

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-106-116

**Каменев С.В., \*Марусич К.В.**

Оренбургский государственный университет

\*E-mail: mkv82@mail.ru

## ВЛИЯНИЕ СТРАТЕГИИ ВЫБОРКИ ТОЧЕК НА ТОЧНОСТЬ КООРДИНАТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ОТКЛОНЕНИЯ ОТ ПЛОСКОСТНОСТИ

**Аннотация.** Современное машиностроение характеризуется постоянным повышением требований к качеству выпускаемых изделий. При этом важнейшим показателем качества является геометрическая точность исполнения их размеров и формы. Наиболее универсальным и надежным методом контроля параметров геометрической точности на текущем этапе развития производства представляются координатные измерения, выполняемые на базе координатно-измерительных машин (КИМ) различной конструкции. Однако производительность этих измерений и надежность получаемых результатов прямо зависят от того, насколько правильно выбрана стратегия измерений. Выбор правильной стратегии измерений, обеспечивающей приемлемый баланс между их точностью и производительностью, представляет собой технологическую проблему, которая не имеет однозначного решения. На практике отмеченная проблема обычно решается путем поиска стратегии выборки точек, подходящей для оценки контролируемого геометрического параметра изделия с достаточной точностью при минимальной продолжительности измерений. Как правило, поиск осуществляется в рамках нескольких известных стратегий выборки на основе опыта и собственных предпочтений оператора КИМ, что не гарантирует получения надежных результатов. Предлагаемая работа позволяет облегчить этот поиск на основе анализа эффективности нескольких стратегий выборки точек применительно к оценке отклонения от плоскостности. Приводятся данные, дающие возможность оценить влияние объема и шаблона выборки точек на точность оценки отклонения. Кроме того, рассматриваются вопросы выбора оптимальной траектории движения измерительного датчика для различных стратегий выборки, на основе чего формулируются обобщающие выводы об эффективности их использования.

**Ключевые слова:** координатные измерения, координатно-измерительная машина, геометрическая точность, стратегия выборки точек, отклонение от плоскостности

**Введение.** Геометрическая точность обработки является одним из основных показателей качества машиностроительных изделий. Постоянно растущие требования к точности этих изделий в условиях рыночной конкуренции вынуждают их производителей использовать наиболее эффективные средства контроля ее параметров. К таким параметрам, рассматриваемым в связи с точностью и взаимозаменяемостью в машиностроении, относится отклонение от плоскостности, контроль которого актуален для деталей машин, имеющих развитые плоские поверхности с высокими требованиями по точности формы. В силу геометрической интерпретации данного вида отклонения наибольшая точность его оценки достигается при помощи координатных измерений, в основе которых лежит использование координатно-измерительных машин, получивших широкое распространение во многих отраслях промышленности, связанных с механообработкой.

Главный принцип координатных измерений основан на определении координат некоторого количества точек на реальных поверхностях измеряемой детали, и их автоматической математической обработке в соответствующем программном обеспечении. Для снятия координат

точек (выборки точек) применяются различные измерительные системы, смонтированные на исполнительных элементах КИМ и связанные с компьютером для обработки результатов измерений [1].

Эти системы можно разделить на сканирующие, которые осуществляют выборку точек путем непрерывного оптического или механического сканирования геометрических элементов детали, и поточечные, которые осуществляют дискретную выборку точек при помощи тактильных датчиков триггерного типа. Независимо от типа измерительной системы точность обеспечиваемых ею результатов оценки реальной геометрии, при прочих равных условиях, напрямую зависит от количества измеренных точек (размера выборки) и шаблона их распределения [2]. То есть, чем больший объем будет иметь выборка, тем точнее будут получаемые результаты измерений [3]. В то же время, объем этой выборки не должен быть избыточным, что чревато повышением трудоемкости получения этих результатов и снижением производительности измерений.

