

Методика объемной компенсации систематических погрешностей координатно-измерительных машин на основании измерения плиты со сферами

Суслин В.П., Джунковский А.В. (avd2002@mail.ru)

ООО «Лаборатория САПР»

На сегодняшний день существует достаточно много методов калибровки координатно-измерительных машин (КИМ). Некоторые из них базируются на концевых мерах длины (КМД)[1], другие на прецизионных линейках с закрепленными на них сферами[2]. Наиболее современным принято считать использование лазерного интерферометра[3]. Однако, стоимость оборудования для лазерной интерферометрии за частую соизмерима со стоимостью самой КИМ. В современных условиях отечественной промышленности это резко снижает возможности использования лазерных интерферометров.

Кроме перечисленных средств калибровки КИМ, в западной литературе встречаются упоминания о калибровочных плитах с закрепленными на них сферами (ball plate). Имеется информация о заведении объемных компенсаций на основании измерения такой плиты в шести положениях в рабочем пространстве КИМ, как показано на рисунке 1.

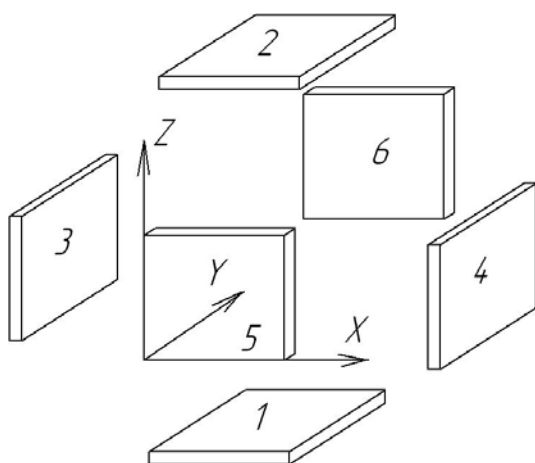


Рис. 1 Положения калибровочной плиты (условно разнесены)

Однако, сведений о методиках расчета объемных погрешностей КИМ в открытом доступе не обнаружено.

Лаборатория САПР МГТУ «МАМИ», несколько лет занимаясь модернизацией КИМ, не раз сталкивалась с необходимостью объемной компенсации систематических погрешностей. В силу этих обстоятельств было проведено исследование, имеющее своей целью разработку методики



Рис. 2 Калибровочная плита

расчета погрешностей КИМ по измерениям калибровочной плиты со сферами как альтернативы лазерному интерферометру.

Для проведения исследования был изготовлен экспериментальный образец калибровочной плиты, показанный на рисунке 2.

По результатам измерения плиты на высокоточной КИМ ($0.6+L/300$ мкм) были получены координаты центров сфер в системе координат, показанной на рисунке 3.

Следует отметить, что стоимость изготовления и аттестации такой плиты существенно меньше стоимости лазерного интерферометра.

Для расчета погрешностей внутри рабочего объема КИМ, исходя из их значений на его гранях необходимо использование методов многомерной аппроксимации. По результатам вычислительных экспериментов был сделан вывод о применимости известной из вычислительной геометрии формулы Кунса для аппроксимации поверхностей по двум семействам кривых для расчета погрешностей КИМ исходя из измерений плиты. Суть этих

