

И. Д. ВИЛЬНЕР, Ф. В. ГОЛОВ

ПОГРЕШНОСТИ СЛЕДЯЩЕГО АНАЛИЗА
ИЗ-ЗА НЕТОЧНОГО ЗАДАНИЯ ЧАСТОТЫ НАСТРОЙКИ

При вибрационной диагностике напряженных вращающихся узлов (подшипники, шестерни, элементы роторов) применяется метод выделения и последующего анализа тех частотных составляющих процесса вибраций, которые характеризуют состояние этих узлов. Такими частотами являются частоты вращения, соударений и их гармоники. Для выделения частот используется фильтрация с полосой пропускания фильтра порядка 1% и менее. Частота вращения диагностируемых узлов не является постоянной, поэтому фильтрация должна проводиться с непрерывной подстройкой под частоту вращения детали. Так как деталь приводится во вращение ротором, то для задания частоты настройки достаточно измерить только частоту вращения ротора, которая затем пересчитывается в частоту настройки. Следящий анализ может быть реализован на ЭВМ. Одним из возможных алгоритмов является

$$y(t_0) = \frac{1}{L} \left| \int_{-\infty}^{t_0} x(t) \exp \{ j \omega t + \tau \omega (t - t_0) \} dt \right|,$$

где L — нормирующая постоянная;

τ — постоянная, определяющая полосу пропускания фильт-

$$\text{ра: } \tau = \frac{\Delta f}{2};$$

ω — круговая частота настройки фильтра;

Δf — относительная полоса пропускания фильтра.

Этот алгоритм удобен для реализации на ЭВМ, так как позволяет вести расчет по рекурсивным формулам по мере поступления информации.

Для простоты расчетов примем $t_0 = 0$ и ошибки определения частоты настройки фильтра введем в анализируемый процесс:

$$x(t) = \sin \omega [1 + \beta(t)] t.$$

Предположим, что $\beta(t)$ — случайная ошибка.

Для нормального закона распределения ошибки с параметрами $(0, \sigma)$ относительная ошибка Δ_n определения амплитуды

$$\Delta_n = 1 - \sqrt{\pi} z l^2 [1 - \Phi(z)], \quad (1)$$

$$\text{где } \Phi(z) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \int_0^z l^{-l^2} dt,$$

$$z = \sqrt{\frac{\tau}{2\sigma}}.$$

Для равномерного закона распределения ошибки с параметрами $[-\beta_0, \beta_0]$ относительная ошибка Δ_p определения амплитуды

$$\Delta_p = 1 - \frac{\tau}{\beta_0} \operatorname{arctg} \frac{\beta_0}{\tau}. \quad (2)$$

Формулы относительных ошибок получены вычислением интеграла вида

$$y(t) = \left\langle \int_0^{\infty} l^{-\tau_0 t} \sin \omega t \cdot \sin \omega [1 + \beta] t dt \right\rangle,$$

где $\langle \quad \rangle$ — операция математического ожидания.

При реализации следящего анализа на ЭВМ система обработки информации строится следующим образом: сигналы датчиков регистрируются на магнитофон, а затем с помощью системы «аналог-код» в виде кодов вводятся в ЭВМ. Значение частоты настройки определяется измерением временного интервала (путем подсчета количества периодов калиброванной частоты, попавших в заданный интервал) между соответствующими точками сигнала с датчика оборотов. При использовании тахометрического датчика, дающего гармонику с частотой, пропорциональной частоте вращения, измеряется период гармонического сигнала, а при использовании импульсного датчика, когда частота следования импульсов пропорциональна частоте вращения — период следования импульсов. При такой системе обработки возникают следующие погрешности задания частоты настройки: от детонации магнитной ленты (МЛ) магнитофона при записи и воспроизведении, от искажения формы импульсов (гармоники), от дискретности измерения времени, кинематической цепи от датчика оборотов до диагностируемой детали.

Рассмотрим каждый вид погрешности. При записи и воспроизведении сигналов на магнитофоне, в результате изменения скорости движения МЛ возникают ошибки детонации. Процесс изменения скорости движения ленты — нормальный случайный процесс, с параметрами закона распределения (V, σ_V) . Если

$s(\Omega)$ — спектральная плотность детонации, то дисперсия скорости

$$D_V = \int_0^{\Omega_0} s(\Omega) d\Omega,$$

Значение Ω_0 определяется через частоту опроса информации f_0 . Поэтому среднеквадратическое отклонение будет зависеть от частоты опроса:

$$\sigma_V = V \overline{D_V} = \left(\int_0^{\pi f_0} s(\Omega) d\Omega \right)^{1/2}.$$

Зная величину σ_V , можно вычислить относительную погрешность от детонации МД по формуле (1).

Погрешности от искажения формы импульсов (гармоники) возникают из-за электрических помех.

Импульсный сигнал представим в виде

$$\gamma(t) = N(t) + \xi(t),$$

где $N(t)$ — импульсный процесс;

$\xi(t)$ — шумовая помеха.