Если отмеченная проблема стоит менее остро для сканирующих измерительных систем (в виду большой производительности многих подобных систем), то для поточечных систем,

наиболее распространенных в промышленности, ее эффективное решение имеет большую актуальность [4]. Это решение обычно ищется путем выбора правильного числа измеряемых точек и корректного шаблона их распределения на поверхностях контролируемых элементов детали, т.е. путем выбора некоторой стратегии выборки точек, приемлемой для оценки рассматриваемого геометрического параметра с достаточной точностью [5–8].

Применительно к оценке отклонения от плоскостности такая стратегия должна обеспечивать захват экстремальных точек контролируемой поверхности, чтобы гарантировать максимально точную оценку ее погрешности формы. В общем случае выбор подходящей стратегии предполагает, во-первых, определение размера (объема) выборки, а во-вторых, определение шаблона распределения точек в этой выборке. Решение первой задачи имеет экономический характер, т.к. затраты на измерение прямо связаны с размером выборки [9]. Решение второй задачи менее прямолинейно, и в зависимости от объема доступной исходной информации об измеряемой детали, может осуществляться с использованием различных стратегий. Известные в настоящее время стратегии выборки по способу их построения можно сгруппировать в три категории [10, 11].

Первая категория включает в себя стратегии «слепой» выборки, структура построения которых основана на выборе измеряемых точек «вслепую», т.е. в условиях отсутствия каких-либо данных о локализации геометрических отклонений в тех или иных областях контролируемой поверхности [5, 7, 9]. Такие стратегии характеризуются приблизительно равномерной плотностью точек во всех областях контролируемой поверхности. Типовыми стратегиями «слепой» выборки являются стратегия равномерной выборки, а также ряд стратегий, распределение точек в которых основано на псевдо- и квазислучайных математических последовательностях [12–16].

Ко второй категории относятся стратегии адаптивной выборки, строящиеся на постепенном добавлении в выборку точек в зависимости от выполнения заданного критерия, проверяемого для каждой измеренной точки, без использования фиксированного шаблона распределения [17–20]. Такие стратегии основаны на информации о геометрическом отклонении, собранной непосредственно в процессе измерения, т.е. предварительном наборе точек, в зависимости от которого могут выбираться дополнительные точки до тех пор, пока не будет выполнено какое-либо условие завершения их выбора [21–2323].

Стратегии выборки, основанные на производственных сигнатурах, опираются на информацию о геометрических погрешностях измеряемой детали, полученную в ходе предварительного исследования производственного процесса, которым была получена данная деталь. Для таких стратегий характерно то, что шаблон и размер выборки являются фиксированными и принимаются один раз для всех измерений. Данное постоянство объясняется тем фактом, что геометрические отклонения, обусловленные конкретным производственным процессом, предрасположены проявляться одинаково на каждой произведенной детали [11].

По причине сложности адаптивных стратегий выборки и большой трудоемкости (из-за необходимости дополнительных исследований) стратегий на основе производственных сигнатур наибольшее распространение получили стратегии «слепой» выборки, различные виды которых используются в подавляющем большинстве случаев координатных измерений машиностроительных изделий. При этом используемая стратегия «слепой» выборки, как правило, основывается на личном опыте оператора КИМ и его собственных предпочтениях, не имея под собой обоснования своей эффективности.

Этот факт объясняется отсутствием общепринятых методик координатных измерений, закрепленных в какой-либо нормативной документации. Несмотря на то, что ряд международных стандартов ISO затрагивает методики координатных измерений погрешностей формы типовых геометрических элементов (например, ISO 12781–2:2011), они малоприменимы для поточечных измерительных систем, т.к. предполагают использование профильных сканирующих систем. Исследовательские работы, посвященные данной проблеме, также не дают однозначного ответа об эффективности той или иной стратегии «слепой» выборки точек при координатных измерениях [24, 25].

**Материалы и методы.** По этой причине в предлагаемой статье предпринята попытка установления эффективности различных стратегий «слепой» выборки на примере координатных измерений отклонения от плоскостности. Для этого была выполнена серия натуральных экспериментов, направленных на измерение тестовой детали, с использованием различных стратегий «слепой» выборки. Используемые стратегии выборки точек были представлены:

- равномерной (систематической) выборкой;
- выборкой по сетке с «дрожащими» узлами (джиттер);
- случайной выборкой;

- выборкой с использованием латинского гиперкуба;
- выборкой Хэммерсли (по сетке Хэммерсли);
- выборкой Холтона–Зарембы (по сетке Холтона);
- выборкой Фора (по сетке Фора);
- выборкой Соболя (по сетке Соболя).