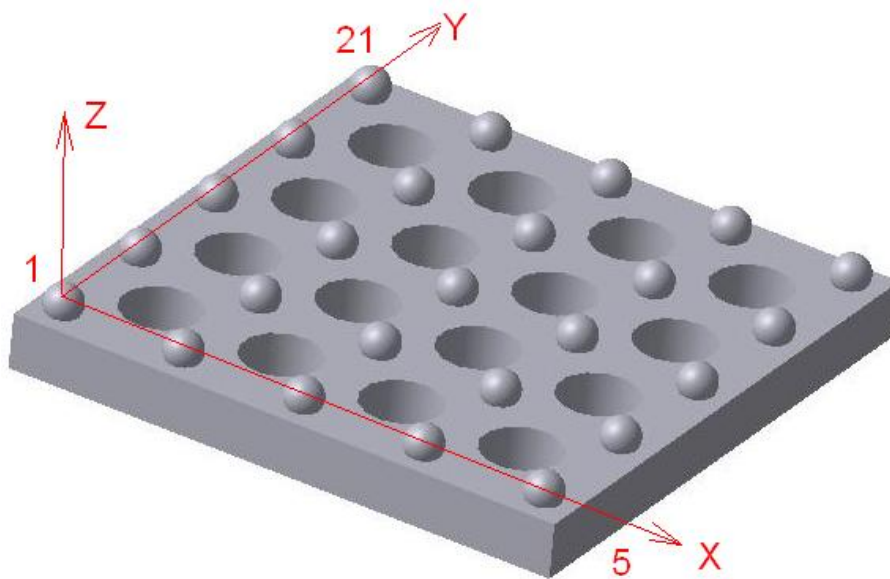


Рис. 3 Система координат калибровочной плиты

экспериментов состояла в моделировании погрешностей КИМ по известным из литературы аналитическим зависимостям с последующей их аппроксимацией и сравнением результатов аппроксимации и аналитических расчетов. Во всех случаях расхождение не превысило 0,1 мкм.

Для наглядности приведем расчетную схему для аппроксимации погрешностей оси X (рисунок 4).

В расчете величины погрешности в точке X_n принимают участие 4 из 6 положений плиты. Точки $x_{12}, x_{14}, x_{23}, x_{34}$ являются проекциями точки X_n на грани, а точки x_1, x_2, x_3, x_4 – на ребра рабочего объема. Тогда, формула Кунса для точки P_{Xn} имеет вид:

$$P_{Xn} = P_{x_{14}} * \alpha_1(y) + P_{x_{12}} * \alpha_3(z) + P_{x_{23}} * \alpha_2(y) + P_{x_{34}} * \alpha_4(z) - P_{x_1} * \alpha_1(y) * \alpha_3(z) - \quad (1)$$

$$- P_{x_2} * \alpha_2(y) * \alpha_3(z) - P_{x_3} * \alpha_2(y) * \alpha_4(z) - P_{x_4} * \alpha_1(y) * \alpha_4(z),$$

где P_x – погрешность по X в соответствующих точках;

$\alpha_1(y), \alpha_2(y), \alpha_3(z), \alpha_4(z)$, - весовые функции, значения которых линейно изменяются в интервале [0,1];

$\alpha_1(y) = 1 - y/Y_{max}; \alpha_2(y) = y/Y_{max}; \alpha_3(z) = 1 - z/Z_{max}; \alpha_4(z) = z/Z_{max};$

Y_{max}, Z_{max} – максимальные координаты Y и Z центров сфер.

Погрешности в точках $x_{12}, x_{14}, x_{23}, x_{34}$ рассчитываются также по формуле Кунса с учетом четырех ближайших сфер на калибровочной плите.

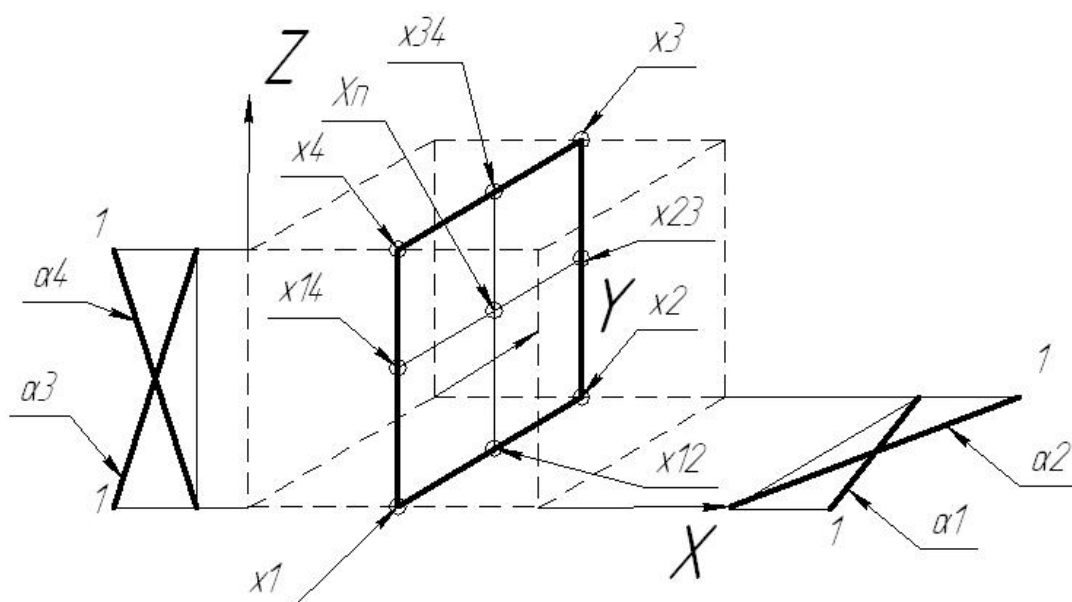


Рис. 4 Расчет погрешности по оси X.

Значения погрешностей в точках x_1, x_2, x_3, x_4 рассчитываются линейной интерполяцией двух ближайших значений, полученных по измерениям калибровочной плиты.

Таким образом, по формуле (1) могут быть рассчитаны погрешности оси X во всем объеме. Аналогично можно рассчитать погрешности осей Y и Z.

Также было установлено, что поскольку системы координат калибровочной плиты в положениях 2,4 и 6 (рисунок 5) в общем случае

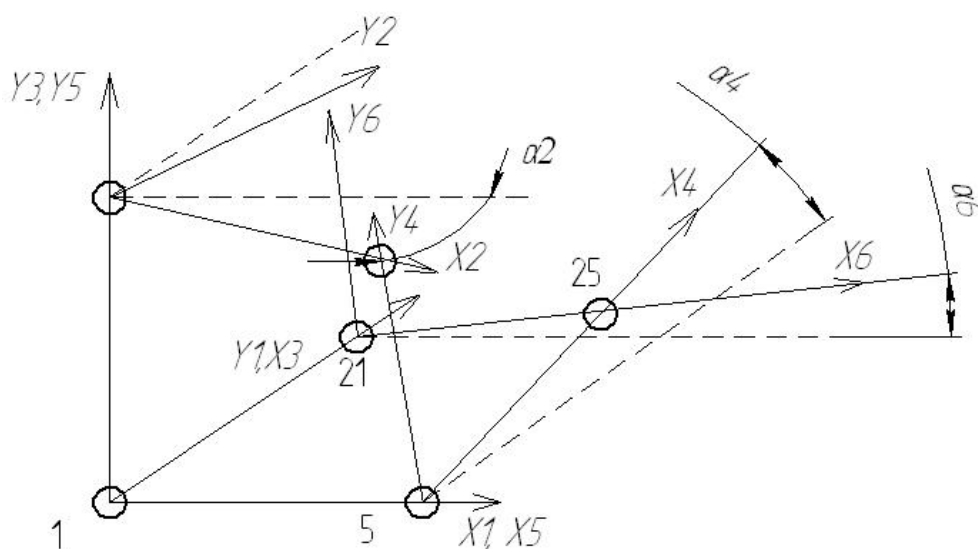


Рис. 5 Совмещение систем координат в пространстве

развернуты относительно первого положения на углы α_2, α_4 и α_6 соответственно, требуется процедура их совмещения с системой координат первого положения, путем поворота на соответствующие углы. Такая процедура получила название совмещения в пространстве. Она осуществляется путем сведения к минимуму суммы квадратов разностей

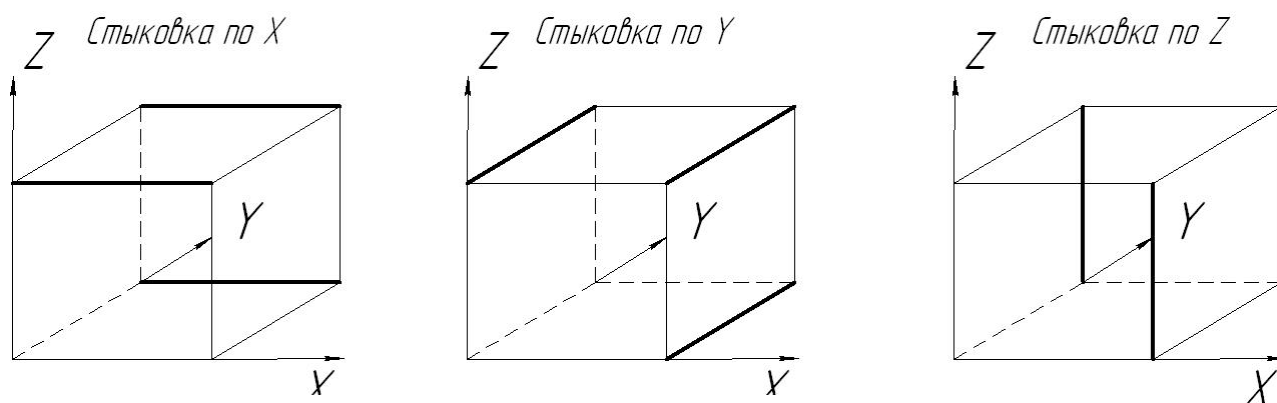


Рис. 6 Зоны стыковки

соответствующих значений координат в зонах стыковки, показанных на рисунке 6.

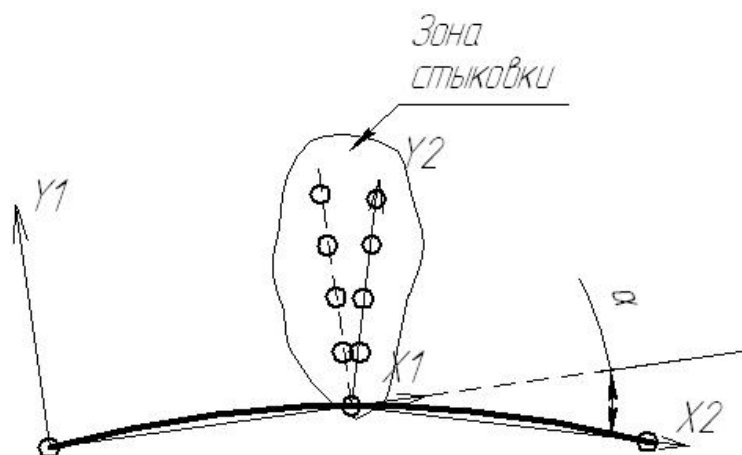


Рис. 7 Совмещение систем координат в плоскости

Кроме этого, если размер плиты существенно меньше размера калибруемой области, допускается перестановка плиты. В этом случае также необходимо совмещение систем координат (совмещение в плоскости). Схема этой ситуации на примере перестановки плиты вдоль оси X показана на рисунке 7. Предполагается, что ось X имеет дугообразный изгиб. Совмещение осуществляется поворотом системы координат второго положения (X_2Y_2) на некоторый угол α до тех пор пока сумма квадратов разностей координат X сфер в зоне стыковки не достигнет минимума.

Таким образом, процедуры совмещения систем координат в плоскости и в пространстве необходимы для корректной подготовки исходных данных для аппроксимации погрешностей по формуле Кунса.

Изложенная выше методика была апробирована на двух КИМ: Cordimet 700M фирмы С.Е. Johansson, консольной компоновки и SKY-1 фирмы POLI, порталного типа. При апробации использовался модуль объемной компенсации для измерительной программы ГеоАРМ, разрабатываемой в Лаборатории САПР. Результаты сведены в таблицы 1 и 2.

Таблица 1. Результаты по КИМ Cordimet 700М.

	Максимальные погрешности (мкм)*	
	До компенсации	После компенсации
По оси X	2,8	1,6
По оси Y	2,5	2,3
По оси Z	2,4	0,8
Объемная	12	5,1

Таблица 2. Результаты по КИМ SKY-1.

	Максимальные погрешности (мкм)*	
	До компенсации	После компенсации
Ось X	11,1	5,3
Ось Y	11,3	3,5
Ось Z	0,9	0,8
Объемная	21,3	5,5

*-по методике [4]

Применение разработанного метода расчета объемных погрешностей позволило повысить точность КИМ Cordimet 700М более чем в два, а КИМ SKY-1 почти в четыре раза, что положительно характеризует его работоспособность.

Таким образом изложенный метод калибровки и расчета пространственных погрешностей с целью их дальнейшей компенсации может быть предложен как альтернатива оптическим методам калибровки КИМ с использованием лазерного интерферометра.

Литература

[1]Каспарайтис А.Ю., Шилюнас П.И. Метод оценки составляющих погрешности координатных измерительных машин.//Измерительная техника.- 1990.- №7.- С. 15-18.

- [2] J . Soons, P. Schellekens, On the Calibration of Multi-Axis Machines Using Distance Measurements, Proceedings of the International Symposium on Metrology and Quality Control in Production, 1992, pp. 321–340.
- [3] Ch.Wang. Laser vector measurement technique for the determination and compensation of volumetric positioning errors. Part I: Basic theory // Review of scientific instruments.- 2000. V 71.-№10.- p. 3933 – 3937
- [4] МИ 2569 «Машины 3-х координатные портального типа. Методика поверки».