УДК 531.083.8 (45)
DOI: http://dx.doi.org/10.20535/0203-3771342017130248

Е. Т. Володарский[1]**,** *професор, д.т.н.***, О. Н. Юдин**[2]**,** *доцент, к.т.н.*

АТТЕСТАЦИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ПОЛОЖЕНИЯ

En The questions of normalized values control of fiber-optic strain transducers output parameters, position and displacements are considered. Knowledge of the normalized values of these parameters makes it possible to correct the results and thereby increase the accuracy (reduce the uncertainty) of the measurements.

The main parameters characterizing fiber-optic sensors are: the conversion coefficient of the rotation angle / displacement into the output signal and the zero drift. The drift caused mainly by the shot noise of the photo detectors, and the dispersion of the conversion coefficients is the possible boundary value of the sensors effective application, i.e. their accuracy. In this case, for each manufactured batch of products it is necessary to note the certified value and the margin of error and / or the expanded uncertainty of this value.

Studying the set of sensors under repeatability conditions, the dispersion of the results is due only to the influence of a random variable-the drift of the zero line. The variance of the overall average of the results of m-fold measurements of the characteristics of n selected sensor instances will also depend on the dispersion of the characteristics of the sensors array. For a separate estimation of the influence of the random measurement error and the sensors inhomogeneity one-way dispersion analysis is used on the basis of which an estimate of the variance between the sensors in the manufactured batch of products is obtained. On the basis of this variance estimate and average value, the upper and lower limit values are set in which contain the normalized parameter with the probability of 0,95.

[1] *НТУУ «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», кафедра автоматизации экспериментальных исследований*
[2] *НТУУ «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», кафедра теоретической механики*

Ua Розглядаються питання контролю нормованих значень вихідних параметрів оптоволоконних перетворювачів деформацій, положення та переміщення. Знання нормованих значень цих параметрів надає можливість корегувати результати і тим самим підвищувати точність (зменшувати невизначеність) вимірювань. Для вирішення цієї задачи пропонується використовувати дисперсійний аналіз.

Введение

Анализ, проведенный в [1], показал, что перспективным при решении задач навигации является использование волоконно-оптических технологий при создании датчиков, особенно положения и перемещения, таких как гироскопы и акселерометры.

Основными параметрами, характеризующими волоконно-оптические датчики, являются: коэффициент преобразования угла поворота/перемещения в выходной сигнал и дрейф, с учетом времени интегрирования, нулевой линии.

Знание нормированных значений этих параметров дает возможность корректировать результаты и тем самым повышать точность (уменьшать неопределенность) измерений. Поэтому для каждой изготовленной партии изделий необходимо иметь установленные метрологические характеристики: аттестованное значение и границы погрешности и/или расширенной неопределенности аттестованного значения.

Дрейф, обусловленный, в основном, дробовыми шумами фотоприемников, характеризует однородность партии, а рассеивание коэффициентов преобразования – возможные граничные значения эффективного применения датчиков, т.е их точность.

Обобщенная модель аттестованного значения коэффициента передачи x_{CRM} можно записать в виде [2]:

$$x_{CRM} = x_{char} + \delta_{bb} + \delta_{lts} + \delta_{sts}\ , \tag{1}$$

где x_{char} – установленное значение аттестуемой характеристики экземпляра датчика; δ_{bb} – погрешность, обусловленная рассеянием между экземплярами (определяется качеством стекловолокна и технологии изготовления датчиков); δ_{lts} – погрешность от нестабильности.

Основы аттестации метрологических характеристик оптоволоконных преобразователей

Основой аттестации метрологических характеристик датчиков являются результаты исследований *n* образцов, отобранных случайным образом с учетом объема партии и необходимой (требуемой) статистической надежности получаемых результатов. Для каждого образца фиксируется *m* результатов измерения заданной угловой скорости $\dot{\omega}$. Эксперимент желательно проводить за относительно короткий промежуток времени, чтобы исключить влияние возможных изменений условий проведения испытаний.

Модель j-го единичного результата измерения параметра i-го экземпляра отобранной совокупности датчиков имеет вид:

$$x_{ij} = \mu + A_i + \varepsilon_{ij}, \tag{2}$$

где μ – математическое ожидание результата измерения, соответствующее номинальному коэффициенту преобразования; A_i – отклонение от номинального значения коэффициента преобразования i-го датчика, обусловленное неоднородностью оптического волокна и характеризующее рассеивание возможных значений; ε_{ij} – реализация случайной погрешности измерения; j – текущий результат из выборки в m измерений.