В качестве тестовой детали использовалась стальная пластина (рис. 1), поверхности которой были обработаны таким образом, чтобы гарантировать наличие погрешностей формы на ее поверхностях с шероховатостью  $Ra_{6,3}$  мкм. Измерения детали производились на координатно-измерительной машине Wenzel XOrbit 55, оснащенной измерительной головкой PH10T фирмы Renishaw с тактильным датчиком TP200 (триггерного типа). Паспортная волюметрическая погрешность измерения данной модели КИМ составляет 2,3 мкм. Для измерения использовался щуп с рубиновым сферическим наконечником номинальным диаметром 6 мм. Результаты измерений обрабатывались с использованием программного обеспечения КИМ Metrosoft QUARTIS и специализированного программного обеспечения для обработки и визуализации данных OriginPro.



Рис. 1. Тестовая деталь для измерения отклонения от плоскостности

**Основная часть.** В общей сложности, было выполнено 112 измерений детали (по 14 измерений для каждого из 8 типов рассматриваемых стратегий выборки). Каждое измерение в серии из 14 измерений, характеризующих данную стра-

тегию выборки, определялось (при прочих одинаковых условиях) соответствующим шаблоном распределения точек на поверхности  $80 \times 80$  мм и их количеством, т.е. размером выборки. Для обеспечения равномерной плотности выборки ее размер в каждой серии выбирался путем распределения одинакового числа точек в двух координатных направлениях контролируемой плоскости. При этом во всех случаях минимальный размер выборки составлял 4 точки ( $2^2$ ), а ее максимальный размер – 225 точек ( $15^2$ ).

Начальным этапом измерений являлось измерение плотной выборки размером 4096 ( $64^2$ ) точек, равномерно распределенных по всей площади контролируемой поверхности. Данная процедура была необходима для максимально точной оценки ее отклонения от плоскостности. Полученные результаты измерений представлены в форме графика поверхности на рис. 2а. Как видно на приведенном рисунке поверхность детали имеет явно выраженное отклонение от плоскостности в форме вогнутости. Однако точная оценка величины этого отклонения затруднена по причине искажения измеренной макрогеометрии высокочастотными отклонениями малых амплитуд, проявляющимися из-за влияния микрогеометрии поверхности на результаты измерений.

Поэтому перед оценкой величины отклонения измерительные данные были обработаны цифровыми фильтрами и дополнительно сглажены путем их полиномиальной аппроксимации. Результаты этой обработки показаны в виде графика поверхности на рис. 2б. Последующая математическая обработка «сглаженных» данных по алгоритму, идентичному тому, что используется в программном обеспечении КИМ, дала уточненное значение отклонения от плоскостности равное 0,041 мм. Вычисленное значение было принято в качестве фактического отклонения от плоскостности, которое в дальнейшем использовалось для нормирования результатов остальных измерений, основанных на использовании вышеуказанных выборок.

