

Суслин В.П. Джунковский.А.В.

Исследование способов измерения концевых мер длины  
при калибровке координатно-измерительных машин

Аннотация.

В статье приводится сравнительный анализ способов измерения концевых мер длины на координатно-измерительных машинах с целью выявления оптимального для различных задач.

Ключевые слова: координатно-измерительная машина, концевая мера длины.

При проведении работ по калибровке координатно-измерительных машин (КИМ) с помощью концевых мер длины (КМД) важную роль играет способ измерения. На практике встречаются ситуации с измерениями разного количества точек на рабочих поверхностях КМД. Например, часто измеряют плоскость КМД по трем точкам и одну точку на другой плоскости. В методике поверки КИМ одного из предприятий длина КМД определяется как длина призмы: измеряется широкая плоскость КМД (не рабочая) по 4 точкам, затем прямая по 2 точкам на боковой (не рабочей) плоскости и далее по одной точке на рабочих плоскостях КМД.

Опыт работы лаборатории САПР по калибровке КИМ показал существенное влияние способа измерения КМД на точность результатов и трудоемкость операций. Мы не нашли в литературе сравнительного анализа разных способов измерения КМД с целью выявления наиболее эффективного. Очевидно, что для калибровки КИМ концевыми мерами такой анализ необходим, так как трудоемкость измерения и точность определения длины концевой меры оказывают непосредственное влияние на качество результата и время, затрачиваемое на калибровку.

На практике имеет смысл рассмотреть следующие способы, использующие измерения только рабочих плоскостей КМД:

- плоскость, измеренная по 4-м точкам, и одна точка на другой плоскости;
- плоскость, измеренная по шести точкам, и одна точка на другой плоскости;
- две плоскости, измеренные по четырем точкам;
- две плоскости, измеренные по шести точкам;
- две плоскости, измеренные по восьми точкам.

Из перечисленных нужно выбрать наименее трудоемкий способ, но дающий достаточные точностные показатели.

Методика оценки погрешности измерения КМД для каждого способа состоит в следующем. Производится многократное измерение КМД, определяется среднее значение и отклонения результатов отдельных измерений от среднего. Минимальное и максимальное отклонение дают размах отклонений, характеризующий погрешность измерения КМД, то есть в пределах этого размаха можно ожидать ошибку измерения КМД данным способом.

Для оценки полученные значения размаха будем сравнивать с погрешностью ощупывающей головки КИМ, определяемую по [1] и [2].

Получим теоретические оценки погрешностей измерения КМД. На рисунке 1 представлена расчетная схема поставленной задачи. Предположим, что с каждой стороны КМД имеется некая зона (размах точек) шириной  $\Delta$ , равной погрешности ощупывающей головки КИМ, в которой могут располагаться точки измерения. При измерении плоскости на грани КМД точки измерения усредняются, поэтому зона возможного расположения (размах)

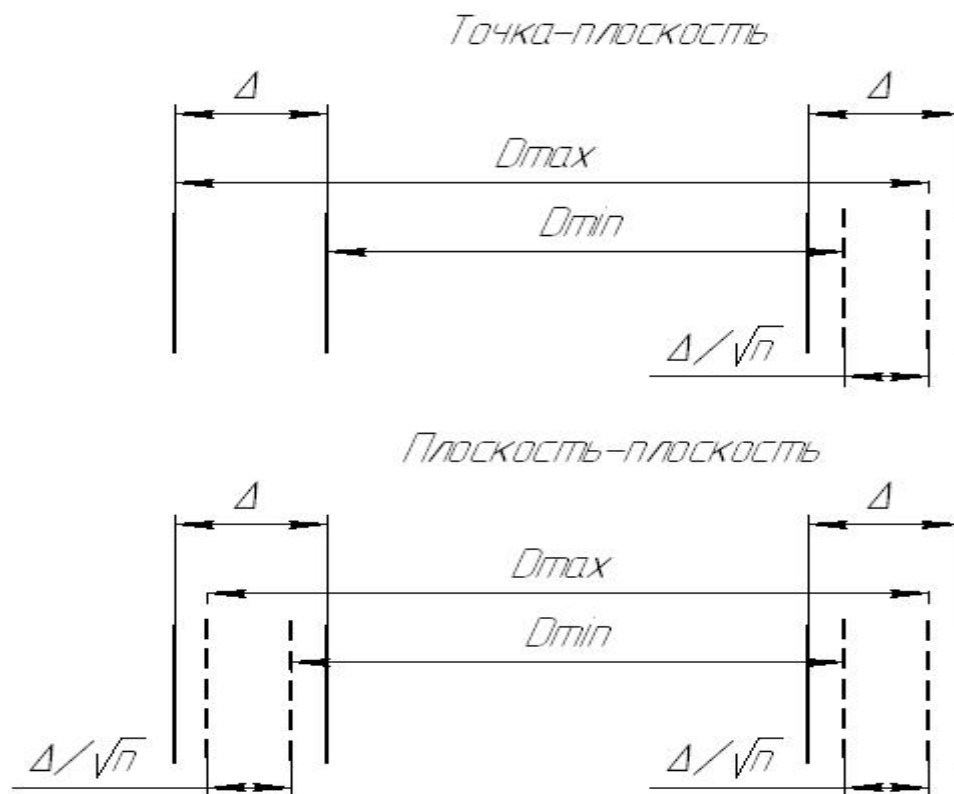


Рис 1. Расчетная схема

плоскостей, оцениваемый через среднеквадратичное отклонение, сузится пропорционально квадратному корню из количества точек, измеренных на плоскости. Следовательно:

$$\delta_{\text{ТП}} = D_{\text{max}} - D_{\text{min}} = \Delta + \frac{\Delta}{\sqrt{n}} = \frac{\Delta(1 + \sqrt{n})}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

$$\delta_{\text{ПП}} = D_{\text{max}} - D_{\text{min}} = \frac{\Delta}{\sqrt{n}} + \frac{\Delta}{\sqrt{n}} = \frac{2\Delta}{\sqrt{n}}$$

где  $n$  – количество точек на плоскости,

$\delta_{\text{ТП}}$  – размах по точке и плоскости,

$\delta_{\text{ПП}}$  – размах по двум плоскостям.

Очевидно, размах отклонений уменьшаются с ростом количества точек, измеряемых на плоскости. Причем размах, полученный по измерениям точки и плоскости существенно больше размаха по двум плоскостям. В этой связи интересно проследить взаимосвязь между “родственными” способами измерения точка-плоскость по 4 точкам и 2 плоскости по 4 точкам, точка-плоскость по 6 точкам и 2 плоскости по 6 точкам. Нетрудно заметить, что измерение КМД по 2 плоскостям является усреднением 4 и 6 расстояний от каждой из измеренных точек до противоположной плоскости соответственно для первой и второй

$$\frac{\delta_{\text{ТП}}}{\delta_{\text{ПП}}} = \frac{1 + \sqrt{n}}{2} \quad \left( \frac{\delta_{\text{ТП}}}{\delta_{\text{ПП}}} \right)_{n=4} = 1,5 \quad \left( \frac{\delta_{\text{ТП}}}{\delta_{\text{ПП}}} \right)_{n=6} = 1,72 \quad (2)$$

А также:

$$\left( \delta_{\text{ПП}} \right)_{n=4} = \Delta \quad \left( \delta_{\text{ПП}} \right)_{n=6} = \frac{2\Delta}{\sqrt{6}} \approx 0,82\Delta \quad (3)$$

То есть, первым способом, дающим размах отклонений меньше, чем погрешность ощупывающей головки КИМ, является измерение двух плоскостей по 6 точкам.

В целях практической проверки выявленных выше зависимостей на КИМ DKM 1-300DP (погрешность линейных перемещений  $3+L/300$  мкм, погрешность ощупывающей головки  $\pm 2,1$  мкм) был поставлен измерительный эксперимент. Суть его состоит в многократном измерении концевых мер различной длины всеми перечисленными

способами, обработке полученных значений и их сопоставления с теоретическими выкладками.

Измерялись меры номиналом 100, 150, 200, 300 мм по 15 раз каждым из перечисленных выше способов. Обработка результатов велась в соответствии с [3]. Нормальность закона распределения результатов измерения проверялась по всей совокупности значений, полученных одним способом, но на мерах разной длины. Было установлено, что результаты не противоречат нормальному закону. Для примера на рисунке 2 представлена гистограмма, построенная по результатам измерения мер двумя плоскостями по 6 точкам.

