УДК 53.088

Нефедьев Дмитрий Иванович
ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет»
Россия, Пенза[1]
Заведующий кафедрой «Информационно-измерительная техника»
Доктор технических наук
Доцент
iit@pnzgu

Горячев Владимир Яковлевич
ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет»
Россия, Пенза
Заведующий кафедрой «Автоматизированные электроэнергетические системы»
Доктор технических наук
Доцент
aees.psu@yandex.ru

Гаврина Олеся Владимировна
ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет»
Россия, Пенза
Аспирант кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы»
olesya-gavrina@rambler.ru

Спектральный метод анализа погрешности информационно-измерительной системы

[1] 440026, г.Пенза, ул.Красная, 40

Аннотация. В статье рассматривается методика анализа погрешности информационно-измерительной системы путем использования математической компьютерной модели. Анализ погрешности информационно-измерительной системы необходим для того, чтобы на стадии проектирования сформировать требования к элементам информационно-измерительных систем и определить допустимые пределы изменения влияющих факторов. Это возможно только в том случае, когда проектирование ведется с использованием современных технологий, одним из элементов которых является создание имитационных моделей на базе современных компьютеров. Предлагаемая методика основана на разложении абсолютных значений погрешностей от влияния отдельных факторов на ортогональные составляющие, т. е. получить результирующую дисперсию однофакторного эксперимента и веса составляющих. Полученные относительные погрешности однофакторных воздействий позволяют получить коэффициенты для вычисления допустимых отклонений по каждому параметру. Методику определения стандартных отклонений можно сделать более гибкой путем введения коэффициентов весов, значения которых вводятся проектировщиком в зависимости от стоимости отдельных элементов, технологии, стабильности и других параметров. Изменение соотношения весов можно осуществить путем введения коэффициентов, зависящих от параметра. В результате чего рассматриваемая методика позволяет сформулировать требования к элементам информационно-измерительной системы на этапе предварительного проектирования.

Ключевые слова: погрешность; спектральный метод; анализ; информационно-измерительная система; дисперсия; ортогональное многомерное пространство; математическая модель.

Введение

На этапе предварительного проектирования информационно-измерительных систем возникает достаточно сложная задача определения степени влияния параметров отдельных элементов системы на погрешность измерения. Функция преобразования системы, в ряде случаев, представляется весьма сложной зависимостью, с помощью которой практически невозможно получить аналитическую зависимость результирующей погрешности от точности изготовления отдельных элементов и параметров устройств, обеспечивающих ее функционирование. Эта информация необходима для того, чтобы на стадии проектирования сформировать требования к элементам информационно-измерительных систем и определить допустимые пределы изменения влияющих факторов.

Для решения поставленной задачи возможно использование нескольких методов. Первый метод основан на использовании статистических данных, полученных путем тщательного анализа готовых систем с последующими метрологическими испытаниями. Такой метод требует больших материальных затрат и практически неприемлем на этапе предварительного проектирования.

Второй метод основан на анализе функции преобразования измерительной системы. Этот метод рассмотрен в ряде работ [1, 2] и дает положительный результат при анализе степени влияния того или иного фактора на погрешность измерительной системы, однако такой подход к решению задачи имеет ряд недостатков:

- при использовании функций преобразования в ряде случаев трудно получить аналитическое выражение зависимости результирующей погрешности системы от отдельного влияющего фактора;
- в функции преобразования невозможно учесть влияние некоторых конструктивных параметров.

Анализ функции преобразования позволяет выбрать параметры отдельных элементов, но не решает проблемы определения их точности. Решение обратной задачи, т. е. нахождение допустимых отклонений параметров элементов измерительной системы, при которых обеспечивается необходимая точность измерений, требует большого объема работ или просто невозможно.

Третий метод основан на использовании имитационной компьютерной модели информационно-измерительной системы. В настоящее время третий метод не требует больших материальных затрат, наиболее доступен и позволяет выработать рекомендации для проектирования ИИС за короткий отрезок времени [3].

Построение имитационной модели в последнем методе − наиболее ответственная операция, так как она должна с высокой точностью отражать все процессы, происходящие в системе.