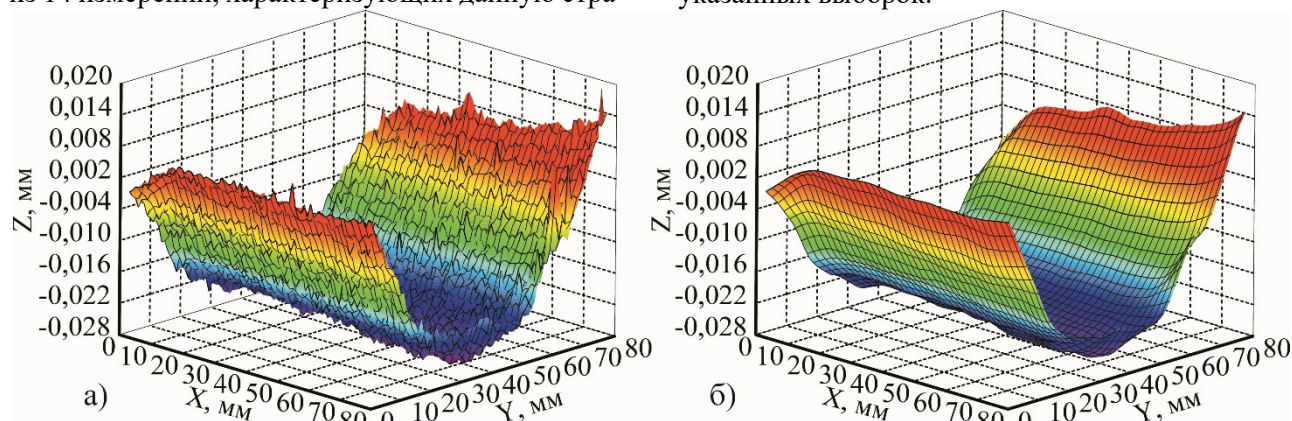


Рис. 2. Результаты псевдосканирования поверхности тестовой детали:  
а) без сглаживания; б) со сглаживанием

Результаты дальнейших измерений сведены в табл. 1, каждый столбец которой соответствует определенной стратегии выборки. Первой из них выступает стратегия равномерной выборки, наиболее часто используемая на практике. Определение данной выборки предполагает структурирование измеряемых точек в равномерную ортогональную сетку с фиксированными узлами

(рис. 3а). При проведении измерений необходимый шаблон выборки автоматически генерировался программными средствами Metrossoft QUARTIS. Нормированные значения отклонения от плоскостности, измеренные на основе отмеченной стратегии выборки при различных размерах выборки, приведены в столбце 1 табл. 1.

Таблица 1

### Результаты измерения отклонения от плоскостности

Размер выборки n, шт.	Нормированное отклонение от плоскостности							
	1	2	3	4	5	6	7	8
3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
4	0,026	0,117	0,317	0,194	0,432	0,386	0,060	0,160
9	0,405	0,544	0,498	0,862	0,665	0,645	0,497	0,639
16	0,483	0,695	0,569	0,770	0,813	0,765	0,691	0,706
25	0,612	0,681	0,722	0,777	0,722	0,839	0,803	0,718
36	0,673	0,724	0,755	0,848	0,880	0,768	0,835	0,786
49	0,737	0,833	0,772	0,857	0,864	0,837	0,842	0,714
64	0,787	0,847	0,955	0,851	0,920	0,802	0,817	0,808
81	0,806	0,894	0,797	0,843	0,949	0,831	0,871	0,803
100	0,965	0,886	0,778	0,863	0,903	0,949	0,879	0,846
121	0,846	0,855	0,962	0,896	0,852	0,950	0,870	0,824
144	0,872	0,894	0,865	0,932	0,929	0,832	0,940	0,987
169	0,902	0,884	0,798	0,933	0,908	0,882	0,897	0,989
196	0,905	1,005	0,853	0,921	0,956	0,951	0,957	0,993
225	0,925	0,935	0,917	0,916	0,961	0,932	0,965	0,985

Выборка по сетке с «дрожащими» узлами представляла собой модификацию равномерной выборки. Ее шаблон также определялся ортогональной сеткой, каждая ячейка которой содержала одну измеряемую точку (рис. 3б). При этом положение точки в пределах ячейки выбиралось случайным образом на основе специально разработанного программного алгоритма. Разработанный алгоритм обеспечивал автоматическую генерацию координат последовательности точек в выборке заданного размера, фактическое воспроизведение которой при измерении на КИМ осуществлялось с использованием программного кода DMIS 5.2 (Dimensional Measuring Interface Standard). Нормированные значения отклонения от плоскостности, измеренные при помощи данной стратегии, приведены в столбце 2 табл. 1.