Как видно из выражения (2) непосредственная оценка характеристики погрешности невозможна, т.к. в этом случае отклонение A_i от математического ожидания μ смешивается со случайной составляющей погрешности измерения.

В соответствии с выражением (2) рассеивание получаемых результатов при исследовании i-го экземпляра составит [3]:

$$\sigma^2_{(x_i)} = \sigma^2_A + \sigma^2_\varepsilon \tag{3}$$

и можно считать, что $\sigma^2_{(\varepsilon_i)} = \sigma^2_r$. Это рассеивание обусловлено только влиянием случайной величины – дрейфом нулевой линии. В этом случае дисперсия общего среднего результатов измерений характеристик n отобранных экземпляров датчиков будет зависеть также и от рассеивания их характеристик

$$\sigma^2\left(\overline{x}\right) = \sigma^2_A + \frac{\sigma^2_r}{n}. \tag{4}$$

Структурно-алгоритмическая организация исследования

Для раздельного оценивания влияния случайной погрешности измерения и неоднородности датчиков используется однофакторный дисперсионный анализ [4], структурная организация которого приведена на рис. 1.

Исходным является массив данных $x_{ij}\left(j=\overline{1,m}\right)$ из $n \times m$ элементов, которые, как уже отмечалось, из-за влияния случайных величины – дрейфа нулевой лини, и неоднородности датчиков – отличие коэффициентов преобразования, будут рассеяны по отношению к центру, являющегося оценкой μ – заданного углового ускорения

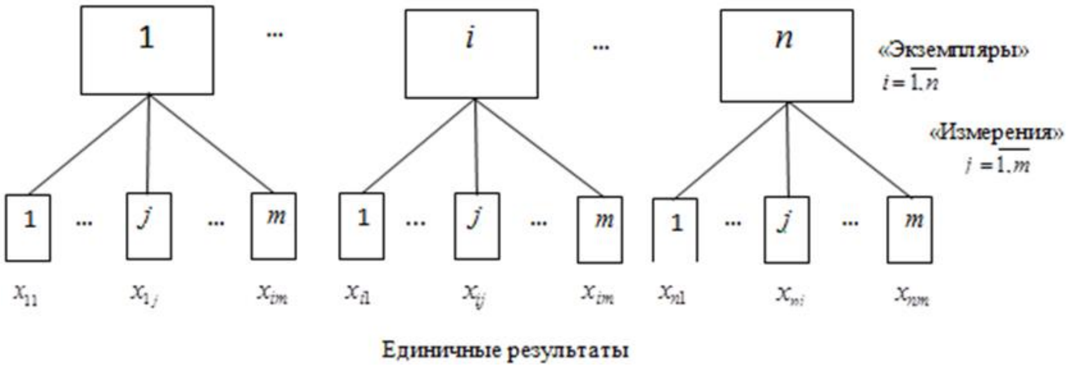

Рис. 1. Структурная организация однофакторного эксперимента

$$\bar{\bar{x}} = \frac{1}{n \cdot m}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} x_{ij} \,. \tag{5}$$

Аналитически это рассеивание записывается следующим образом:

$$SS = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\left(x_{ij} - \bar{\bar{x}}\right)^2 ,$$

что может быть представлено в виде двух составляющих

$$SS = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\left(x_{ij} - \bar{x}_i\right)^2 + \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\left(\bar{x}_i - \bar{\bar{x}}\right)^2 , \tag{6}$$

где $\bar{x}_i = \dfrac{1}{m}\sum_{j=1}^{m} x_{ij}$ – среднее результатов измерения *i*-го датчика.

Первое слагаемое в правой части выражения (6) определяется только влиянием случайной величины, а второе обусловлено неоднородностью датчиков и случайной величиной.

Обозначим первое слагаемое Q_1, а второе – Q_2. Тогда отношения Q_1 к числу степеней свободы $\nu_{within} = n(m-1)$ и Q_2 к числу степеней свободы $\nu_{among} = (n-1)$ дадут оценки соответствующих дисперсий:

– рассеивания, обусловленного внутренними случайными процессами внутри датчиков MS_{within}, между средними значениями результатов измерений датчиков в исследуемой совокупности MS_{among}.