Закон распределения шумовой помехи — нормальный с параметрами $(0, \sigma_\xi^2)$. Тогда, при измерении интервала Δt , среднеквадратическое отклонение ошибки

$$\sigma_\gamma = \left| \frac{V \sqrt{2} \sigma_\xi}{N'(t) \Delta t} \right|,$$

где $N'(t)$ — производная в характерной точке импульса.

Относительная погрешность от искажения формы импульса может быть вычислена по уравнению (1), при известном σ_γ .

Погрешность от дискретности измерения времени является случайной функцией с равномерным законом распределения. Если измеряется временной интервал Δt и частота опроса f_0 , то границы изменения погрешности

$$\rho_0 = \pm \frac{1}{2\Delta t f_0}.$$

Относительная погрешность от дискретности может быть вычислена по формуле (2).

Кинематическая погрешность появляется для диагностируемой детали, так как измеряется частота вращения ротора, которая затем пересчитывается в частоту вращения детали, связанной с ротором кинематически. Связь детали с ротором осуществляется через элементы, имеющие геометрические погрешности.

Для детали, имеющей связь с ротором через группу в n шестерен, среднеквадратическое отклонение вычисляется по формуле

$$\sigma_k = \sigma_t \sqrt{n},$$

где σ_t — среднеквадратическое отклонение относительной ошибки основного шага для шестерни.

Так как кинематическая погрешность распределена нормально, то по уравнению (1) можно вычислить относительную погрешность. Суммарная относительная погрешность вычисляется по формуле

$$\Delta = \sqrt{\Delta_\gamma^2 + \Delta_V^2 + \Delta_D^2 + \Delta_k^2},$$

где Δ_V , Δ_γ , Δ_D , Δ_k — вычисленные относительные погрешности от детонации, искажения формы импульса, дискретности и кинематической погрешности соответственно.

По проведенным экспериментальным работам были получены данные по погрешностям. Влияние детонации изучалось на магнитофоне «Юпитер 201». Для частоты $f_0 > 300$ Гц значение $\sigma_V = 0,004$. Для датчика ИС-445 (импульсный)

$$\sigma_\gamma = \frac{0,3 \cdot 10^{-6}}{\Delta t},$$

а для тахометрического типа ДТЭ-5М погрешность не зависит от Δt :

$$\sigma_\gamma = 0,02.$$

Из приведенных погрешностей для датчиков ИС-445 и ДТЭ-5М видно, что тахометрический датчик обладает значительно худшими метрологическими свойствами. Например, для реального значения $\Delta t = 0,01$ среднеквадратическое отклонение тахометрического датчика более чем в 600 раз превосходит отклонение для импульсного; поэтому из дальнейшего рассмотрения датчик ДТЭ-5М исключается.

Граница изменения погрешности от дискретности для частоты опроса $f_0 = 25$ кГц по формуле (3)

$$\sigma_0 = \pm \frac{2 \cdot 10^{-5}}{\Delta t}.$$

Кинематическая погрешность при заданной ошибке основного шага в 7 мкм и для колес с $m = 3$ при $n < 9$

$$\sigma_k = \frac{\delta_t}{p \cdot \pi \cdot m \cdot \cos \alpha} \cdot \sqrt{n} < 8 \cdot 10^{-4},$$

где p — число среднеквадратических отклонений в допуске;

δ_l — допуск на отклонение основного шага;
 m — модуль зубчатого колеса;
 α — угол зацепления.

Относительные ошибки определения амплитуды при заданных погрешностях для фильтров с 1 и 0,5% полосой пропускания соответственно равны ($\Delta l = 0,01$): $\Delta_V = 0,31; 0,72; \Delta_{\gamma} = 0; 0; \Delta_D = 0,14; 0,15; \Delta_k = 0; 0; \Delta = 0,33; 0,865$.

Следовательно, погрешности могут быть очень велики и снижать амплитуду в несколько раз. При применении импульсных датчиков оборотов основную долю в погрешности вносят детонация и дискретность измерения времени. Для компенсации детонации необходимо применять запись синхронимпульсов на магнитную ленту и считывание информации производить по этим синхронимпульсам. Для компенсации ошибок дискретизации можно рекомендовать применение низкочастотных цифровых фильтров, например, рекурсивных [1]:

$$u_k = a u_{k-1} + (a-1) n_k,$$

где a — постоянная, определяющая частотную характеристику фильтра;

n_k — значение частоты вращения детали.

Выводы

При реализации следящего анализа на ЭВМ необходимо учитывать влияние неточного задания частоты настройки на погрешность определения амплитуды заданной гармоника. Наиболее сильное влияние на погрешность оказывает детонация магнитной ленты регистратора, а также дискретность измерения временных интервалов, задающих частоту вращения. При применении импульсных датчиков погрешность от искажения формы импульсов мала. Кинематическая погрешность, возникающая вследствие геометрических погрешностей передающих вращение деталей, также незначительна.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. М., «Мир», 1975.