Стратегия случайной выборки определялась псевдослучайным распределением заданного числа точек в границах измеряемой поверхности. При ее использовании координаты измеряемых точек в выборке заданного размера генерировались на основе закона непрерывного равномерного распределения. Иначе говоря, данная стратегия выборки не имела предопределенного шаблона (рис. 3в), и каждая измеряемая выборка

определялась некоторым массивом точек, случайно распределенных в границах рассматриваемой поверхности. Обход этих точек измерительным датчиком при измерении каждой выборки обеспечивался на основе управляющих программ, разработанных с использованием DMIS. Результаты измерения, полученные на основе стратегии случайной выборки, приведены в столбце 3 табл. 1.

В основе стратегии, построенной на использовании латинского гиперкуба, лежала выборка случайных двумерных координат точек из равновероятных одинаковых интервалов, заданных на контролируемой поверхности. При этом каждый из интервалов содержал единственную точку, планарные координаты которой являлись псевдослучайными величинами, подчиняющимися закону непрерывного равномерного распределения. Необходимый шаблон распределения точек (рис. 3г) обеспечивался программными средствами Origin и воспроизводился при измерениях на КИМ с помощью программного кода DMIS. Результаты измерения отклонения от плоскостности, полученные с использованием данной стратегии, приведены в столбце 4 табл. 1.

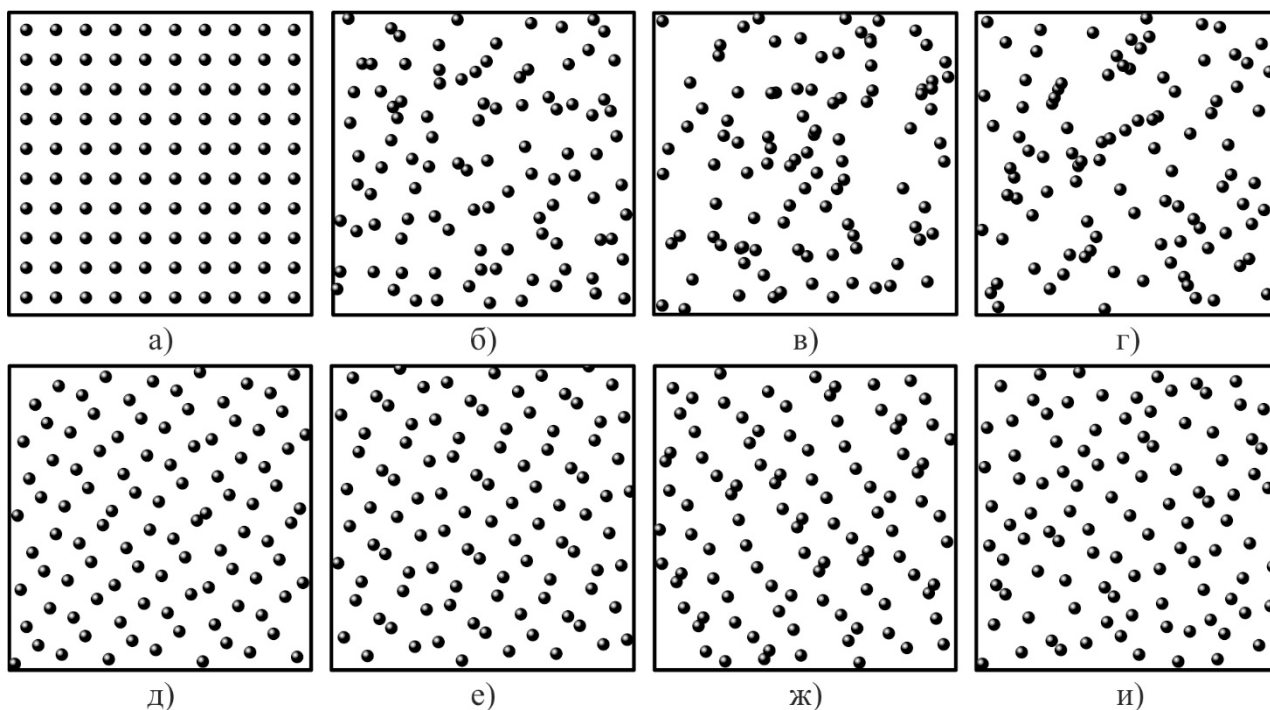


Рис. 3. Шаблон выборки 100 точек при использовании стратегии:  
 а) равномерной выборки; б) выборки по сетке с «дрожащими» узлами; в) случайной выборки;  
 г) методом латинского гиперкуба; д) Хэммерсли; е) Холтона-Зарембы; ж) Фора; з) Соболя

