

чения σ_{10} приводит к изменению φ на $0,35^\circ$.

В разрабатываемых нами толщиномерами достигается возможность измерения φ с точностью $0,1^\circ$ при частотах сигнала до 8 МГц. Из вышесказанного следует, что по измерениям φ можно зафиксировать отклонения величины σ_1 от σ_{10} , составляющее $20\%/3,5 \approx 5,7\%$. Как было показано выше, при $F=5,8$ МГц увеличение σ_1 на 20% относительно σ_{10} приводит к возникновению погрешности определения d , равной 16%. Следовательно, в рассматриваемом случае увеличение σ_1 на 5,7% (то есть то, что мы можем зафиксировать при измерениях φ прибором) приведет к по-

грешности определения d , равной 4,6%. Достичь уменьшения указанной погрешности измерения d возможно лишь за счет повышения точности измерения фазы вносимой ЭДС вихревого преобразователя.

1. Рубин А.Л., Пахомова В.Г., Реакция ферромагнитного полупространства с немагнитным слоем на датчик накладного типа // Дефектоскопия. – 1974. – №3. – С. 36-40.
2. Соболев В.С., Шкарлет Ю.М. Накладные и экранные датчики. - Новосибирск: Наука, 1967. – 144 с.

УДК 53.088.6

ИЗМЕРЕНИЕ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ВРАЩАЮЩИХСЯ ПО КРЕНУ ОБЪЕКТОВ

Шведов А.П., Лихошерст В.В.

Тульский государственный университет

Тула, Российская Федерация

Интерес представляет задача измерения угловой скорости крена малоразмерных объектов, вращающихся с большой угловой скоростью по углу крена.

На малогабаритных объектах в диапазоне угловых скоростей свыше 2000 – 4000 градусов/с целесообразно использовать измерительную схему, реализуемую с помощью двух встречно направленных акселерометров, разнесенных относительно оси вращения [1].

Погрешность определения угловой скорости с помощью двух акселерометров обусловлена погрешностью самих датчиков, а также погрешностью установки датчиков относительно продольной оси изделия.

Вопросы, связанные с компенсацией погрешности коэффициента передачи, уровня нулевого сигнала, нелинейности подробно изложены в работе [2], поэтому их рассматривать не будем.

Учет погрешностей перекрестной чувствительности и рассогласования осей осуществляется за счет применения акселерометров, оси чувствительности которых ориентированы перпендикулярно к измерительным.

Можно показать, что в данном случае важна лишь взаимная ориентация осей, а не их расположение относительно корпуса, так как в противном случае, при наличии поперечных вибраций, в сигнале угловой скорости будут наблюдаться существенные пульсации. Поэтому при определении отклонения осей одну из осей датчика будем считать совпадающей с одной из осей связанной системы координат (рисунок 1).

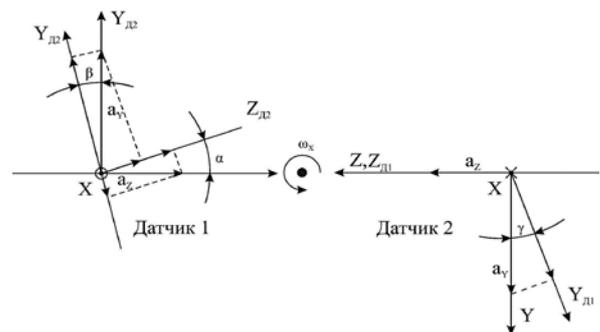


Рисунок 1 – К определению углов рассогласования осей датчиков

В этом случае показания датчика 1 и 2 связаны с проекциями ускорения на оси связанной системы координат по выражениям:

$$\begin{cases} a_Z = \frac{\cos \alpha}{\cos(\alpha - \beta)} a_{ZД2} - \frac{\sin \alpha}{\cos(\alpha - \beta)} a_{YД2}, \\ a_Y = \frac{\sin \beta}{\cos(\alpha - \beta)} a_{ZД2} + \frac{\cos \beta}{\cos(\alpha - \beta)} a_{YД2}, \end{cases} \quad \begin{cases} a_Z = a_{ZД1}, \\ a_Z = a_{ZД1} \operatorname{tg} \gamma + \frac{a_{YД1}}{\cos \gamma}, \end{cases}$$

