

УДК 006.91: 681.2 + 531.7.08 (047) (476)

В.Л. Соломахо,
С.С. Соколовский,
Д.В. Соломахо

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ СОСТОЯТЕЛЬНОСТИ МЕТОДИКИ ОЦЕНИВАНИЯ ТОЧНОСТИ МУЛЬТИСЕНСОРНЫХ СИСТЕМ

Системы мониторинга сложных технических объектов строятся на базе мультисенсорных измерительных систем. До настоящего времени отсутствовала методика нормирования точности датчиков, входящих в состав таких систем, что существенно усложняло их проектирование. В статье приводится теоретическое обоснование возможности создания такой методики и экспериментальное подтверждение ее эффективности.

The systems of monitoring of complex technical objects are based on multisensor measuring systems. Till now there were no method for normalization of the accuracy of sensors included in such systems that was a great complication as regards their development. This article provides the basis for the possibility to create such a method and experimental confirmation of its effectiveness.

Контроль и мониторинг состояния различных конструкций и технологических систем в настоящее время базируются на применении информационно-измерительных систем. В общем случае они представляют собой комплекс, включающий определенное количество первичных измерительных преобразователей (либо датчиков, если они оснащены средствами первичной обработки сигнала и приведения его к цифровой форме) и устройств передачи, сбора и обработки измерительной информации, функционально объединенных в единое целое.

Наряду с понятием «информационно-измерительная система» в последнее время все чаще применяется понятие «мультисенсорная система» (МСС) [1-2]. Акцент в данном случае делается на то обстоятельство, что такая система содержит в себе большое количество измерительных преобразователей. К МСС относят, к примеру, широко распространенные беспроводные сенсорные сети.

Различные виды МСС требуют индивидуализированного подхода к их метрологическому обеспечению, связанного с наличием специфических источников погрешности измерений, а также с особым подходом к нормированию допустимой погрешности средств измерений, входящих в МСС.

В связи с отсутствием методики нормирования точности датчиков, входящих в МСС, их комплектация такими средствами измерений проводится методом подбора, а подтверждение заявленной точности измерений, выполняемых на базе МСС, осуществляется проведением тех или иных метрологических процедур, например, метрологической аттестации.

Таким образом, в настоящее время существует теоретическая и практическая проблема, связанная с разработкой методики расчета погрешности датчиков, входящих в МСС.

При функционировании МСС каждый измерительный преобразователь, входящий в систему, обладая индивидуальными метрологическими характеристиками, формирует свою базу данных (группу данных), а обобщенная тем или иным образом на базе нескольких групп измерительная информация определяет конечный результат. Так как результат измерения является случайной величиной, возникает принципиальный вопрос о степени соответствия между характеристиками распределения результатов объединения групп данных и характеристиками распределений составляющих групп.

Пусть имеется m групп результатов ($j=1, \dots, m$) объемами n_j со средними арифметическими \bar{x}_j и дисперсиями σ_j^2 . Назовем эти характеристики внутригрупповыми средними (\bar{x}_j) и внутригрупповыми дисперсиями (σ_j^2). Объединим группы в общую совокупность, объем которой N , общая средняя \bar{x}_Σ и общая дисперсия σ_Σ^2 .

Генеральная (общая) дисперсия рассчитывается по формуле, известной в статистике как теорема сложения дисперсий. Согласно этой теореме, если совокупность состоит из нескольких групп, то общая дисперсия равна сумме средней внутригрупповых и межгрупповой дисперсий:

$$\sigma_\Sigma^2 = \bar{\sigma}_j^2 + \sigma_m^2, \quad (1)$$

где $\bar{\sigma}_j^2$ – средняя внутригрупповых дисперсий;
 σ_m^2 – межгрупповая дисперсия.

Внутригрупповая дисперсия отражает случайную вариацию признака, которая формируется под влиянием стохастических факторов. Она рассчитывается следующим образом:

$$\sigma_j^2 = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} (x_{ij} - \bar{x}_j)^2, \quad (2)$$

где x_{ij} – i -тое значение в j -той группе;
 \bar{x}_j – среднее значение по j -той группе:

$$\bar{x}_j = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} x_{ij}. \quad (3)$$

Средняя из внутригрупповых дисперсий рассчитывается по формуле

$$\bar{\sigma}_j^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^m \sigma_j^2 n_j, \quad (4)$$

где m – число групп измерений;

σ_j^2 – внутригрупповая дисперсия j -той группы;

n_j – число измерений в j -той группе;