Следующие три стратегии выборки точек, а именно: Хэммерсли, Холтона–Зарембы и Фора, были основаны на известной в математике последовательности Ван дер Корпута, являющейся одномерной квазислучайной последовательностью с малыми отклонениями и имеющей следующее выражение [15]:

$$v_i = \sum_{j=0}^{k-1} b_{ij} \cdot p^{-j-1}, \quad i \in \{0, 1, \dots, n-1\}, \quad (1)$$

где  $v_i$  – нормализованное  $i$ -е значение последовательности;

$b_i$  – двоичная запись индекса  $i$ ;

$b_{ij}$  –  $j$ -й бит в записи  $b_i$  (0 или 1);

$p$  – базовое число (для всех трех последовательностей принято  $p = 2$ );

$n$  – заданное число точек в последовательности;

$k$  – наименьшее целое число большее или равное  $\log_p n$ .

Для генерации шаблонов распределения точек в трех рассматриваемых стратегиях выборки использовались различные модификации этой последовательности, расширенные на двумерное пространство. Генерация шаблонов для стратегий Хэммерсли и Холтона–Зарембы производилась в среде Origin на основе специальных программных кодов, разработанных с использованием сценарного языка LabTalk, предусмотренного в Origin. Генерация шаблонов выборки для стратегии Фора производилась программными средствами Matlab. Примеры шаблонов распре-

деления точек для стратегий Хэммерсли, Холтона–Зарембы и Фора приведены соответственно на рис.3д, е и ж. Результаты измерений, полученные с использованием названных стратегий, приведены в столбцах 5 (Хэммерсли), 6 (Холтон–Заремба) и 7 (Фора) табл. 1.

Последняя использованная стратегия выборки была основана на квазислучайной последовательности Соболя, генерируемой при помощи бинарных функций, называемых направляющими векторами и соотносящихся с примитивными (неприводимыми) многочленами второй степени. Для генерации соответствующего шаблона двумерной выборки (рис. 3и) использовалась встроенная функция Matlab (sobolset). Выборка точек в соответствии с полученным для каждого ее размера шаблоном производилась путем программирования траектории движения измерительного датчика средствами DMIS. Нормированные значения отклонения от плоскостности, определенные при помощи данной стратегии, содержатся в столбце 8 табл.1.

Анализ результатов измерения, полученных в каждой серии экспериментов, обнаруживает наличие зависимости оцениваемой погрешности формы от размера выборки, имеющей явно выраженный нелинейный (близкий к экспоненциальному) характер, что иллюстрируется рисунком 4. Отсюда можно заключить, что необходимая точность координатных измерений отклонения от плоскостности на основе стратегий «слепой» выборки гарантируется только тогда, когда размер выборки (плотность точек) достигает некоторого

определенного числа. Так, например, выборка размером в 36 точек характеризуется рассеянием нормированной величины отклонения, составляющим 20,7 % от фактической величины отклонения (при минимальной погрешности 12 %), тогда как при размере выборки в 225 точек рассеяние результатов составляет 6,9 % (при минимальной погрешности 1,5 %).

Однако здесь нужно заметить, что стратегия равномерной выборки демонстрирует несколько худшие результаты по сравнению с остальными использованными стратегиями, что выражается в

меньшей чувствительности результатов измерений к размеру выборки (соответствующая кривая на рисунке является более полой). Данное наблюдение можно объяснить тем фактом, что подлежащая измерениям поверхность была вогнутой (рис. 2). По этой причине погрешность ее формы, вычисленная на основе координат измеренных точек, прямо зависит от их близости к границам вогнутой области, которая для использованного метода построения шаблона равномерной выборки (рис. 3а) была недостаточной при малых размерах выборки.

