

ЛИТЕРАТУРА

1. Вейбулл В. Усталостные испытания и анализ их результатов.-М.: Машиностроение, 1964.-276 с.;
2. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин: Справочник.- 4-е изд.- М.: Машиностроение, 1993.-640 с.;
3. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: Справочник. - М.: Машиностроение, 1985.-224 с. - (Основы проектирования машин);
4. Трощенко В.Т., Сосновский Л.А. Сопротивление усталости металлов и сплавов. Справочник: в 2 т., Киев: Наукова думка, 1987. - 1331 с.;
5. Почтенный Е.К. Прогнозирование долговечности и диагностика усталости деталей машин.- Минск: Наука и техника, 1983. - 246 с.;
6. Почтенный Е.К., Капуста П.П. Оценка нерегулярного нагружения деталей машин// Колебания и волны в экологии, технологических процессах и диагностике: Тез. докл. междунар. конф.: - Минск, 1993.- С. 107.;
7. Капуста П.П. Проектная вероятностная оценка долговечности деталей машин при нерегулярном нагружении// Автореферат дисс. на соиск. ученой. степ. канд. техн. наук. - Минск, 1997. - 19 с.;
8. Капуста П.П. Ресурсное проектирование несущих деталей АТС// Автомобильная промышленность. - 2000. - №2. - С. 59 - 61.;
9. Почтенный Е.К., Капуста П.П. Приведение асимметричных циклов к эквивалентным по повреждающему воздействию симметричным или отнулевым// Весці НАН Беларусі: Серыя фізіка-тэхнічных навук.- 2000. - №2. - С. 59 - 61.;
10. Капуста П.П. Уравнения нерегулярной нагруженности деталей машин.// В сб. Машиностроение: Сб. научн. Трудов. Вып. 17. Под ред. И.П. Филонова. – Мн.: УП “Технопринт”, 2001. - С. 323-327.;
11. Капуста П.П. Математическая модель как инструмент ресурсного проектирования АТС// Автомобильная промышленность. –2001. - № 11. - С. 15-18.;
12. Почтенный Е.К., Капуста П.П. Прогнозирование случайного нагружения и построение нагрузочных блоков// Современные методы проектирования машин. Расчет, конструирование, технология изготовления. Сборник научных трудов. Вып. 1. В 3-х томах. – Т. 2/ Под общ. ред. П.А. Витязя. – Минск: УП «Технопринт», 2002., С. 334 – 344.;
13. Капуста П.П. Надежность и ресурсное проектирование несущих систем и элементов машин// Современные методы проектирования машин. Расчет, конструирование, технология изготовления. Сборник научных трудов. Вып. 1. В 3-х томах. – Т. 1/ Под общ. ред. П.А. Витязя. – Минск: УП «Технопринт», 2002., С. 97 – 108.;
14. Капуста П.П. Вероятностная оценка характеристик сопротивления усталости деталей на стадии проектирования машин. - Мн.: “Технопринт”, 2001. - 97 с.;
15. Почтенный Е.К., Капуста П.П. Анализ нагруженности и расчет ресурса конструкций при случайном нагружении// Современные методы проектирования машин. Вып. 2. В 7 томах. - Т. 1. Перспективные направления создания машин. - Мн., 2004. - С. 125-135.

УДК 620.178.3

Е.К. Почтенный, П.П. Капуста

**ОСНОВНЫЕ ПУТИ УСКОРЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ
НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ МОБИЛЬНЫХ МАШИН**

*Институт механики и надежности машин НАН Беларуси,
Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Беларусь*

Введение. Основные пути ускорения испытаний несущих конструкций мобильных машин базируются на предложенных принципах ускорения испытаний

конструкций и деталей машин. Изложены основные положения разработанной общей методики ускоренных стендовых испытаний несущих конструкций при нерегулярном и регулярном нагружении. По результатам испытаний по предложенной методике приведено прогнозирование эксплуатационного ресурса ряда автомобильных несущих конструкций для условий нерегулярного нагружения [1 - 9].

Общая методика ускорения испытаний конструкций и деталей машин включает методы ускоренных испытаний и прогнозирующего расчета эксплуатационного ресурса. Усталостный ресурс для заданной вероятности неразрушения несущих конструкций по опасным элементам и зонам рассчитывается с учетом суммирования повреждений в процессе снижения предела выносливости и статистического влияния условий эксплуатации и многочастотности реальных нагрузочных спектров.