Исходя из выражения (4), после преобразования Для раздельного оценивания влияния случайной погрешности измерения и неоднородности датчиков используется однофакторный дисперсионный анализ, можно получить оценку дисперсии между датчиками в изготовленной партии продукции как

$$S_A^2 = \frac{MS_{among} - MS_{within}}{n}. \qquad (7)$$

Для нормирования точности изготовления датчиками исследуемой партии необходимо определить расширенную неопределенность оценивания рассеивания характеристик совокупности датчиков $U = 2 \times S_A$ при вероятности оценивания $P = 0{,}95$. Используя найденное значение расширенной неопределенности и среднее значение этой характеристики, определенной на основании выражения (5), устанавливаются верхнее и нижнее граничные значения, в которых с вероятностью 0,95 находится нормируемый параметр. Это значение характеризует точность партии изготовленных датчиков.

Для выявления нестабильности результатов под воздействием дестабилизирующих факторов проводят дополнительные исследования.

Так как затруднительно сформировать физическую модель, описывающую механизм нестабильности, в качестве эмпирической модели принимают прямолинейную зависимость

$$Y = b_0 + b_1 X, \qquad (8)$$

где b_0 – коэффициент преобразования датчика при его аттестации, $(t = 0)$,

b_1 – коэффициент, показывающий изменение этого параметра во времени.

По результатам исследований определяются оценки коэффициентов уравнения линейной регрессии. Исходя из корреляционной зависимости [3] оценка коэффициента b_1 рассчитывается следующим образом:

$$\hat{b}_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(t_i - \overline{t})(y_i - \overline{y})}{\sum_{i=1}^{n}(t_i - \overline{t})^2}, \qquad (9)$$

где n – число точек на временной оси (интервал между исследованиями/точками должен быть одинаковым);

$\overline{y} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i$ – среднее значение параметра за время исследования;

$\overline{t} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} t_i$ – значение, соответствующее среднему временному интервалу исследования.

Отрезок, отсекаемый прямой линией регрессии на оси ординат, находится из выражения (8) при известных значениях $\overline{y}$ и $\overline{t}$:

$$\hat{b}_0 = \overline{y} - \hat{b}_1 \overline{t}.$$

Рассеяние экспериментальных данных y_i по отношению к значениям, вычисляемым на основании линии регрессии, определяется из выражения:

$$S^2 = \sum_{i=1}^{n}\left[y_i - \left(\hat{b}_0 + \hat{b}_1\bar{t}\right)\right]^2 \Big/ (n-2).$$

Располагая значениями $\hat{b}_1$ и S^2 можно, используя коэффициент Стьюдента, определить статистическую значимость оценки $\hat{b}_1$, т.е. оценить действительное изменение во времени или это продукт влияния только случайных величин при проведении измерений и ограниченного объема экспериментальных данных. Для этого выдвигается нулевая гипотеза H_0: $b_1 = 0$ и рассчитывается коэффициент Стьюдента.

По результатам исследований определяются оценки коэффициентов уравнения линейной регрессии.

Рассеяние экспериментальных данных y_i по отношению к значениям, вычисляемым на основании линии регрессии, определяется из выражения:

$$S^2 = \sum_{i=1}^{n}\left[y_i - \left(\hat{b}_0 + \hat{b}_1\bar{t}\right)\right]^2 \Big/ (n-2).$$

Для этого выдвигается нулевая гипотеза H_0: $b_1 = 0$ и рассчитывается коэффициент Стьюдента

$$t_p = \frac{\left|\hat{b}_1\right|}{S},$$

значение которого сравнивается с табличным значением $t_{кр(0{,}05,n-2)}$ для уровня статистической значимости α = 0,05 и числа степеней свободы $\nu = (n-2)$.

При статистической значимости этого коэффициента, значение неопределенности, обусловленную временной нестабильностью необходимо учитывать в суммарной неопределенности аттестованного значения датчика, используя полученную регрессионную зависимость и подставляя в нее дискретные значения *t*, для которых оценивается неопределенность.

Выводы

Неоднородность стекловолокна и внутренние шумы приводят к разбросу коэффициентов преобразования датчиков положения и перемещения и дрейфу их нулевой линии. Применение аппарата дисперсионного анализа позволяет раздельно оценить такие характеристики точности, как значение коэффициента преобразования и его относительную расширенную неопределенность, которые являются нормирующими величинами при аттестации партии изделий. Это позволяет обосновано гарантировать точность систем навигации и измерения других параметров.

Список использованной литературы

1. Определение и применение оптоволоконных датчиков http://elenergi.ru/opredelenie-i-primenenie-optovolokonnyx-datchikov.html.
2. ISO Guide 35:1989, IDT
3. ISO 5725-2: 2002: Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Part 2: Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method.
4. J. E. Freund, R. E. Walpole, Mathematical Statistics 4thEd. Prentice- Hall, Inc., NJ 1987.