1. Спектральные характеристики абсолютной погрешности выходного сигнала, обусловленных влиянием факторов

Выходной сигнал y любого измерительного устройства является функцией измеряемой величины x. Идеальное измерительное устройство обеспечивает однозначную зависимость $y(x)$, которая может быть записана уравнением. В большинстве случаев используется линейная зависимость $y(x)=kx$. В общем случае могут использоваться и другие зависимости. Квадратичная зависимость, например:

$$y(x) = k_0 + k_1 x + k_2 x^2 .$$

Реальное измерительное устройство не имеет идеальной характеристики и выражается зависимостью реального уровня выходного сигнала от измеряемой величины $y_r(x)$. Абсолютная погрешность измерений определяется уравнением $\Delta y(x) = y(x) - y_r(x)$ и зависит от множества факторов $a, b, c, d, \ldots$. Эти факторы можно разделить на внешние и внутренние влияющие факторы. К внешним влияющим факторам относят изменение температуры окружающей среды, изменение давления, изменение влажности, уровень вибраций и т.д. К внутренним влияющим факторам можно отнести изменение параметров элементов ИИС, от которых зависит функция преобразования при отсутствии внешних воздействий. Основой анализа результирующей погрешности измерительного устройства являются так называемые однофакторные зависимости абсолютной погрешности от влияния какого-либо из факторов при изменении входной величины в заданных пределах:

$$\Delta y_k(x) = y(x) - y_{kr}(x),$$

где $y_{kr}(x)$ - зависимость выходного сигнала от измеряемой величины при воздействии на измерительное устройство k - го фактора. Будем считать абсолютную погрешность $\Delta y_k(x)$ при любом значении x пропорциональной величине воздействующего фактора. Одновременное воздействие нескольких факторов [4] приводит к сложной зависимости абсолютной погрешности измерительного устройства от измеряемой величины, при этом будет иметь место взаимное влияние факторов.

Механизм взаимного влияния факторов легко устанавливается разложением однофакторных зависимостей абсолютной погрешности в ряд Фурье.

Рассмотрим механизм взаимодействия факторов. Зависимость абсолютной погрешности, вызванной воздействием произвольного k - го фактора, от текущего значения измеряемой величины представим рядом Фурье [5,6]:

$$\Delta y_k(x) = A_{k0} + B_{k1m}\sin\left(\frac{2\pi}{l}x\right) + C_{k1m}\cos\left(\frac{2\pi}{l}x\right) + B_{k2m}\sin\left(\frac{4\pi}{l}x\right) +$$

$$+ C_{k2m}\cos\left(\frac{4\pi}{l}x\right) + B_{k3m}\sin\left(\frac{6\pi}{l}x\right) + C_{k3m}\cos\left(\frac{6\pi}{l}x\right) + \ldots,$$

где l - предел измерений;

x - текущее значение измеряемой величины.

Особенностью ряда Фурье является то, что все слагаемые ряда являются ортогональными функциями на рассматриваемом отрезке $[0, l]$, так как

1. $$\int_0^l B_{knm}\sin\left(\frac{2k\pi}{l}x\right) C_{knm}\cos\left(\frac{2k\pi}{l}x\right) = 0,$$

2. $$\int_0^l B_{knm}\sin\left(\frac{2k\pi}{l}x\right) B_{k(n+1)m}\sin\left(\frac{2(k+1)\pi}{l}x\right) = 0,$$

3. $$\int_0^l B_{knm}\cos\left(\frac{2k\pi}{l}x\right)C_{k(n+1)m}\cos\left(\frac{2(k+1)\pi}{l}x\right)=0,$$

4. $$\int_0^l C_{knm}\cos\left(\frac{2k\pi}{l}x\right)C_{k(n+1)m}\cos\left(\frac{2(k+1)\pi}{l}x\right)=0.$$

Каждая синусоидальная составляющая ряда характеризуется амплитудой и периодом изменения функции l/k. Среднее квадратичное отклонение функции, получившее название «эффективного» или «действующего» значения, для n - ой синусоиды $B_{knm}\sin\left(\frac{2k\pi}{l}x\right)$, например, равен $\sigma_{kn}=B_{kn}=B_{km}^{a}/\sqrt{2}$. Дисперсия значений синусоидальной функции определяется квадратом среднеквадратичного отклонения функции. Если зависимость абсолютной погрешности от аргумента x представлена рядом Фурье, то дисперсия этой погрешности на отрезке равна сумме дисперсий слагаемых. Это вытекает и из свойств ряда Фурье.

$$D_k=(\sigma_k)^2=(A_{k0})^2+(B_{k1})^2+(C_{k1})^2+(B_{k2})^2+(C_{k2})^2+(B_{k3})^2+(C_{k3})^2+....$$

Среднее квадратичное отклонение абсолютной погрешности на отрезке 0 - l от действия k - го фактора определяется уравнением:

$$\sigma_k=\sqrt{D_k}\ .$$

Последние уравнения указывают на то, что среднее квадратичное отклонение σ_k равно длине отрезка, соединяющего начало координат бесконечномерного ортогонального пространства с точкой имеющей координаты по осям, равные средним квадратичным (действующим или эффективным) значениям слагаемых ряда Фурье. Разложение зависимости абсолютной погрешности того или другого влияющего фактора от текущего значения измеряемой величины в ряд Фурье имеет своей целью получение координат конца вектора в бесконечномерном ортогональном пространстве.