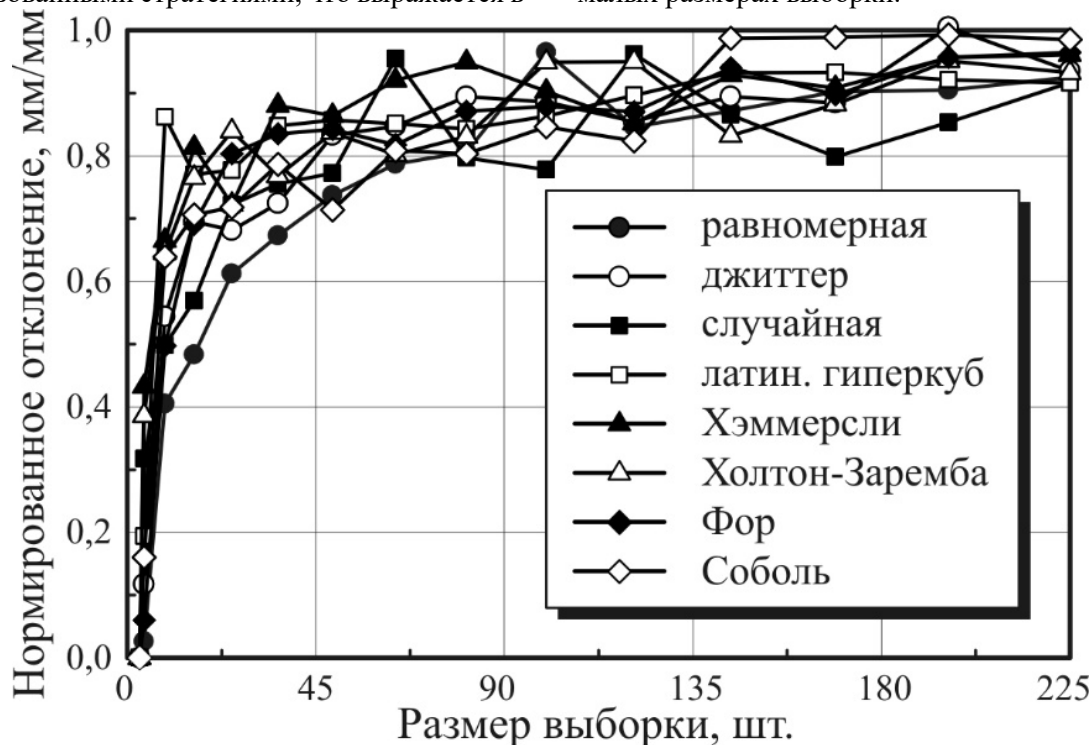


Рис. 4. Изменение измеренного отклонения от плоскостности в зависимости от размера выборки

Практическая идентичность полученных результатов затрудняет выбор предпочтительной стратегии выборки точек при планировании координатных измерений. В связи с этим, помимо точности оценки погрешности формы, необходим дополнительный показатель, позволяющий установить предпочтительную стратегию выборки. В качестве такого показателя представляется обоснованным рассматривать продолжительность измерений, т.к. в реальном производстве она имеет большое значение, когда необходимо обеспечить достаточную точность измерений заданного геометрического параметра при их максимальной производительности [13].

В связи с этим для каждой из ранее рассмотренных стратегий выборки была оценена производительность выполняемых с их помощью измерений. Данные оценки были получены путем проведения ряда дополнительных экспериментов. В каждом из них измерялось отклонение от

плоскостности на основе выборки в размере 256 точек, шаблон распределения которых определялся одной из восьми стратегий, и фиксировалось время, затраченное на измерение данной выборки. При этом каждая выборка измерялась два раза (за исключением равномерной выборки), но каждый раз с разной траекторией движения измерительного датчика. В первом случае для измерения применялась траектория «как есть», т.е. порядок обхода измеряемых точек определялся порядком их создания в используемом программном генераторе координат точек. Во втором случае применялась траектория, которая была предварительно оптимизирована на основе решения задачи коммивояжера методом ближайшего соседа [14], для чего был разработан соответствующий программный код на сценарном языке LabTalk. Примеры использованных траекторий для шаблона выборки с использованием стратегии Хэммерсли приведены на рис. 5.