N – общее число измерений в совокупности, рассчитываемое по формуле:

$$N = \sum_{j=1}^m n_j. \quad (5)$$

Межгрупповая дисперсия характеризует систематическую вариацию изучаемого признака по группам исследуемых данных. Она рассчитывается по формуле

$$\sigma_m^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^m \left(\bar{x}_j - \bar{x}_\Sigma \right)^2 n_j, \quad (6)$$

где \bar{x}_Σ – общая средняя по совокупности равна

$$\bar{x}_\Sigma = \frac{\sum_{j=1}^m \bar{x}_j \cdot n_j}{\sum n_j}. \quad (7)$$

Следовательно генеральную дисперсию, являющуюся оценкой рассеивания результатов измерений, получаемых на базе МСС, можно представить в виде

$$\sigma_\Sigma^2 = \frac{\sum \sigma_j^2 n_j}{\sum n_j} + \frac{\sum (\bar{x}_j - \bar{x}_\Sigma)^2 n_j}{\sum n_j}. \quad (8)$$

Была выдвинута гипотеза о том, что полученные расчетные зависимости (7–8) могут быть использованы для аналитического оценивания точности МСС. В этом случае создаются предпосылки для селективного подбора измерительных преобразователей в МСС на этапе проектирования при наличии информации об их действительных метрологических характеристиках.

С целью подтверждения выдвинутой гипотезы были проведены экспериментальные исследования на базе измерительной системы, предназначенной для мониторинга деформации мостовых конструкций, включающей три индуктивных преобразователя.

Принципиальная метрологическая схема экспериментальной измерительной установки представлена на рисунке 1. Ее базой является предметный стол (3), на котором установлена специальная накладка (5), фиксируемая в определенном положении с помощью зажимного устройства. На

верхней поверхности накладки закреплена несущая стойка (8), служащая для установки корпуса преобразователя (1) на измерительной позиции. На станине крепится специальный кронштейн (6) с установленной на нем второй несущей стойкой (7), предназначенной для фиксации измерительного штока преобразователя в его рабочем положении. Такая установка элементов измерительного преобразователя позволяет обеспечить их относительную подвижность.

Для установочных перемещений использовался микровинт (4). Точные (эталонные) относительные перемещения подвижных частей измерительного преобразователя в рамках рассматриваемой измерительной установки осуществлялись с помощью плоскопараллельных концевых мер длины (2) соответствующих размеров и классов (разрядов) точности.

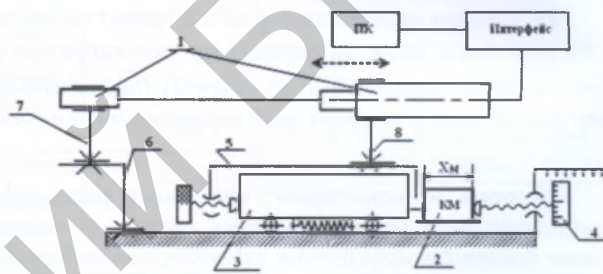


Рис. 1. Принципиальная метрологическая схема экспериментальной измерительной установки

Проведение экспериментальной проверки приемлемости предлагаемой методики расчета погрешности МСС осуществлялось в соответствии с алгоритмической инструкцией, представленной на рисунке 2.

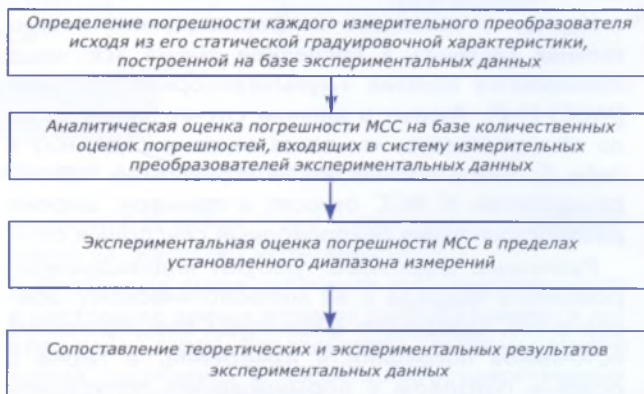


Рис. 2. Алгоритмическая инструкция проведения экспериментальных исследований

На первом этапе проводилось экспериментальное оценивание инструментальной погрешности индуктивных преобразователей, в основу которого было положено определение пределов допускаемой основной погрешности исследуемого измерительного преобразователя путем построения его статической градуировочной характери-

стики. Эта процедура предполагает проведение многократных измерений одних и тех же физических величин «известных» размеров, характерным образом распределенных в пределах диапазона измерения данного средства измерения, с последующей их специальной математической обработкой.

Для получения таких опорных (или эталонных) размеров использовались плоскопараллельные концевые меры длины (либо блоки мер) соответствующих номиналов. В ходе многократных измерений при каждой последующей установке на измерительную позицию исходной меры (блока мер) фиксировались показания измерительного преобразователя.