В дальнейшем для определения влияния отдельных факторов на погрешность системы будем использовать соотношения в бесконечномерном ортогональном пространстве. Оси бесконечномерного ортогонального пространства обозначим $z_1, z_2, z_3, z_4,...$. Тогда координаты конца вектора стандартного отклонения абсолютной погрешности k - го фактора σ_k будут равны: $z_{k1}=A_{k0}$, $z_{k2}=B_{k1}$, $z_{k3}=C_{k1}$, $z_{k4}=B_{k2}$, $z_{k5}=C_{k2}$, …, …, $x_{k7}=C_{k3}$, $z_{k8}=B_{k4}$, и т.д.

2. Определение влияния факторов на погрешность ИИС

Рассмотрим погрешность ИИС, когда на информационно-измерительную систему воздействует одновременно два фактора.

Дисперсия составляющей абсолютной погрешности, вызванная действием k - го фактора, определится в общем случае уравнением:

$$D_k=(z_{k1})^2+(z_{k2})^2+(z_{k3})^2+(z_{k4})^2+(z_{k5})^2+(z_{k6})^2+....$$

Аналогично от действия фактора $(k+1)$:

$$D_{(k+1)} = \left(z_{(k+1)1}\right)^2 + \left(z_{(k+1)2}\right)^2 + \left(z_{(k+1)3}\right)^2 + \left(z_{(k+1)4}\right)^2 + \left(z_{(k+1)5}\right)^2 + \ldots$$

Предположим, что все координаты вектора σ_k, кроме z_{k2} и z_{k3}, равны нулю. Аналогично все координаты вектора среднеквадратичного отклонения $(k+1)$ - го фактора $\sigma_{(k+1)}$, кроме $z_{(k+1)3}$ и $z_{(k+1)4}$, тоже равны нулю.

Результирующая дисперсия абсолютной погрешности от действия двух факторов определится уравнением:

$$D = \left(z_{k2}\right)^2 + \left(z_{(k+1)4}\right)^2 + \left(z_{k3} + z_{(k+1)3}\right)^2 =$$

$$= \left(z_{k2}\right)^2 + \left(z_{(k+1)4}\right)^2 + \left(z_{k3}\right)^2 + \left(z_{(k+1)3}\right)^2 + 2z_{k3}z_{(k+1)3} =$$

$$= \left(z_{k2}\right)^2 + \left(z_{k3}\right)^2 + z_{k3}z_{(k+1)3} + \left(z_{(k+1)4}\right)^2 + \left(z_{(k+1)3}\right)^2 + z_{k3}z_{(k+1)3}.$$

Сумма первых двух слагаемых является дисперсией абсолютной погрешности от действия k - го фактора. Сумма 4-го и 5-го слагаемых представляет собой дисперсию абсолютной погрешности от действия только второго фактора.

Третье и шестое слагаемые определяют взаимное влияние двух факторов. Если однофакторная дисперсия первого фактора D_k, а второго фактора $D_{(k+1)}$, то дисперсия суммарного воздействия двух факторов выразится уравнением:

$$D = D_k + z_{k3}z_{(k+1)3} + D_{(k+1)} + z_{k3}z_{(k+1)3}.$$

Введем понятие дисперсии, обусловленной воздействием k го фактора, учитывающей влияние фактора $(k+1)$:

$$D_k^{/} = D_k + z_{k3}z_{(k+1)3},$$

и дисперсии, обусловленной воздействием фактора $(k+1)$, учитывающей влияние фактора k:

$$D_{(k+1)}^{/} = D_{(k+1)} + z_{k3}z_{(k+1)3}.$$

Тогда результирующая дисперсия будет равна сумме дисперсий:

$$D = D_k^{/} + D_{(k+1)}^{/}.$$

Такая форма представления дисперсий $D_k^{/}$ и $D_{(k+1)}^{/}$ не всегда удобна при анализе погрешности, так как вторые слагаемые правых частей уравнения содержат координаты z_{k3} и $z_{(k+1)3}$. Исследования показывают, что при изменении величины воздействующего фактора соотношение координат остается неизменным. На основании этого произведем некоторые преобразования в уравнении дисперсии $D_k^{/}$.

Введем понятие веса [7,8] координат влияющего фактора в форме отношения квадрата координаты по оси к дисперсии абсолютной погрешности воздействия соответствующего фактора:

$$v_{k3} = (m_{k3})^2 = \frac{(z_{k3})^2}{D_k} \text{ и } v_{(k+1)3} = (m_{(k+1)3})^2 = \frac{(z_{(k+1)3})^2}{D_{(k+1)}}.$$

Тогда:

$$z_{k3} = m_{k3}\sqrt{D_k} = m_{k3}\sigma_k \text{ и } z_{(k+1)3} = m_{(k+1)3}\sqrt{D_{(k+1)}} = m_{(k+1)3}\sigma_{(k+1)}.$$

Произведение:

$$z_{k3}z_{(k+1)3} = m_{k3}m_{(k+1)3}\sigma_k\sigma_{(k+1)}$$

Подставив полученные выражения в уравнения для определения $D_k^/$ и $D_{(k+1)}^/$, получим:

$$D_k^/ = D_k + m_{k3}m_{(k+1)3}\sigma_k\sigma_{(k+1)} = D_k + D_k m_{k3}m_{(k+1)3}\frac{\sigma_{(k+1)}}{\sigma_k} = \\ = D_k\left(1 + m_{k3}m_{(k+1)3}\frac{\sigma_{(k+1)}}{\sigma_k}\right).$$

Аналогично:

$$D_{(k+1)}^/ = D_{(k+1)} + m_{k3}m_{(k+1)3}\sigma_k\sigma_{(k+1)} = D_{(k+1)} + D_{(k+1)}m_{k3}m_{(k+1)3}\frac{\sigma_k}{\sigma_{(k+1)}} = \\ = D_{(k+1)}\left(1 + m_{k3}m_{(k+1)3}\frac{\sigma_k}{\sigma_{(k+1)}}\right)$$

Вес влияния фактора на результирующую погрешность ИИС при независимости факторов определяется отношением дисперсии абсолютной погрешности однофакторного эксперимента к результирующей дисперсии абсолютной погрешности при многофакторном эксперименте. Такое понятие веса не учитывает взаимного влияния факторов. Предлагается расширить это понятие.

Вес влияния k- го фактора на общую погрешность определяется отношением дисперсии абсолютной погрешности, вызванной воздействием фактора с учетом влияния других факторов, к дисперсии абсолютной погрешности многофакторного эксперимента. Тогда вес воздействия фактора k определится отношением:

$$v_k = \frac{D_k^/}{D},$$

а вес фактора $(k+1)$ – отношением:

$$v_{(k+1)} = \frac{D_{(k+1)}^/}{D}.$$

Если допустимые отклонения факторов определять из условия равенства весов, то:

$$\frac{D_k^{/}}{D} = 0{,}5 \text{ и } \frac{D_{(k+1)}^{/}}{D} = 0{,}5 \text{ или } D_k^{/} = 0{,}5D \text{ и } D_{(k+1)}^{/} = 0{,}5D.$$

Другими словами, получаем два уравнения:

$$D_k + D_k m_{k3} m_{(k+1)3} \frac{\sigma_{(k+1)}}{\sigma_k} = 0{,}5D;$$

$$D_{(k+1)} + D_{(k+1)} m_{k3} m_{(k+1)3} \frac{\sigma_k}{\sigma_{(k+1)}} = 0{,}5D,$$

или в другой форме:

$$\sigma_k^2 + m_{k3} m_{(k+1)3} \sigma_k \sigma_{(k+1)} = 0{,}5D;$$

$$\sigma_{(k+1)}^2 + m_{k3} m_{(k+1)3} \sigma_k \sigma_{(k+1)} = 0{,}5D.$$

Из полученной системы легко найти стандартные отклонения абсолютных погрешностей факторов σ_k и $\sigma_{(k+1)}$. Их равенство очевидно: $\sigma_k = \sigma_{(k+1)}$.

По стандартным отклонениям определяем допустимые пределы изменения влияющих факторов.

Рассмотрим общий случай взаимодействия факторов.

Если погрешность датчика определяется воздействием n влияющих факторов, то абсолютная погрешность в зависимости от значения аргумента x представляется рядом Фурье от действия первого фактора:

$$\Delta y_1 = A_{10} + B_{11m}\cos cx + C_{11m}\sin cx + B_{12m}\cos 2cx + C_{12m}\sin 2cx +$$
$$+ B_{13m}\cos 3cx + +C_{13m}\sin 3cx + ... + B_{1lm}\cos lcx + C_{1lm}\sin lcx,\ c = \frac{2\pi}{l},$$

где l - предел изменений x.

Обозначим $A_{10} = z_{11}$, $B_{11} = z_{21}$, $C_{11} = z_{31}$, $B_{12} = z_{41}$, и т. д.