Основные способы ускорения усталостных испытаний можно разделить на две группы: для нерегулярного нагружения; для регулярного нагружения. При этом, с целью повышения точности экспериментальных прогнозов усталостного ресурса, традиционно стремление проводить испытания на режимах, максимально приближенных к эксплуатационному нагружению и воспроизводящих соответственно последнее или заменяющих его эквивалентными по повреждающему воздействию нагрузочными блоками. Последнее, наряду с несомненными преимуществами, ведет к увеличению продолжительности и удорожанию испытаний.

Способы ускорения испытаний при нерегулярном нагружении. Независимо от вида транспортных средств их эксплуатацию нужно рассматривать как многократное повторение процессов загрузки, транспортировки и разгрузки. Следовательно, нагружение элементов конструкций транспортных машин необходимо рассматривать как многократное повторение блоков случайных нагрузок, характеризующих типовые режимы эксплуатации машин.

При анализе блоков случайных нагрузок для аппроксимации может быть использована функция распределения Вейбулла:

$$\frac{i}{n} = \exp \left[- \left(\frac{\sigma_i - \hat{\sigma}}{\sigma_w} \right)^w \right],$$

где σ_i - случайное значение напряжения в убывающем вариационном ряду, i - порядковый номер этого напряжения в вариационном ряду, n - число напряжений в вариационном ряду, σ_w - параметр с размерностью напряжения, w - показатель степени, $\hat{\sigma}$ - минимальное, а $\hat{\sigma}$ - максимальное (при $i = 1$) значения напряжений аппроксимирующей функции.

При нерегулярном нагружении ускорение испытаний может быть достигнуто за счет: ужесточения параметров распределения напряжений; исключения из нагрузочного блока неповреждающих напряжений; исключения из комбинации нагрузочных блоков не повреждающих типовых режимов эксплуатации.

Ускорение за счет ужесточения параметров распределения действующих напряжений. Как следует из анализа распределения Вейбулла, параметр σ_w определяет интенсивность нагружения. На рис. 1 представлено семейство кривых усталости, отличающихся параметром σ_w . Из графика следует, что с уменьшением величины параметра кривая усталости смещается в область больших значений циклической долговечности. Кроме того, при фиксированных значениях других параметров стремление параметра σ_w к бесконечности приводит к стремлению размеров нагрузочного блока "n" к одному циклу, т.е. к регулярному нагружению. Следовательно, наиболее интенсивным режимом нагружения по сравнению с любым возможным режимом нерегулярного нагружения является регулярное нагружение с

равенством напряжения регулярного нагружения максимальному напряжению нагрузочного блока.

Из функции распределения Вейбулла следует возможность реализации двух способов ускорения усталостных испытаний за счет ужесточения параметров: за счет увеличения максимального напряжения блока; за счет увеличения параметра σ_w .

Первый способ - увеличение максимального напряжения блока в диапазоне от предела выносливости до предела текучести, сохраняя при этом остальные характеристики нагруженности при типовом режиме эксплуатации. При реализации этого способа может быть предложена следующая схема планирования и анализа результатов испытаний.

По результатам регистрации нагруженности определяются характеристики блока нагружения для типового режима эксплуатации: $\hat{\sigma}$, $\hat{\sigma}$, $\sigma_{wэ}$, $w_э$. В диапазоне напряжений от предела выносливости до предела текучести не менее двух значений максимальных напряжений ($\hat{\sigma}_u$) нагрузочных блоков для испытаний. При каждом значении максимальных напряжений блока, сохраняя остальные экспериментальные значения параметров блока постоянными, - чтобы оставаться на одной и той же кривой усталости (см. рис. 1), - объекты испытывают до предельного повреждения путем многократного нагружения более интенсивными блоками нагрузок.

При регистрации число значений напряжений должно быть достаточным, чтобы размер блоков при испытаниях был значительно больше единицы. Необходимо выбрать не менее двух значений $\sigma_{wu} > \sigma_{wэ}$. Размер блоков определяется из функции распределения. Испытания ведутся при многократном повторении ужесточенных блоков до предельного повреждения. Циклическая долговечность для типового режима эксплуатации определяется путем экстраполяции результатов ускоренных испытаний в область $\sigma_{wэ}$.

2.2.2. Ускорение за счет исключения из нагрузочного блока неповреждающих напряжений. При анализе нагруженности после схематизации и приведения случайных напряжений к циклам симметричного нагружения конечным результатом может быть убывающий вариационный ряд напряжений: $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 > \dots > \sigma_j > \dots > \sigma_n$.