где a_Y, a_Z – проекции ускорения на оси Y и Z связанной системы координат; $a_{YД2}, a_{ZД2}$ – проекции ускорения на оси чувствительности датчика 1 $Y_{Д2}$ и $Z_{Д2}$; $a_{YД1}, a_{ZД1}$ – проекции ускорения на оси чувствительности датчика 2 $Y_{Д1}$ и $Z_{Д1}$;

Определение углов α, β, γ реализуется по одной из методик, описанных в [2].

При установке акселерометров возможно смещение датчиков, обусловленное рядом причин, и не совпадение осей датчиков с линией, соединяющей центры масс чувствительных элементов акселерометров (рисунок 2).

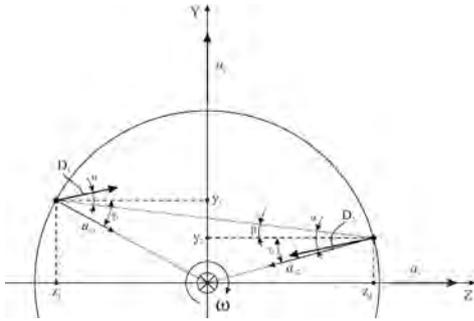


Рисунок 2 – Схема расположения акселерометров относительно оси вращения после калибровки

В этом случае угловая скорость вращения объекта ω и измеряемая угловая скорость $\omega_{И}$ связаны соотношением

$$\omega_{И} = \omega \sqrt{\frac{|x_2 - x_1|}{2r} \cdot \frac{|\cos \alpha|}{|\cos \beta|}} \quad (1)$$

В общем случае после сборки системы неизвестными оказываются координаты x_2 и x_1 , радиус установки акселерометров r , а также углы α и β , однако, согласно (1), их суммарное влияние можно учесть с помощью некоторого масштабного коэффициента k :

$$\omega_{ДК} = \omega \cdot k, \text{ где } k = \sqrt{\frac{|x_2 - x_1|}{2r} \cdot \frac{|\cos \alpha|}{|\cos \beta|}}.$$

В свою очередь, коэффициент k легко определяется путем сопоставления измеренной и истинной угловой скорости крена в процессе калибровки.

Случайная составляющая v погрешности акселерометров в большинстве случаев представляет собой нормально распределенную центрированную случайную величину с среднеквадратическим отклонением σ .

Несложно показать, что в этом случае угловая скорость, измеряемая системой, при компенсации систематических погрешностей акселерометров определяется выражением

$$\omega_{ДК} = \sqrt{\omega^2 + \frac{v}{r}}.$$

Учитывая, что систематическая составляющая в $\omega_{ДК}$ скомпенсирована, представим его виде

$$\omega_{ДК} = \omega + v_{\omega},$$

где v_{ω} – случайная погрешность $\omega_{ДК}$.

Тогда плотность распределения вероятности $p(v_{\omega})$ случайной величины v_{ω} определяется выражением

$$p(v_{\omega}) = \begin{cases} \frac{2(v_{\omega} + \omega)r}{\sqrt{2\pi}\sigma} \left\{ \exp\left(-\frac{r^2[(v_{\omega} + \omega)^2 - \omega]^2}{2\sigma^2}\right) + \right. \\ \left. + \exp\left(-\frac{r^2[(v_{\omega} + \omega)^2 + \omega]^2}{2\sigma^2}\right) \right\}, \text{ при } v_{\omega} \geq -\omega \\ 0, \text{ при } v_{\omega} < -\omega \end{cases} \quad (2)$$

Анализ зависимости математического ожидания случайной величины v_{ω} от угловой скорости показывает, что она зависит от угловой скорости и снижается при ее увеличении.