Квадрат действующего значения результирующего отклонения определяется формулой:

$$D_1 = \sigma_1^2 = z_{11}^2 + z_{21}^2 + z_{31}^2 + z_{41}^2 + z_{51}^2 + z_{61}^2 + z_{71}^2 + ... + z_{l1}^2,$$

тогда веса координат по осям среднеквадратичного отклонения определятся уравнениями:

$$v_{11} = \frac{z_{11}^2}{\sigma_1^2};\ v_{21} = \frac{z_{21}^2}{\sigma_1^2};\ v_{31} = \frac{z_{31}^2}{\sigma_1^2};\ v_{41} = \frac{z_{41}^2}{\sigma_1^2};\text{ и т.д.}$$

Таким образом, уравнение дисперсии примет следующий вид:

$$D_1 = \sigma_1^2 (v_{11} + v_{21} + v_{31} + v_{41} + ... + v_{l1}).$$

Очевидно соотношение:

$$v_{11} + v_{21} + v_{31} + v_{41} + ... + v_{l1} = 1.$$

Аналогичные соотношения справедливы для всех других факторов.

Дисперсия воздействия второго фактора:

$$D_2 = \sigma_2^2 (v_{12} + v_{22} + v_{32} + v_{42} + ... + v_{l2}).$$

Дисперсия абсолютной погрешности от воздействия n - го фактора:

$$D_n = \sigma_n^2 (v_{1n} + v_{2n} + v_{3n} + v_{4n} + ... + v_{l.n}).$$

С учетом взаимодействия различных факторов получим:

$$D_1^{/} = \sigma_1^2 (v_{11} + v_{21} + v_{31} + v_{41} + ... + v_{l1}) +$$

$$+ \frac{\sigma_2}{\sigma_1} (m_{11}m_{12} + m_{21}m_{22} + m_{31}m_{32} + m_{41}m_{42} + ... + m_{l1}m_{l2}) +$$

$$+ \frac{\sigma_3}{\sigma_1} (m_{11}m_{13} + m_{21}m_{23} + m_{31}m_{33} + ... + m_{l1}m_{l3}) + ...$$

$$+ \frac{\sigma_n}{\sigma_1} (m_{11}m_{1n} + m_{21}m_{2n} + m_{31}m_{3n} + ... + m_{l1}m_{l.n}))$$

Сумма весов всех гармонических составляющих спектра воздействия любого фактора равняется единице. Обозначим выражение, заключенное в скобки:

$$\left(m_{11}m_{12} + m_{21}m_{22} + m_{31}m_{32} + m_{41}m_{42} + ... + m_{l1}m_{l2}\right) = K_{21},$$

где K_{21} – коэффициент влияния второго фактора на дисперсию от действия первого фактора. Тогда результирующая дисперсия фазы от действия всех факторов с учетом их взаимного влияния выразится уравнением:

$$D = \sigma_1^2 (1 + \frac{\sigma_2}{\sigma_1} K_{12} + \frac{\sigma_3}{\sigma_1} K_{13} + \frac{\sigma_4}{\sigma_1} K_{14} + ... + \frac{\sigma_n}{\sigma_1} K_{1n}) +$$

$$+ \sigma_2^2 (1 + \frac{\sigma_1}{\sigma_2} K_{21} + \frac{\sigma_3}{\sigma_2} K_{23} + \frac{\sigma_4}{\sigma_2} K_{24} + ... + \frac{\sigma_n}{\sigma_2} K_{2n}) +$$

$$+ \sigma_3^2 (1 + \frac{\sigma_1}{\sigma_3} K_{31} + \frac{\sigma_2}{\sigma_3} K_{32} + \frac{\sigma_4}{\sigma_3} K_{34} + ... + \frac{\sigma_n}{\sigma_3} K_{3n}) + ... +$$

$$+ \sigma_n^2 (1 + \frac{\sigma_1}{\sigma_n} K_{n1} + \frac{\sigma_2}{\sigma_n} K_{n2} + \frac{\sigma_3}{\sigma_n} K_{n3} + ... + \frac{\sigma_{n-1}}{\sigma_n} K_{n(n-1)}),$$

здесь D – результирующая дисперсия отклонений фазы от линейного закона;

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, ...$ – стандартные отклонения однофакторных экспериментов;

$K_{12}, K_{23},.., K_{n(n-1)}$ – коэффициенты взаимного влияния факторов.

Полученное уравнение может быть записано в другой форме:

$$D = \sigma_1^2 + K_{12}\sigma_1\sigma_2 + K_{13}\sigma_1\sigma_3 + K_{14}\sigma_1\sigma_4 + ... + K_{1n}\sigma_1\sigma_n +$$

$$+ \sigma_2^2 + K_{12}\sigma_1\sigma_2 + K_{23}\sigma_2\sigma_3 + K_{24}\sigma_2\sigma_4 + ... + K_{2n}\sigma_2\sigma_n + ... +$$

$$+ \sigma_n^2 + K_{1n}\sigma_1\sigma_n + K_{2n}\sigma_2\sigma_n + ... + K_{(n-1)}\sigma_{(n-1)}\sigma_n.$$

Таким образом, для анализа погрешности измерительной системы достаточно получить результаты разложения однофакторных зависимостей $\Delta y(x)$ в ряд Фурье, т. е. получить результирующую дисперсию однофакторного эксперимента и веса составляющих.

3. Определение допустимых отклонений параметров ИИС

Относительная погрешность, вносимая первым фактором в суммарную погрешность датчика, определяется отношением стандартного отклонения к диапазону изменения фазы при полном перемещении шунта. В дальнейших рассуждениях буквами $D_1, D_2, D_3,...$ будем обозначать дисперсии отклонений факторов однофакторных экспериментов. Буквами $D_1^/, D_2^/, D_3^/,...$ обозначим дисперсии, определенные факторами с учетом их взаимного влияния.

Определим допустимые отклонения параметров, влияющих на погрешность датчика из условия равенства весов влияющих факторов.

Результирующая приведенная погрешность определяется стандартным отклонением в соответствии с уравнением:

$$p = \frac{\sqrt{D}}{l} \text{ или } l^2 p^2 = D.$$

Суммарная дисперсия отклонений фазы при одновременном воздействии на датчик всех факторов равна сумме дисперсий:

$$D = D_1^/ + D_2^/ + D_3^/ + ... + D_n^/ ,$$

где $D_1^/, D_2^/, D_3^/,..., D_n^/$ – дисперсии, обусловленные факторами с учетом их взаимного влияния.

Введем понятие веса фактора с учетом взаимного влияния факторов.

Под весом влияния первого фактора будем понимать отношение следующего вида:

$$V_1 = \frac{\sigma_1^2 + K_{12}\sigma_1\sigma_2 + K_{13}\sigma_1\sigma_3 + ... + K_{1n}\sigma_1\sigma_n}{D} = \frac{D_1^/}{D}.$$

Аналогично будут выглядеть формулы для определения весов других факторов.

Вычислим допустимые отклонения влияющих факторов из условия равенства весов, учитывающих их взаимное влияние.

С другой стороны, сумма весов всех факторов равна единице:

$$\frac{D_1^/}{D}+\frac{D_2^/}{D}+\frac{D_3^/}{D}+...+\frac{D_n^/}{D}=1 \ .$$

Равенство весов предполагает равенство дисперсий:

$$D_1^/ = D_2^/ = D_3^/ = ... = D_n^/ .$$

Стандартные отклонения, обусловленные влияющими факторами, находятся из системы уравнений

$$\sigma_1^2 + K_{12}\sigma_1\sigma_2 + K_{13}\sigma_1\sigma_3 + ... + K_{1n}\sigma_1\sigma_n = \frac{(lp)^2}{n};$$

$$K_{12}\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2 + K_{23}\sigma_2\sigma_3 + ... + K_{2n}\sigma_2\sigma_n = \frac{(lp)^2}{n};$$

$$K_{13}\sigma_1\sigma_3 + K_{23}\sigma_2\sigma_3 + \sigma_3^2 + ... + K_{3n}\sigma_3\sigma_n = \frac{(lp^1)^2}{n};$$

....

$$K_{1n}\sigma_1\sigma_n + K_{2n}\sigma_2\sigma_n + K_{3n}\sigma_3\sigma_n + ... + \sigma_n^2 = \frac{(lp)^2}{n}.$$

Система нелинейных уравнений порядка n решается с помощью средств вычислительной техники.

Решением системы являются стандартные отклонения однофакторных воздействий, причем стандартные отклонения этих воздействий дают возможность определить пределы отклонений влияющих факторов.

Полученные относительные погрешности однофакторных воздействий позволяют получить коэффициенты для вычисления допустимых отклонений по каждому параметру.

В реальных условиях проектирования некоторые параметры элементов обеспечения функционирования датчика могут быть известными. В этом случае соответствующие параметрам стандартные отклонения вводятся в виде соответствующих векторов.

Предложенный ранее способ определения однофакторных зависимостей из условия равенства результирующих весов воздействия факторов на результирующую погрешность не учитывает некоторых особенностей технологии изготовления и условий эксплуатации датчиков. Однако получение необходимого стандартного отклонения, вызванного отдельным фактором, связано иногда с определенными трудностями, иногда просто нереализуемыми. Более гибким является метод, основанный на перераспределении весов результирующих воздействий отдельных факторов.

