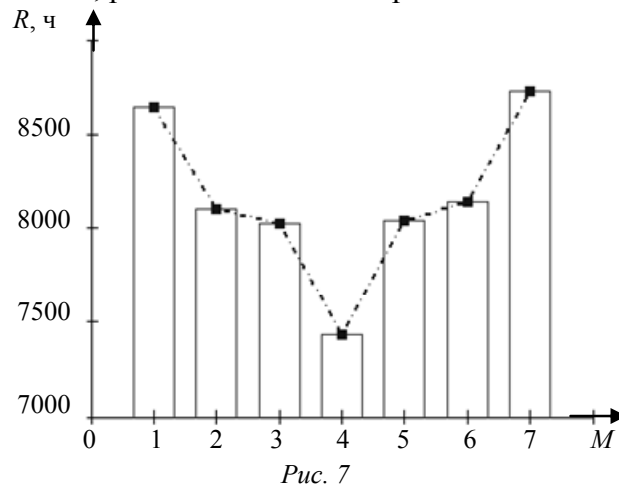


Рис. 7

Это явление объясняется действием сильного внутреннего неуравновешенного момента, который можно оценить по формуле

$$K = \sqrt{\left[\sum_{y=1}^z L_y \mu_y \cos(v\varphi_y) \right]^2 + \left[\sum_{y=1}^z L_y \mu_y \sin(v\varphi_y) \right]^2},$$

где y — номер цилиндра, L_y — расстояние от последнего цилиндра до y -го, μ_y — относительная масса y -го цилиндра, φ_y — угол поворота коленчатого вала до вспышки в y -м цилиндре, v — порядок колебаний (1 или 2).

Эта формула входит в пакет программ по расчету динамических нагрузок в двигателях внутреннего сгорания [5].

Рассмотренные в данной статье методы расчета имеют полное программное обеспечение в редакторе MathCad.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефремов Л. В. Практика вероятностного анализа надежности техники с применением компьютерных технологий. СПб: Наука, 2008.
2. ОСТ 26-07-2040-81. Арматура трубопроводная. Испытания ускоренные ресурсные. Общие требования к построению методик ускоренных испытаний. Введ. с 01.01.83. М., 1982.
3. ГОСТ 23.301-78. Обеспечение износостойкости изделий. Приборы для измерения износа методом вырезанных лунок. Технические требования. Введ. с 01.01.80. М.: Изд-во стандартов, 1980.
4. Ефремов Л. В. Вероятностные проблемы ресурсных испытаний. СПб: Art-Xpress, 2014.
5. Ефремов Л. В., Тузов Л. В. Динамика судовых и стационарных двигателей: Учеб. пособие. Л: СЗПИ, 1982.

Сведения об авторе

Леонид Владимирович Ефремов — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский политехнический университет, кафедра машиноведения и основ конструирования;
E-mail: levlefr@mail.ru

Рекомендована кафедрой
машиноведения и основ конструирования

Поступила в редакцию
16.05.14 г.

УДК 621.313

А. И. КОРШУНОВ

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОМЕНТ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Представлено выражение для электромагнитного момента синхронного двигателя с постоянными магнитами, полученное двумя способами. Показано полное совпадение результатов.

Ключевые слова: синхронный двигатель с постоянными магнитами, электромагнитный момент.

Введение. Широкое распространение синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ) на роторе как в регулируемых, так и в нерегулируемых электроприводах требует анализа не только стационарных, но и переходных режимов работы двигателя. Так, например, проблема устойчивости СДПМ возникает и в нерегулируемых электроприводах, не имеющих обратных связей [1]. Анализ устойчивости, в свою очередь, требует описания как электромагнитных, так и электромеханических переходных процессов. Для описания электромеханических переходных процессов необходимо выразить мгновенное значение электромагнитного момента СДПМ через мгновенные значения токов статора. В настоящей статье представлен вывод такого выражения.

Вывод выражения для мгновенного значения электромагнитного момента. При выводе формулы электромагнитного вращающего момента электрической машины переменного тока применяются два способа [2]: в соответствии с первым определяется действующий на статор момент, „возникающий в результате взаимодействия поля в воздушном зазоре и токов в обмотке статора“, и учитывается, что „момент, действующий на ротор, всегда равен и противоположен по знаку моменту, действующему на статор“; согласно второму способу электромагнитный „вращающий момент может быть вычислен также и по запасенной в магнитном поле энергии“.