Так как в начальный момент нагружения при испытаниях только часть нагрузочного блока (k - значений напряжений) превышает значение предела выносливости, то, следовательно, все напряжения меньше предела выносливости, - а их " $n-k$ ", - могут быть исключены из повреждения. По мере снижения предела выносливости в процессе усталостного повреждения число " k " повреждающих циклов напряжений растет. Они будут подключаться к процессу повреждения до момента предельного повреждения.

Предлагаемый способ ускорения усталостных испытаний предусматривает исключение из нагрузочного блока при испытаниях всех не повреждающих циклов напряжений. Для реализации способа необходимо использовать разработанный метод суммирования усталостных повреждений с учетом снижения предела выносливости и управлять изменением размеров нагрузочного блока в процессе испытаний.

Рассматриваемый способ разработан в Институте надежности машин Национальной академии наук Беларуси (авторы: Е.К. Почтенный, В.И. Шоломицкий, А.А. Ракицкий) и защищен патентом Российской Федерации.

Ускорение за счет исключения из комбинации нагрузочных блоков не повреждающих режимов нагружения. Реальное нагружение автомобильных конструкций - это комбинация различных типовых режимов нерегулярного нагружения. Суммарное число циклов до предельного повреждения определяется долевым участием в повреждении каждого типового режима нагружения:

$$\frac{1}{N_{\Sigma}} = \frac{\beta_1}{N_1} + \frac{\beta_2}{N_2} + \frac{\beta_3}{N_3} + \dots + \frac{\beta_i}{N_i} + \dots + \frac{\beta_n}{N_n},$$

где N_{Σ} - суммарное число циклов до предельного повреждения при действии комбинированного режима нагружения, N_i - число циклов до предельного повреждения при i - том режиме нагружения, β_i - относительная продолжительность i - го режима.

Уравнение дает возможность: оценить влияние каждого типового режима нагружения; выявить типовые режимы незначительно влияющие на конечный результат; исключить из комбинированного воздействия при испытаниях типовые режимы, которые незначительно влияют на оценку циклической долговечности.

Ускорение за счет исключения из комбинации нагрузочных блоков не повреждающих частот нагружения. В типовых условиях эксплуатации при действии многократно повторяющихся блоков случайного многочастотного нагружения суммарное повреждающее действие всех одновременно действующих нагрузочных блоков L_c равно сумме повреждающих действий нагрузочных блоков каждой частоты L_i :

$$\frac{1}{L_c} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_i} + \dots + \frac{1}{L_k} = \sum_{i=1}^{i=k} \frac{1}{L_i}.$$

Анализ ресурса с помощью последнего уравнения позволяет исключить неповреждающие частоты из нагрузочных режимов при испытаниях.

Способы ускорения усталостных испытаний при регулярном нагружении. При регулярном нагружении ускорение испытаний может быть достигнуто за счет: увеличения максимального напряжения цикла; уменьшения коэффициента асимметрии нагружения; увеличения частоты нагружения.

Ускорение за счет увеличения максимального напряжения цикла. При постоянном коэффициенте асимметрии цикла в условиях регулярного нагружения циклическую долговечность можно определить с использованием уравнения

$$N = N_G \cdot \left(\frac{\sigma_R}{\sigma} \right)^m,$$

где σ_R - предел выносливости при коэффициенте асимметрии нагружения R , σ - максимальное напряжение цикла, N - число циклов до разрушения или предельного повреждения, N_G - число циклов до точки перелома кривой усталости, m - показатель степени, характеризующий наклон кривой усталости в системе координат: логарифм напряжения – логарифм числа циклов до разрушения и равный:

$$m = \frac{\lg N_G - \lg N}{\lg \left(\frac{\sigma}{\sigma_R} \right)}.$$

С ростом величины показателя степени угол наклона кривой усталости уменьшается. Отметим, что отношение $\left(\frac{\sigma}{\sigma_R} \right)$ называют *степенью перегрузки* объектов

испытаний и, при росте степени перегрузки за счет увеличения максимального напряжения цикла, число циклов до разрушения существенно снижается.

Для графического построения уравнение кривой усталости может быть переписано следующим образом:

$$\lg N = \lg N_G - m \cdot \lg \frac{\sigma}{\sigma_R}.$$

Эффективность повышения максимального напряжения цикла для ускорения испытаний можно проиллюстрировать. Для образцов стали 10ХСНД, используемой в

качестве материала для несущих систем автомобилей, при $R=0$: $\sigma_R=307$ МПа; $m=5,49$; $N_G=1,127 \cdot 10^6$.

Рассмотрим увеличение максимального напряжения цикла с 350 до 450 МПа. При этом степень перегрузки растет с 1,1401 до 1,4658, а циклическая долговечность снижается с 549 до 138 тыс. циклов, т.е. практически в 4 раза.

В том случае, когда известны значения N_G и m , достаточно провести испытания на одном уровне напряжений. При отсутствии этой информации испытания ведутся на двух уровнях напряжений. Ограничением при выборе максимального напряжения цикла должна быть величина предела текучести, при достижении которой объект испытаний может не только пластически деформироваться в локальных зонах, но и потерять свою первоначальную форму.

Ускорение за счет уменьшения коэффициента асимметрии цикла. На рис. 2. представлены кривые усталости при разных значениях коэффициента асимметрии цикла. Из графика видно, что снижение коэффициента асимметрии цикла при фиксированном максимальном напряжении цикла приводит к снижению циклической долговечности. Отметим, что снижение коэффициента ниже -1 не дает ускоряющего эффекта и эту величину можно считать предельной.

Ускорение достигается снижением как предела выносливости, так и угла наклона кривой усталости. Снижение предела выносливости описывается уравнением Серенсена-Кинасошвили: $\sigma_{aR} = \sigma_{-1} - \psi \cdot \sigma_{mR}$, где σ_{-1} - предел выносливости при симметричном нагружении ($R=-1$), σ_{aR} и σ_{mR} - амплитуда и среднее значение предела выносливости в диапазоне значений коэффициента асимметрии нагружения от -1 до +1, ψ - коэффициент чувствительности к асимметрии нагружения, величина которого равна $\psi = \frac{2\sigma_{-1}}{\sigma_0} - 1$, где σ_0 - предел выносливости при отнулевом нагружении ($R=0$).

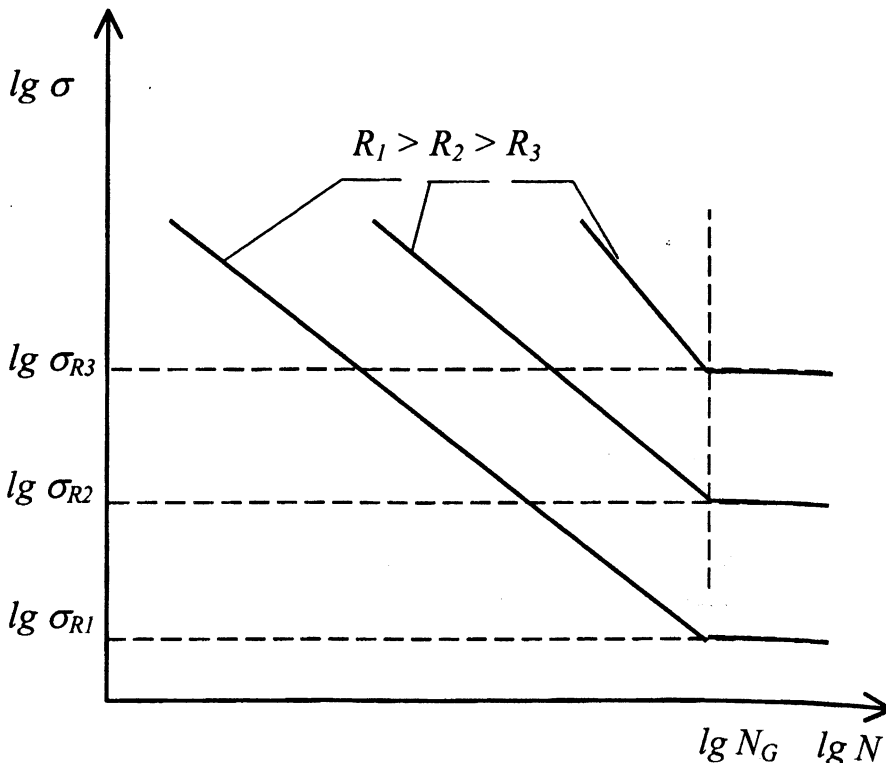


Рис. 2. Кривые усталости с разными коэффициентами асимметрии циклов напряжений

Учитывая, что $\sigma_R = \sigma_{aR} + \sigma_{mR}$ и $\sigma_{mR} = \sigma_R \cdot \frac{1+R}{2}$, получаем уравнение для описания зависимости предела выносливости от коэффициента асимметрии:

$$\sigma_R = a \cdot \sigma_{-1},$$

где

$$a = \frac{1}{1 - \frac{(1-\psi) \cdot (1+R)}{2}}.$$

Из уравнения следует, что с уменьшением коэффициента асимметрии от +1 до -1, коэффициент "а" изменяется от $\frac{1}{\psi}$ (где ψ меньше единицы) до 1, а значения σ_R уменьшается от $\frac{\sigma_{-1}}{\psi}$ до σ_{-1} .

Например, для образцов стали 17Г1С, используемой для изготовления несущих систем автомобилей, при $\sigma_0 = 247$ МПа, $\sigma_{-1} = 149$ МПа, $\psi = 0,2065$, предел выносливости в теоретически рассматриваемом диапазоне от +1 до -1 снижается с 722 до 149 МПа. Следовательно, имеет место тот же эффект, что и при повышении максимального напряжения цикла при постоянной величине предела выносливости.

Кроме того, при снижении асимметрии нагружения уменьшается угол наклона кривой усталости. Так, например, для тех же образцов стали 17Г1С: $m_0 = 4,58$ и $m_{-1} = 8,11$. Если исходить из линейной зависимости показателя степени от асимметрии нагружения, то в диапазоне асимметрии от +1 до -1 можно записать:

$$m_R = m_0 - (m_{-1} - m_0) \cdot R.$$

Следовательно, ускорение испытаний за счет снижения асимметрии нагружения является весьма эффективным средством. При переходе, например, с отнулевого нагружения к симметричному для образцов стали 17Г1С при максимальном напряжении цикла 250 МПа циклическая долговечность снижается с 621 до 19,9 тыс. циклов, т.е. в 31,2 раза.

2.1.3. Ускорение за счет увеличения частоты нагружения. Заслуживает внимания ускорение усталостных испытаний повышением частоты нагружения. Экспериментально показано, что увеличение частоты нагружения достаточно надежно можно производить в диапазоне от 1 до 50 Гц, если увеличение не ограничивается амплитудно-частотными характеристиками испытательного оборудования. Но необходимо отметить, что при реализации частотного ускорения необходимо учитывать два явления: влияние динамики нагружения на напряженно-деформированное состояние опасных зон объектов испытаний; наличие теплового эффекта при циклическом нагружении и его зависимость от частоты.

Исследования показывают, что использование регистрации нагружения с помощью силоизмерителя приводит к завышенным оценкам напряжений, при этом ошибка растет как с ростом частоты нагружения, так и с ростом номинальной нагрузки. Это объясняется тем, что упругая деформация отстает от изменения нагрузки. Так, например, для образцов стали 10ХСНД рост частоты с 2 до 25 Гц при амплитуде нагрузки 18 кН дает ошибку в оценке напряжения 2 %, то при амплитуде 54 кН ошибка составляет уже 17%.

Следовательно, при планировании испытаний с ускорением по частоте оценку напряженного состояния необходимо предусматривать с помощью тензорезистора, а не силоизмерителя.

Второе явление - нагрев объекта испытаний при циклическом нагружении, который является следствием того, что при нагружении имеет место не только упругая,

но и пластическая деформации. Чем больше напряжение, тем больше величина пластической деформации за цикл, которая проявляется в виде превратившейся в тепловую внешней механической энергии. Тепловой эффект может быть причиной изменения механических свойств материала или искажения формы объекта. Избежать перегрева можно или ограничением частоты по предельной температуре, или принудительным охлаждением объекта испытаний.