Из-за наличия ненулевого математического ожидания v_{ω} , помимо погрешности масштабного коэффициента k , в выходном сигнале $\omega_{И}$ будет наблюдаться постоянная составляющая погрешности (рисунок 3) и угловую скорость вращения изделия можно представить в виде

$$\omega = k(\omega_{И} - n), \quad (3)$$

где n – смещение нулевого сигнала, обусловленное математическим ожиданием случайной величины v_{ω} ;

k – масштабный коэффициент.

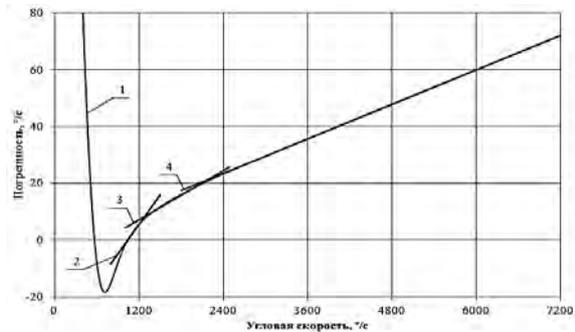


Рисунок 3. Влияние случайной погрешности акселерометров на точность измерения угловой скорости крена: (1 – $\Delta\omega(\omega)$; 2 – линейная аппроксимация в диапазоне угловых скоростей 1000÷1300 °/с; 3 – линейная аппроксимация в диапазоне угловых скоростей 1300÷2500 °/с; 4 – линейная аппроксимация в диапазоне угловых скоростей 2500÷7200 °/с)

Из рисунка 3 видно, что зависимость $\Delta\omega$ от ω нелинейна. Однако для рабочего диапазона измерительной схемы измерения (от 2000 до 7200 °/с) она может быть аппроксимирована с помощью трех прямых. То есть может рассматриваться как линейная в трех диапазонах частот, а значения коэффициентов k и n для выражения (3) в этих диапазонах можно считать постоянными.

Таким образом, для компенсации погрешности угловой скорости $\omega_{\text{и}}$ достаточно определить значение коэффициентов k и n для диапазонов частот: 1000÷1300 %/с, 1300÷2500 %/с и 2500÷7200 %/с.

Коэффициенты для данных диапазонов определяются путем снятия показаний схемы для двух значений угловой скорости из каждого диапазона.

Распределение случайной величины v_{ω} в диапазоне угловых скоростей от 1000°/с и выше близко к нормальному. Следовательно, при интегрировании v_{ω} будет наблюдаться погрешность аналогичная погрешности при интегрировании нормально распределенной случайной величины. Погрешность Δ при интегрировании нормально распределенной случайной величины определяется неравенством:

$$\Delta \leq \sigma_{\text{сл}} \sqrt{\tau t}, \quad (3)$$

где $\sigma_{\text{сл}}$ – СКО некоторой нормально распределенной случайной величины; t – время интегрирования; τ – шаг дискретизации системы.

В свою очередь, $\sigma_{\text{сл}}$ может быть определено по плотности распределения вероятности (2). Следует отметить, что погрешность, определяемая выражением (3), носит случайный характер и не может быть скомпенсирована на этапе калибровки системы.

Таким образом, величину Δ следует рассматривать как оценку максимальной точности данного метода измерения.

1. Лихошерст В.В. Датчик крена вращающихся по крену объектов / В.В. Лихошерст, В.Я. Распопов, А.П. Шведов // XXIII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов / глав. ред. академик РАН В.Г. Пешехонов. – СПб.: ГНЦ «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016. – С. 220 – 223.
2. Аш, Дж. Датчики из мерительных систем: В 2-х книгах. Кн. 2. – М.: Мир, 1992. – 424 с.