Методику определения стандартных отклонений можно сделать более гибкой путем введения коэффициентов весов, значения которых вводятся проектировщиком в зависимости от стоимости отдельных элементов, технологии, стабильности и других параметров. Изменение соотношения весов можно осуществить путем введения коэффициентов, зависящих от параметра. В результате получим систему уравнений следующего вида:

$$\sigma_1^2 + K_{12}\sigma_1\sigma_2 + K_{13}\sigma_1\sigma_3 + ... + K_{1n}\sigma_1\sigma_n = c_1\frac{(lp)^2}{n};$$

$$K_{12}\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2 + K_{23}\sigma_2\sigma_3 + ... + K_{2n}\sigma_2\sigma_n = c_2\frac{(lp)^2}{n};$$

$$K_{13}\sigma_1\sigma_3 + K_{23}\sigma_2\sigma_3 + \sigma_3^2 + ... + K_{3n}\sigma_3\sigma_n = c_3\frac{(lp)^2}{n};$$

....

$$K_{1n}\sigma_1\sigma_n + K_{2n}\sigma_2\sigma_n + K_{3n}\sigma_3\sigma_n + ... + \sigma_n^2 = c_n\frac{(lp)^2}{n}.$$

Значения коэффициентов должны выбираться из следующего условия:

$$c_1 + c_2 + c_3 + ... + c_n = n.$$

Конкретные значения коэффициентов определяются опытом разработчика.

Полученные путем решения системы стандартные отклонения пропорциональны предельным отклонениям влияющих факторов.

Заключение

Возрастающие потребности производства, усложнение систем автоматического управления и регулирования требуют разработки измерительных систем высокой точности. Это возможно только в том случае, когда проектирование ведется с использованием современных технологий, одним из элементов которых является создание имитационных моделей на базе современных компьютеров. Это в значительной степени облегчает не только процесс проектирования, но и позволяет прогнозировать эксплуатационные характеристики проектируемых средств измерений. Хорошо составленная модель позволяет не только анализировать процессы измерений, но и выявлять причины возникновения погрешностей. Это, в свою очередь, дает возможность проектировать системы из условий получения заданной погрешности измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Орнатский, П. П. Теоретические основы информационно-измерительной техники / П. П. Орнатский. – Киев: Вища шк., 1983. – 455 с.
2. Азизов, А. М. Методическая погрешность исследования случайных коррелированных процессов / А. М. Азизов. – Измерительная техника. – 1969. – № 2. – С. 11–14.
3. Горячев В.Я., Гаврина О.В., Чапчиков Ю.К., Шатова Ю.А./ Анализ систематической погрешности информационно-измерительной системы на основе датчика биений вала с бегущим магнитным полем// Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – №1 – С.46-57
4. Гутер, Р. С. Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта / Р. С. Гутер, Б. В. Овчинский. – М.: Наука, 1970. – 432 с.
5. Романовский, П. И. Ряды Фурье / П. И. Романовский. – М.: Наука, 1973. – 336 с.
6. Горячев В.Я. , Фазовые датчики механических величин с бегущим магнитным полем/ Горячев В.Я. - Издат. ПГУ, Пенза, 2005 г. 307 с.
7. Мурашкина Т.И., Бростилова Т.Ю., Кривулин Н.П. Установка для проверки волоконно-оптического датчика давления отражательного типа. М. Измерительная техника, №4, 2008 г., с. 14 – 16.
8. Мурашкина Т.И., Бростилова Т.Ю., Кривулин Н.П. Коломиец Л.Н. Распределение светового потока в волоконно-оптических преобразователях перемещения с отражающим управляющим элементом. Датчики и системы, №6, М. 2007, с. 14 – 16.
9. Алимурадов А.К., Тычков А.Ю. Чураков П.П., Фильтрация речевых сигналов с использованием метода множественной декомпозиции и оценки энергии эмпирических мод. Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – №2 (22) – 2012.– С.50-61
10. Абросимова О.В., Тычков А.Ю., Чураков П.П. Разработка информационно-измерительного устройства регистрации артериального давления с использованием манжеты с автоматическим запястным контуром. Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – №4 (28) – 20113 г. с. 119 – 127.
11. Грачев А.В., Чураков П.П. Анализ погрешностей измерительной схемы инвариантного преобразователя емкости кондуктометрического датчика. Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. №2. Пенза, издательство ПГУ. – с. 24 – 29.