Эталонные перемещения осуществлялись с фиксацией 7 контрольных точек в пределах диапазона измерений (1,0; 1,2; 1,6; 2,0; 2,4; 2,8; 3,0 мм). В соответствии с предложенной методикой в каждой точке осуществлялось по 20 измерений.

По полученным таким образом результатам наблюдений в каждой контрольной точке рассчитывалось их среднее значение \bar{x}_j , принимаемое в качестве точечной оценки результата измерения, а затем определялось отклонение (Δ_x) точечной оценки результата измерения от исходного (эталонного) значения X_m , задаваемого концевой мерой длины соответствующего размера, а также статистическая оценка среднего квадратического отклонения результатов измерений S_{Δ_x} по отношению к их среднему значению.

Отклонения средних $\bar{\Delta}_x$ рассматривались как оценки систематических погрешностей измерений Δ_c в исследуемых контрольных точках диапазона измерения.

В каждой контрольной точке рассчитывались доверительные границы ε случайной составляющей погрешности измерения ($\Delta_{сл}$) по формуле

$$\varepsilon = t \times S_{\Delta_x} \quad (9)$$

где t – коэффициент Стьюдента, зависящий от доверительной вероятности P и числа результатов наблюдений n .

В завершение процедуры из всех полученных оценок погрешностей выделялись экстремальные значения Δ_c и $\Delta_{сл}$, и путем их соответствующего комплексирования определялись нижняя и верхняя границы основной погрешности измерительного преобразователя.

Результаты статистической обработки экспериментальных данных, необходимые для определения точностных характеристик измерительных преобразователей, включенных в состав испытуемой МСС, приведены в таблице 1.

Имея экспериментальные результаты, по оценке метрологических характеристик каждого датчика реализуем второй этап алгоритма, т.е. выполним аналитическую оценку погрешности МСС, построенной с использованием трех индуктивных преобразователей на базе количественной оценки погрешностей, входящих в систему измерительных преобразователей, применив формулы 5–8.

Проведя соответствующие расчеты, получим для системы преобразователей $\bar{x}_\Sigma = 0,00031$ мм, а $S_\Sigma = 0,002932$ мм.

Используя то же экспериментальное оборудование, путем установки на предметный стол 3 (рис.1) одновременно трех индуктивных преобразователей, образующих МСС, были проведены экспериментальные исследования системы, результаты которых приведены в таблице 2.

Таблица 1

Результаты экспериментальных исследований точности индуктивных преобразователей №1, №2, №3

Статистические характеристики	Эталонное перемещение, L, мм						
	1,0	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	3,0
Датчик 1							
$\bar{\Delta}_x$	0,0001	0,0004	0,0001	- 0,0003	- 0,0008	0,0005	0,0001
S_{Δ_x}	0,0029	0,0023	0,0021	0,0025	0,0026	0,0024	0,0022
Датчик 2							
$\bar{\Delta}_x$	- 0,0001	- 0,0004	0,0002	- 0,0003	0,0001	0,0004	- 0,0008
S_{Δ_x}	0,0028	0,0024	0,0027	0,0023	0,0024	0,0020	0,0025
Датчик 3							
$\bar{\Delta}_x$	0,0001	0,0002	0,0005	0,0009	- 0,0001	- 0,0001	- 0,0001
S_{Δ_x}	0,0026	0,0029	0,0027	0,0024	0,0022	0,0025	0,0025

Таблица 2

Результаты экспериментальных исследований точности МСС

Статистические характеристики	Эталонное перемещение, L, мм						
	1,0	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	3,0
$\bar{\Delta}_{x\Sigma}$	0,0002	0,0001	- 0,0007	-0,0002	0,0001	0,0009	0,0007
$S_{\Delta_{x\Sigma}}$	0,00351	0,00249	0,00316	0,0027	0,00373	0,00339	0,00281

Традиционно при сопоставлении теоретических и экспериментальных результатов их расхождение, не превышающее 20%, считается удовлетворительным. Степень соответствия теоретических и экспериментальных результатов определялась следующим образом:

$$P = \frac{|S_{\Delta_{x\Sigma}} - S_{\Sigma}|}{S_{\Sigma}} \quad (10)$$

На рисунках 3, 4 проиллюстрирована степень сходимости теоретических и экспериментальных результатов.

Приведенные данные позволяют признать, что предлагаемая методика теоретической оценки инструментальной составляющей погрешности МСС может быть использована для практического применения.