3. Перспективы и основные направления развития ускорения испытаний несущих конструкций мобильных машин. Анализ предложенных принципов ускорения испытаний позволяет сформулировать рекомендации по их использованию для разработки соответствующих методов ускоренных испытаний. Основным принципом ускорения испытаний, по мнению авторов, является направление на переход от испытаний при нерегулярном нагружении к испытаниям при регулярном нагружении. А это возможно на основании разработанной связи между регулярным и нерегулярным нагружением. Предложенные принципы ускорения испытаний позволили разработать ряд методов различной степени скорости и точности расчетно-экспериментального прогнозирования ресурса конструкций и деталей машин и дают возможность обоснованно развивать общую методику и разрабатывать новые методы ускорения испытаний. Разработанная методика использована при проведении стендовых испытаний и для расчетно-экспериментальной оценки эксплуатационного ресурса рамы автомобиля-тягача, перспективных типажа осей и элементов подвесок прицепного состава и других несущих конструкций автомобильной техники Минского автозавода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Почтенный Е.К. Кинетическая теория механической усталости. - Минск: Наука и техника, 1973.-216 с.;
2. Почтенный Е.К. Прогнозирование долговечности и диагностика усталости деталей машин. – Минск, Наука и техника, 1983, 246 с. ил.;
3. ГОСТ 25.101-83. Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов. - Введ. с 01.07.84. -М.: Изд-во стандартов, 1982. - 29 с.;
4. ГОСТ25.507-85. Методы испытаний на усталость при эксплуатационных режимах нагружения. - Введ. 01.07.86. -М.: Изд-во стандартов, 1985. - 31 с.;
5. Автоматизированная система ускоренных испытаний автомобильных конструкций/ М.С. Высоцкий, А.А. Ракицкий, М.И. Горбацевич, В.И. Петько и др. - Минск: Наука и техника, 1989. - 168 с.;
6. Почтенный Е.К., Капуста П.П. Об одном подходе к ускорению испытаний деталей машин// Надежность и безопасность технических систем: Тез. докл. междунар. научно-техн. конф. (28-29 октября 1997 г., г. Минск)/ Составители: Жук И.В., Скороходов А.С., Солитерман Ю.Л. и др. – Минск: Белорганкипромиздат, 1997.
7. Почтенный Е.К., Кадолко Л.И., Горбацевич М.И., Капуста П.П., Минюкович С.М. Ускоренные испытания рамы автомобиля// Автомобильная промышленность. – 1998. - № 7. - С. 25-26.
8. Почтенный Е.К., Капуста П.П., Горбацевич М.И., Слабко И.А. Принципы ускорения стендовых испытаний несущих конструкций мобильных машин// В сб. Материалы международной 54-й научно-технической конференции профессоров, преподавателей, научных работников и аспирантов БГПА: В 10 – ти частях. – Минск, – 2000. – Ч. 6. – С. 97.;
8. Почтенный Е.К., Капуста П.П., Слабко И.А. Методика ускоренных испытаний при регулярном нагружении и прогнозирование эксплуатационного ресурса несущих конструкций машин// В сб. Надежность машин и технических систем// Материалы международной научно-технической конференции: В 2 т. (16 – 17 октября 2001 г., Минск)/ Под общей ред. О.В. Берестнева. – Минск:

Институт технической кибернетики НАН Беларуси, 2001.–Т.1.–С.141–142.; 9. Почтенный Е.К. Кинетика усталости машиностроительных конструкций. - Минск, “Арти-Фекс”, 2002, 186 с. ил.

УДК 621.88.084

А.Т. Скойбеда, Д. Эльмессауди

ДИАГНОСТИКА ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Целью данной статьи является показать возможность обнаружения дефектов подшипников качения во время эксплуатации посредством анализа сигнала вибрации и определение степени развития дефектов, чтобы иметь возможность оценить остаточный ресурс подшипника.

Спектр и форма сигнала вибрации содержит информацию о характерных дефектах подшипников качения. В зависимости от вида дефекта эта информация имеет специфические особенности. Дефектами, которые можно распознать с помощью вибрационного анализа, являются:

дефекты внутренней и внешней дорожек качения, дефекты элементов качения, дефекты сепаратора, ослабление посадки подшипника, увеличенный внутренний зазор, проворачивание внутреннего кольца и дефекты смазки.

Подшипник качения состоит из n элементов: наружное кольцо, внутреннее кольцо, сепаратор, тела качения. Во время эксплуатации подшипника его элементы могут находиться во множестве технических состояний: (хорошее, допустимое, критическое, опасное).

Пусть f состояние, в котором может находиться подшипник во время эксплуатации:

$$f: X_i \rightarrow [0,1], \quad (1)$$

$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ - информативные сигналы

$Y = f(x_i) = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ - сигналы на выходах.

Уравнение (1) показывает что, каждый элемент $x \in X$ имеет значения $f(x) \in [0,1]$.

Допустим, что: 1) если $f(x) = 0$, то это означает, что подшипник находится в хорошей состоянии;