Рецензент: Ломтев Евгений Александрович, доктор технических наук, профессор, советник ректора ФГБОУ высшего профессионального образования «Пензенский государственный университет».

Dmitry Nefed'ev
Federal State Government-financed Establishment «Penza State University»
Russia, Penza
iit@pnzgu

Vladimir Goryachev
Federal State Government-financed Establishment «Penza State University»
Russia, Penza
aees.psu@yandex.ru

Olesya Gavrina
Federal State Government-financed Establishment «Penza State University»
Russia, Penza
olesya-gavrina@rambler.ru

The spectral method for error analysis of information-measuring system

Abstract. In the article the method of analysis of the mechanical quantities information-measuring system inaccuracy by using the mathematical computer model is considered. Analysis of error information-measuring system is needed in order to generate the design stage requirements for elements of information-measuring systems and determine the allowable limits of variation of the influencing factors. This is possible only when the design is carried out with the use of modern technology, one element of which is the creation of simulation models based on modern computers. The method is based on decomposition of the inaccuracy absolute value from different impact factors on the orthogonal components. That is, it is necessary to obtain the resultant dispersion univariate experiment and weight components. The obtained relative errors of univariate effects allow to obtain the coefficients for the calculation of tolerances for each parameter. Method for determining the standard deviation can be made more flexible by introducing weights coefficients whose values are entered by the designer depending on the value of the individual elements, technology, stability and other parameters. Change in the ratio of weights can be achieved by introducing a coefficient depending on the parameter. This method allows to formulate requirements to the information-measuring system elements at the stage of preliminary design.

Keywords: error; spectral method; analysis; information-measuring system; the dispersion of orthogonal multi-dimensional space; mathematical model.

REFERENCES

1. Ornatskij, P. P. Teoreticheskie osnovy informacionno-iz¬meritel'noj tehniki / P. P. Ornatskij. – Kiev: Vishha shk., 1983. – 455 s.
2. Azizov, A. M. Metodicheskaja pogreshnost' issledovanija sluchajnyh korrelirovannyh processov / A. M. Azizov. – Izmeritel'naja tehnika. – 1969. – № 2. – S. 11–14.
3. Gorjachev V.Ja., Gavrina O.V., Chapchikov Ju.K., Shatova Ju.A./ Analiz sistematicheskoj pogreshnosti informacionno-izmeritel'noj sistemy na osnove datchika bienij vala s begushhim magnitnym polem// Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Povolzhskij region. Tehnicheskie nauki. – 2013. – №1 – S.46-57
4. Guter, R. S. Jelementy chislennogo analiza i matematicheskoj obrabotki rezul'tatov opyta / R. S. Guter, B. V. Ovchinskij. – M.: Nauka, 1970. – 432 s.
5. Romanovskij, P. I. Rjady Fur'e / P. I. Romanovskij. – M.: Nauka, 1973. – 336 s.
6. Gorjachev V.Ja. , Fazovye datchiki mehanicheskih velichin s begushhim magnitnym polem/ Gorjachev V.Ja. - Izdat. PGU, Penza, 2005 g. 307 s.
7. Murashkina T.I., Brostilova T.Ju., Krivulin N.P. Ustanovka dlja proverki volokonno-opticheskogo datchika davlenija otrazhatel'nogo tipa. M. Izmeritel'naja tehnika, №4, 2008 g., s. 14 – 16.
8. Murashkina T.I., Brostilova T.Ju., Krivulin N.P. Kolomiec L.N. Raspredelenie svetovogo potoka v volokonno-opticheskih preobrazovateljah peremeshhenija s otrazhajushhim upravljajushhim jelementom. Datchiki i sistemy, №6, M. 2007, s. 14 – 16.
9. Alimuradov A.K., Tychkov A.Ju. Churakov P.P., Fil'tracija rechevyh signalov s ispol'zovaniem metoda mnozhestvennoj dekompozicii i ocenki jenergii jempiricheskih mod. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Povolzhskij region. Tehnicheskie nauki. – №2 (22) – 2012.– S.50-61
10. Abrosimova O.V., Tychkov A.Ju., Churakov P.P. Razrabotka informacionno-izmeritel'nogo ustrojstva registracii arterial'nogo davlenija s ispol'zovaniem manzhety s avtomaticheskim zapjastnym konturom. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Povolzhskij region. Tehnicheskie nauki. – №4 (28) – 20113 g. s. 119 – 127.
11. Grachev A.V., Churakov P.P. Analiz pogreshnostej izmeritel'noj shemy invariantnogo preobrazovatelja emkosti konduktometricheskogo datchika. Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'. №2. Penza, izdatel'stvo PGU. – s. 24 – 29.