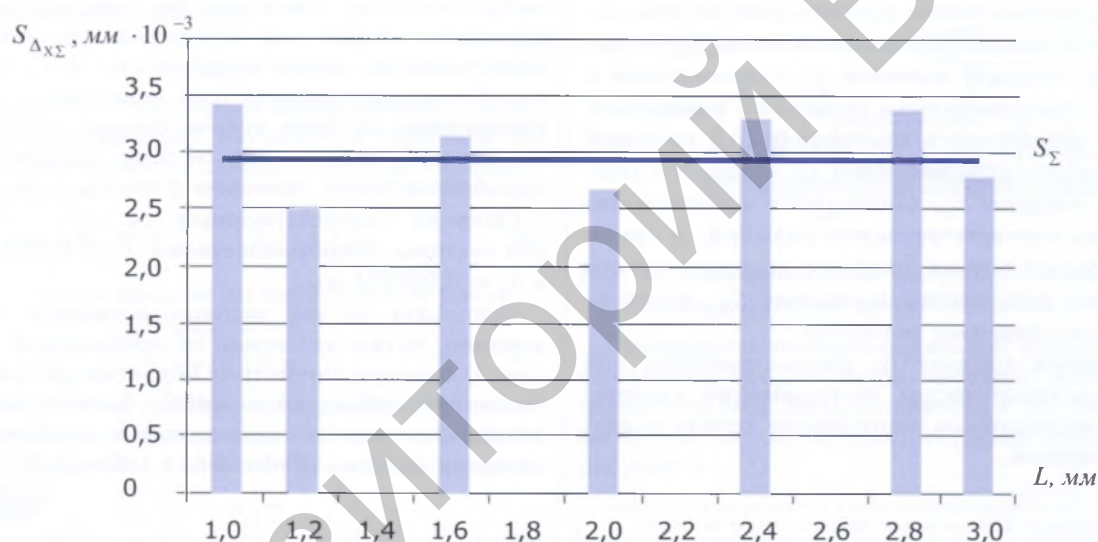


Рис. 3. Сравнение результатов аналитической и экспериментальной оценки средних квадратических отклонений, характеризующих рассеяние результатов измерений, получаемых на базе МСС в рабочем диапазоне измерений

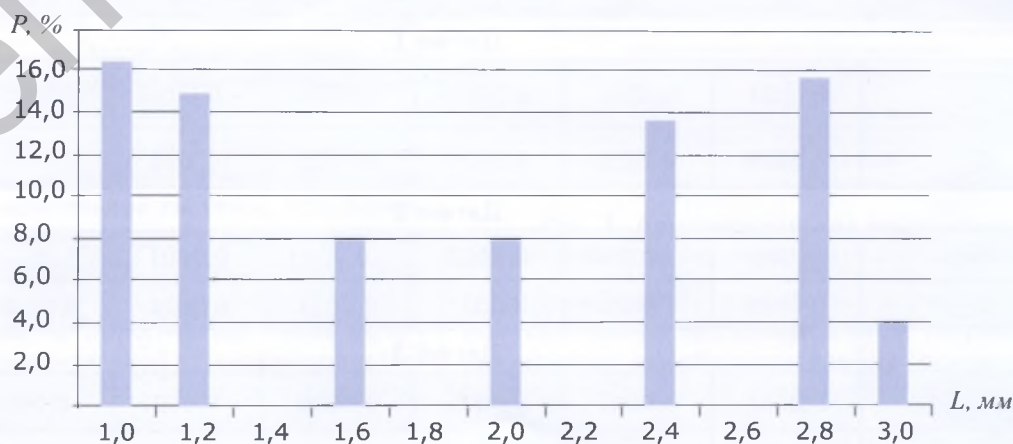


Рис. 4. Расхождение теоретических и экспериментальных результатов оценки в %

Список использованной литературы

1. Григорян К.И. Метрологические аспекты применения мультисенсорных измерительных систем / К.И.Григорян, В.Л.Соломахо // VII МНПК «Приборостроение – 2014»: Сборник материалов – Минск: БНТУ, 2014. – С. 162–164.
2. Соломахо В.Л. Нормирование точности средств измерений, входящих в состав мультисенсорных измерительных систем / В.Л.Соломахо, Д.В.Соломахо // XV МНПК «Качество, стандартизация, контроль: теория и практика»: Сборник материалов – Одесса. – Киев: АТМ Украины, 2015. – С.150.

Владимир Леонтьевич Соломахо, доктор технических наук, профессор, директор Республиканского института инновационных технологий Белорусского национального технического университета;

Сергей Степанович Соколовский, кандидат технических наук, доцент кафедры «Стандартизация, метрология и информационные системы» Белорусского национального технического университета;

Дмитрий Владимирович Соломахо, кандидат технических наук, СП ЗАО «Международный деловой альянс», Минск, Республика Беларусь

Дата поступления 18.09.2013 г.