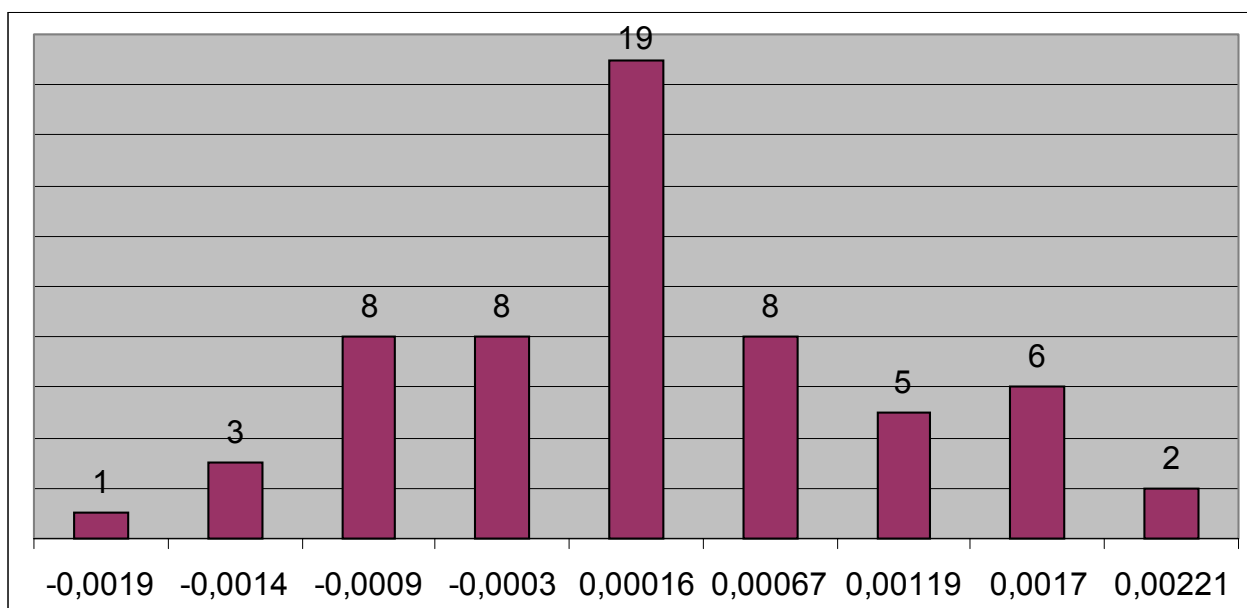


Рис.2. Гистограмма результатов измерения

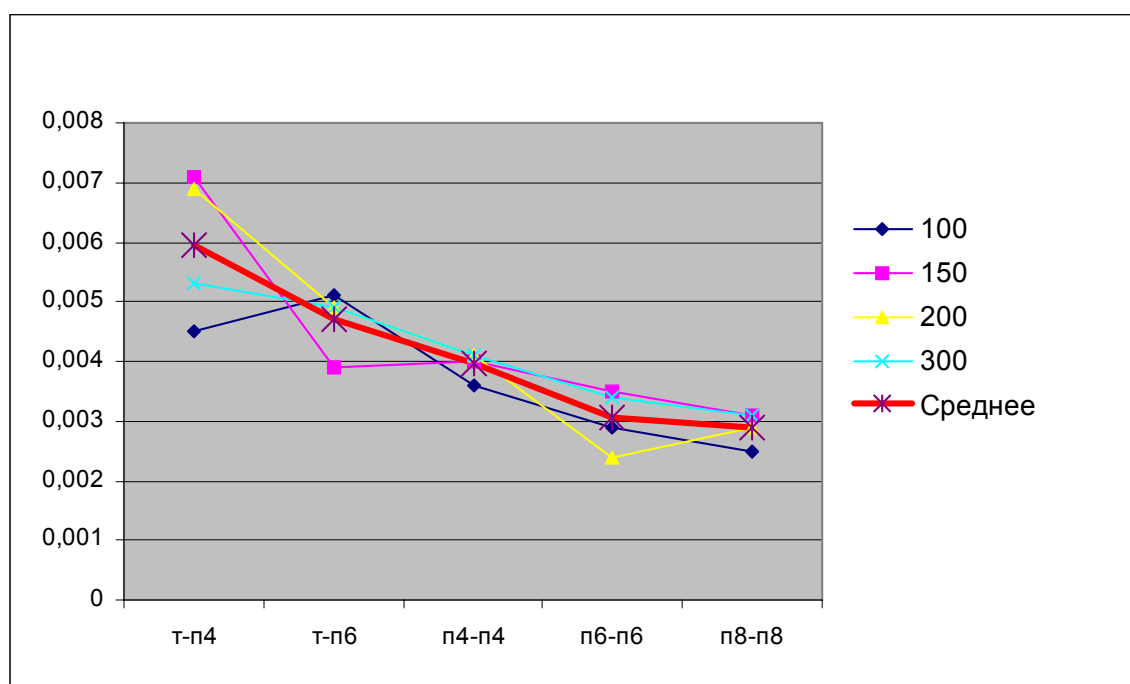


Рис.3. График размаха отклонений

На рисунке 3 представлен полученный график размаха значений. По оси абсцисс на нем отложены способы измерения КМД (например, "т-п4" означает точка и плоскость по 4 точкам), по оси ординат размах в миллиметрах. Оценку графика удобно вести по усредненной кривой (выделена утолщенной линией).

Результаты сопоставления теоретических и экспериментальных значений полученных выше представлены в таблице 1.

Таблица 1. Теоретические и экспериментальные значения

	δтеор мкм	δэксп мкм	Расхождение %
Т-п4	6	6	0
Т-п6	5,6	4,7	16
П4-п4	4	3,9	2,5
П6-п6	3,3	3	9
П8-п8	2,8	2,9	3,5

Возвращаясь к первостепенной задаче данного эксперимента можно заключить, что измерение длины КМД как расстояния от точки до плоскости, так как этот способ существенно занижает точностные характеристики КИМ.

С другой стороны, измерение двух плоскостей по восьми точкам явно избыточно.

Размах, полученный при измерении двух плоскостей по четырем точкам, находится на границе допустимой области, поэтому данный способ можно рекомендовать при поверках координатно-измерительных машин.

Для особо прецизионных измерений, например при калибровке КИМ с целью программной компенсации систематических погрешностей, имеет смысл проводить измерение двух плоскостей по шести точкам.

#### Литература.

- [1] МИ 2569 «Машины 3-х координатные портального типа. Методика поверки».
- [2] ISO 10360-2 Geometrical Product Specifications (GPS) — Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM). Part 2: CMMs used for measuring size

[3] ГОСТ 8.207-76 «Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений».