

ТЕОРЕТИЧНИЙ І НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ  
ІНЖЕНЕРНОЇ АКАДЕМІЇ УКРАЇНИ

THEORETICAL AND APPLIED SCIENCE JOURNAL  
ENGINEERING ACADEMY OF UKRAINE



***В І С Н И К***

***ІНЖЕНЕРНОЇ АКАДЕМІЇ УКРАЇНИ***

***ВИПУСК 3***

***BULLETIN OF ENGINEERING ACADEMY  
OF UKRAINE***

***Issue 3***

УДК 531

Трофименко В.В.  
Задорожний І.  
Самойленко І.**МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ АТТЕСТАЦИЯ КООРДИНАТНО- ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ  
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ**

Статья посвящена разработке новой методики автоматизированной координатно-измерительной машины с использованием лазерной измерительной системы ЛМС-100 и образцового гранитного куба. Проведен тестовый контроль измерительных каналов и оценены метрологические характеристики измерительной системы.

**Введение**

Для полного контроля деталей промышленность получила широкоуниверсальное, автоматизированное, достаточно гибкое средство контроля – координатные измерительные машины (КИМ).

Применение КИМ повышает точность и достоверность результатов измерения. Использование принципов оперативного и диалогового программирования дало возможность упростить применение КИМ как универсального средства контроля в единичном и мелкосерийном производстве. Вопросы проектирования КИМ, оптимизации процесса измерения посвящено много работ [1-4]. Наиболее интересные результаты в этой области получены А.Е. Кобринским [4], А.Ю. Каспарайтисом [2], Е.П. Попов [3]. В исследовании кинематической структуры, точности, компенсации систематических погрешностей адаптации в робототехнике. Вместе с тем, в этих работах не рассмотрены вопросы быстрого достижения точности в условиях действия дестабилизирующих факторов внешней и внутренней среды системы измерения объектов со сложной пространственной поверхностью с учетом их особенностей, а также метрологической аттестации прецизионных координатно-измерительных машин.

ТИИС качественно отличаются от известных средств автоматизированного контроля от формы и расположения поверхностей, как по назначению, так и по принципам построения. Это вызывает множество новых, ранее не исследованных вопросов, в том числе метрологической аттестации измерительных каналов и системы в целом.

Важной проблемой контроля метрологических характеристик (МХ) и измерительных каналов (ИК) КИМ является выбор наиболее точного, экономически выгодного и технически реализуемого способа передачи размера физической величины поверяемому средству измерения [6].

Существующая методика метрологической аттестации КИМ не вполне удовлетворяет современным требованиям метрологического обеспечения.

**Постановка.** Разработать новую методику метрологической аттестации КИМ и провести тестовый контроль измерительных каналов.

**Решение проблемы.** Разработанная методика метрологической аттестации КИМ, базируется на принципе конического светового потока и позволила использовать гранитный куб размерами 400×400×400 мм, в котором на одной из плоскостей выфрезерована полусфера, а через две другие проходит отверстие усеченным конусом (рис.1).

Предложенный способ измерения заключается в том, что измерительную головку КИМ заменяют измерительного устройства (ИУ) второго контура измерения, оси, которого параллельны соответствующим осям машины первого контура измерения или совмещены с ними. Структура координатных узлов ИУ второго контура измерения в большинстве аналогична структуре КИМ первого измерительного контура. Она имеет три координатных блока  $X_I$ ,  $Y_I$ ,  $Z_I$ , свои направляющие измерительные преобразователи, координатную систему и т.д. Основная отличительная черта ИУ второго контура измерения от КИМ первого контура измерения – небольшие габариты, диапазон перемещения 100 мм.

Способ реализуется следующим образом. Когда измерительный шуп перемещается в сторону детали координатным блоком машины первого контура измерения, соответствующий координатный блок ИУ второго контура, перемещается в том же направлении, пока не займет крайнее положение. При соприкосновении шупа с измеряемой деталью координатный блок первого контура продолжает инерционное движение, а соответствующий координатный блок ИУ второго контура перемещается

относительное противоположное перемещение движению КИМ первого контура, в измеряемом диапазоне.

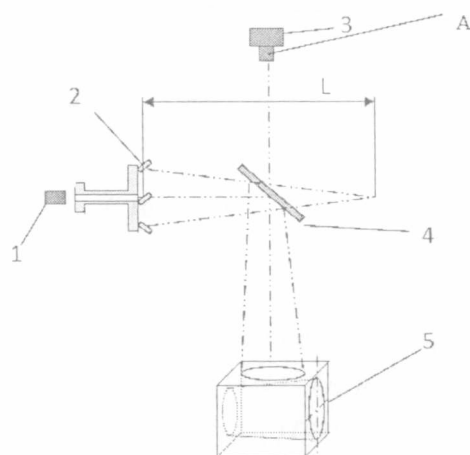


Рис.1. Схема экспериментальной установки метрологической аттестации координатных измерительных машин 1- лазер, 2, 4- зеркала, 3- телекамера, 5- гранитный куб

Используется гелиево-неоновый газовый лазер, создающий тонкий и интенсивный луч света, и вращающийся ротор с набором зеркал, с помощью которого этот луч преобразуется в конический поток света.

На роторе установлены зеркала 2, изменяющее направления луча света, поворачивая которое можно менять угол при вершине светового конуса и компенсировать изменения расстояния между объектом и камерой 3. Полупрозрачное зеркало изменяет направление конического светового потока, давая возможность считывать образуемую им на поверхности рассматриваемого объекта освещенную линию.

Более полно определить форму объекта можно, перемещая камеру и источник света параллельно рабочей плоскости или перемещая объект под камерой. В любом направлении по плоскости, находящейся под источником света, количество и расположение точек, которые исследуются с помощью описываемого метода, зависит от различных обстоятельств и выбирается автоматически в соответствии с характером рассматриваемых объектов. Предположим, что проектор и телевизионная камера 3 находятся в одной точке.

Пусть в точке А (рис.2) находится камера и в той же точке расположен проектор, образующий  $m$  конический поток света имеет вершину в точке 5.

На рис.2. представлен математический расчет экспериментальной установки метрологической аттестации КИМ.

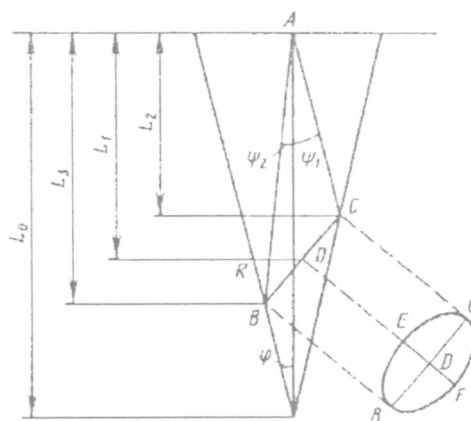


Рис.2. Экспериментальная установка метрологической аттестации КИМ

Половину угла при вершине конического светового потока обозначим  $\varphi$ , а расстояние между точками  $S$  и  $A - L_0$ . Эллипс  $BECP$  образован пересечением светового потока и верхней плоскости объекта. Пусть  $BC$  - большая ось области, ограниченной освещенным эллипсом,  $\psi_1$  и  $\psi_2$  - углы между лучами

$AS$  и отрезками  $AC$  и  $AB$ ,  $D$  - середин.  $BC$ ,  $L_1$  - расстояние между камерой и точкой  $D$ , являющейся центром эллипса [5].

Имеем следующие уравнения:

$$\begin{aligned} L_2 \operatorname{tg} \psi_1 &= (L_0 - L_2) \operatorname{tg} \varphi; \\ L_3 \operatorname{tg} \psi_2 &= (L_0 - L_3) \operatorname{tg} \varphi; \\ \overline{BC}^2 - (L_3 - L_2)^2 &= ((L_0 - L_3) \operatorname{tg} \varphi + (L_0 - L_2) \operatorname{tg} \varphi)^2; \\ L_1 &= L_2 + (L_3 - L_2) / 2; \\ \operatorname{ctg} \alpha &= (L_3 - L_2) / ((L_0 - L_3) \operatorname{tg} \varphi + (L_0 - L_2) \operatorname{tg} \varphi); \\ \overline{OR} &= (L_0 - L_1) \operatorname{tg} \varphi; \\ \overline{OD} &= (\overline{BC} / 2) \sin \alpha + (\overline{BC} / 2) \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi - \overline{OR}; \\ (\overline{EF} / 2)^2 &= \overline{OR}^2 - \overline{OD}^2. \end{aligned} \quad (1)$$

Решая их относительно  $\alpha$  и  $L_1, L_2, L_3$  получим:

$$\begin{aligned} \operatorname{ctg} \alpha &= (L_0 \operatorname{tg} \varphi (\operatorname{tg} \psi_1 - \operatorname{tg} \psi_2)) / ((\operatorname{tg} \psi_1 + \operatorname{tg} \varphi)(\operatorname{tg} \psi_2 + \operatorname{tg} \varphi)); \\ L_1 &= L_0 \operatorname{tg} \varphi (\operatorname{tg} \psi_1 + \operatorname{tg} \psi_2 + 2 \operatorname{tg} \varphi) / (2(\operatorname{tg} \psi_1 + \operatorname{tg} \varphi)(\operatorname{tg} \psi_2 + \operatorname{tg} \varphi)); \\ L_2 &= L_0 \operatorname{tg} \varphi / (\operatorname{tg} \psi_1 + \operatorname{tg} \varphi); \\ L_3 &= L_0 \operatorname{tg} \varphi / (\operatorname{tg} \psi_2 + \operatorname{tg} \varphi); \\ \overline{BC} &= L_0 \left\{ \operatorname{tg}^2 \varphi [(\operatorname{tg} \psi_1 - \operatorname{tg} \psi_2) / ((\operatorname{tg} \psi_1 + \operatorname{tg} \varphi)(\operatorname{tg} \psi_2 + \operatorname{tg} \varphi))]^2 + \right. \\ &\quad \left. + [\operatorname{tg} \psi_1 / (\operatorname{tg} \psi_1 + \operatorname{tg} \varphi) + \operatorname{tg} \psi_2 / (\operatorname{tg} \psi_2 + \operatorname{tg} \varphi)]^2 \right\}^{1/2}; \\ \overline{EF} &= 2 \left[ \overline{BC} (L_0 - L_1) (\sin \alpha + \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi) \operatorname{tg} \varphi \right]^{1/2} - \overline{BC}^2 (\sin \alpha + \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi)^2. \end{aligned} \quad (2)$$

Угол  $\varphi$  и расстояние  $L_0$  известны: они зависят от характеристик проектора. Углы  $\psi_1$  и  $\psi_2$  – параметры, которые можно определить по расположению освещенного эллипса в поле зрения.  $BC$  и  $EF$  соответственно большая и малая оси этого эллипса. Наиболее важными вычисляемыми параметрами являются  $\alpha$  и  $L_1$ , представляющие соответственно уклон поверхности объекта и ее удаленность от камеры.

Покажем, что  $\psi_1$  и  $\psi_2$  – наибольшее и наименьшее значение угла с вершиной в точке  $A$ , одной стороной  $AS$  и второй стороной, проходящей через точки, лежащие на освещенном эллипсе.

Пусть камера с фокусным расстоянием, совпадающим с высотой конического светового потока, находится в точке  $A$ .  $K$  – произвольная точка, лежащая на эллипсе.

Пусть  $K$  – расстояние между точкой  $K$  и осью  $AS$ . Точки  $B$  и  $C$  – соответственно низшая и высшая точки эллипса; пусть  $L_B, L_C, L_K$  – соответственно расстояния от точек  $B, C$  и  $K$  до плоскости размещения проектора.

Имеем следующие уравнения:

$$R = (L_0 - L_k) \operatorname{tg} \varphi, \quad (3)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_k = R / L_k, \quad (4)$$

где  $\varphi_k$  – угол между  $AK$  и  $AS$ . Из (1) и (2) имеем

$$\operatorname{tg} \psi_k = (L_0 / L_k - 1) \operatorname{tg} \varphi. \quad (5)$$

В соответствии с этой формулой  $\operatorname{tg} \psi_k$  возрастает с уменьшением  $L_k$  и наоборот.

Концы большей оси эллипса: верхний, точка  $C$ , и нижний, точка  $B$ , – лежат на освещенной эллиптической линии. Отсюда  $L_k$  и  $L_C$  – наибольшее и наименьшее значение расстояния от точки эллипса до плоскости размещения проектора. Можно заключить, что углы  $\psi_C$  и  $\psi_B$  – наибольший и наименьший из углов со сторонами  $AS$  и  $AK$ , где  $K$  – произвольная точка на эллипсе.

Очевидно, что если поверхность объекта параллельна рабочей плоскости  $\psi_1$  и  $\psi_2$  равны между собой.

По вышеприведенным соображениям для определения  $\psi_1$  и  $\psi_2$  необходимо определить наибольшее и наименьшее значения  $\psi_k$ .

Результаты определения погрешности и стабильности показаний КИМ по координатам X, Y, Z представлены в табл.1.

Таблица 1.

Результаты определения погрешности КИМ по координатам X, Y, Z

Определяемое значение	X	Y	Z
100,0004	100,001	100,001	100,001
200,0006	200,0008	200,0011	200,0015
300,001	300,0014	300,0011	300,0012
500,002	500,0028	500,0029	500,0028
800,002	800,0018	800,0018	800,0019
1000,002	1000,0025	1000,0018	1000,0001
Допуск	0,001	0,001	0,001

Проведенные эксперименты подтверждают теоретическую разработку использования лазерной измерительной системы для метрологической аттестации трехкоординатной информационно-измерительной системы механических величин. Тестовый контроль измерительных каналов КИМ. Объектом метрологического обеспечения выступает аналоговая часть (АЧ) ИК [6]. Наиболее перспективными методами контроля МХ ИК являются тестовые методы, основанные на введении в систему структурной и алгоритмической избыточности. На рис.3. представлена структурная схема аналогового ИК при его тестовом контроле с использованием источника тестовых воздействий (ИТВ).

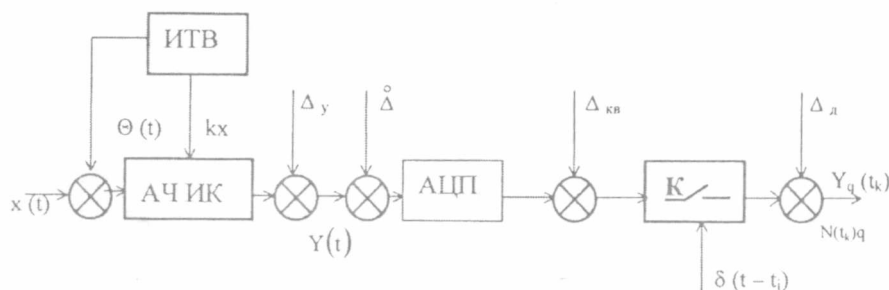


Рис. 3 Структурная схема ИК КИМ

Здесь  $x(t)$  - входной сигнал АЧ ИК;  $\theta(t)$ ,  $kx$  - аддитивные и мультипликативные тесты;  $\Delta_y$  - погрешность АЧ ИК;  $\Delta_0$  - шум входной части аналого-цифрового преобразователя (АЦП);  $\Delta_{kv}$  - погрешность квантования АЦП с шагом квантования  $q$ ;  $\Delta_d$  - погрешность коммутатора (К);  $y(t)$  - выходной сигнал АЧ ИК;  $Y_q(t_k)$  - его цифровое представление;  $N(t_k)$  - код выходного сигнала в момент времени  $t_k$ . Статический режим тестирования АЧ ИК. Рассмотрим ИК с линейной статической функцией преобразования. Для идеального и реального ИК выходные сигналы АЧ ИК могут быть представлены, соответственно, в виде:

$$y_n = a_1 + a_2 x; \quad y = \tilde{a}_1 + \tilde{a}_2 x;$$

$$y = a_1(1 + \gamma_a) + a_2(1 + \gamma_i)x,$$

Где  $\gamma_a, \gamma_m$  – относительные аддитивные и мультипликативные погрешности ИК;  $\theta$  – значение входного сигнала ИК; тестовый метод в статическом режиме реализуется путем аддитивного теста  $\theta$ , мультипликативного теста  $kx$  на входы АЧ ИК и нахождения оценок значения  $\hat{x}$  путем решения системы уравнений:

$$\begin{cases} y_1 = a_1 + a_2 x; & \hat{x} = \frac{y_3 - y_1}{y_2 - y_1} \cdot \frac{\theta}{k-1}; \\ y_2 = a_1 + a_2 (x + \theta); & \hat{a}_1 = y_1 - \frac{y_2 - y_1}{k-1}; \\ y_3 = a_1 + a_2 kx; & \hat{a}_2 = y_1 - \frac{y_2 - y_1}{\theta}. \end{cases}$$

Здесь  $\hat{x}, \hat{a}_1, \hat{a}_2$  – оценки входного сигнала и коэффициентов идеальной функции преобразования ИК соответственно. Погрешность определения  $x$  можно представить в виде

$$\Delta x = y_i^{-1} [a_1 \gamma_a + a_2 \gamma_i x].$$

Динамический режим тестирования АЧ ИК. Для практических задач интересен случай тестирования ИК в динамическом режиме, когда изменение входного сигнала  $x(t)$  исключает возможность измерения реакции АЧ ИК на входные тестовые сигналы в установившемся режиме. Рассмотрим случай, когда входной сигнал АЧ ИК изменяется по закону  $x(t) = x_0 + \alpha t$ . Входной сигнал ИК при тестировании представим в различных временных отрезках в виде

$$x(t) = \begin{cases} x_0 + \alpha(t - t_0), & t_0 < t \leq t_1; \\ x_0 + \alpha(t - t_0) + \theta \cdot 1(t - t_1) - \theta \cdot 1(t - t_2), & t_1 < t \leq t_2; \\ x_0 + \alpha(t - t_0) + \theta \cdot 1(t - t_1) - \theta \cdot 1(t - t_2) + \\ + kx_0(t - t_2) - kx_0(t - t_3) & t_2 < t \leq t_3 = T. \end{cases}$$

Дисперсия полученных оценок может быть уменьшена путем многократного контроля коэффициентов  $a_1$  и  $a_2$  и статистического усреднения результатов измерения.

Показано, что тестовый метод контроля метрологических характеристик ТИИС является экономически и технологически реализуемый, как способ передачи размера физической величины.

**Выводы.** Предложена новая методика автоматизированной поверки КИМ с использованием лазерной измерительной системы LMS-100 и гранитного куба. Проведен тестовый контроль измерительных каналов. Показано, что дисперсия полученных оценок уменьшается на 15% при многократном контроле, суммарная погрешность измерительного канала ИИС не превышает 0,1%.

## Литература

1. Координатные измерительные машины и их применение/Гапшис А.А., Каспарайтис А.Ю., М.Б. Модестов, Раманаускас З.А., Серков Н.А., Чудов В.А. - М.: Машиностроение, 1988. - 328 с.
2. Гапшис А.А., Каспарайтис А.Ю. Координатные измерительные машины// Станкостроение Литвы. - 1986. - №14. - С.5-11.
3. Muller Ernst. 3D - Koordinaten - Messtechnik der Zukunft//maschinenbau.- 1994.-23, №12. р.21
4. Кобринский А.А., Кобринский А.Е. Манипуляционные системы роботов.- М.: Наука, 1988. - 343 с.
5. Попов Е.П. Системы оцувствлення и адаптативные промышленные роботы М. Машиностроение, 1985.-340 с.
6. Бромберг Э.М., Куликовский К.Л. Тестовые методики повышения точности измерений М. Энергия, 1978.-242 с.