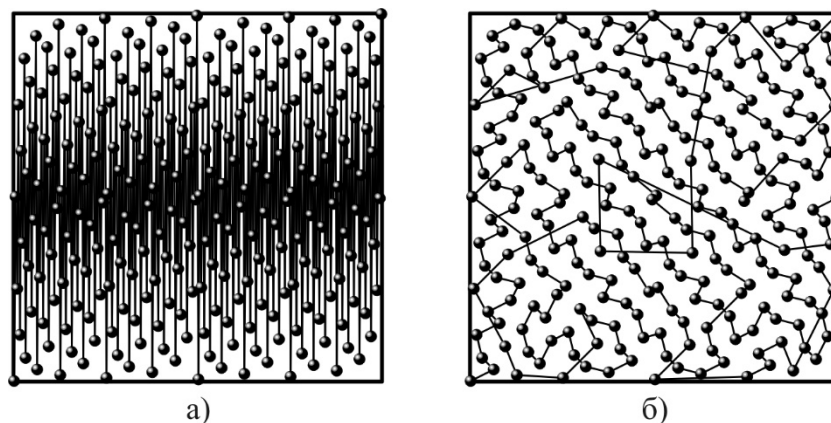


Рис. 5. Траектория движения измерительного датчика:  
а) не оптимизированная; б) оптимизированная

Измерения выборок во всех экспериментах производились при прочих равных условиях, а именно:

- при одинаковой постоянной скорости перемещения измерительного щупа между точками, а также его подвода к точке и отвода от нее;
- при одинаковой дистанции поиска точки и дистанции отвода щупа;

- при одинаковом начальном положении наконечника измерительного щупа относительно измеряемой поверхности.

Полученные результаты экспериментов в виде величин времени, затраченного на измерение каждой выборки, приведены в табл. 2.

Таблица 2

#### Результаты оценки продолжительности измерений

Траектория движения датчика	Время измерения выборки точек, мин							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Не оптимизированная	10,8	13,0	15,2	16,6	17,1	17,1	15,6	15,3
Оптимизированная	10,8	12,2	10,3	12,1	12,4	12,4	10,5	10,6

**Выводы.** Анализ приведенных в табл. 2 данных показывает, что продолжительность измерений заметно варьирует в зависимости от используемой стратегии выборки и применяемой траектории движения измерительного датчика. Так для всех рассматриваемых стратегий выборки, кроме стратегий равномерной выборки и «джиттера», оптимизация траектории движения датчика в среднем дает сокращение продолжительности измерений на 30 %. В случае равномерной выборки порядок обхода автоматически сгенерированных контрольных точек по умолчанию являлся оптимальным, в связи с чем продолжительность измерения одинакова для оптимизированной и не оптимизированной траектории измерения. По этой же причине для стратегии «джиттера», где распределение точек было близко к равномерному, наблюдается незначительное (около 6 %) расхождение продолжительности измерения для оптимизированной и неоптимизированной траектории.

При этом стратегия равномерной выборки характеризуется наименьшей продолжительностью измерений, однако, как было показано выше, обеспечивает самую низкую точность измерений при малом размере выборки. Поэтому в том случае, когда не используется оптимизация

траектории движения датчика, более предпочтительной представляется стратегия «джиттера», обеспечивающая наименьшую после равномерной стратегии продолжительность измерения. Наибольшую продолжительность измерений, как для не оптимизированной, так и для оптимизированной стратегии выборки дают стратегии выборки Хэммерсли и Холтона–Зарембы, что не позволяет их (в общем случае) рекомендовать для координатных измерений. Из рассмотрения результатов, полученных для оптимизированной траектории видно, что наименьшую продолжительность измерений обеспечивает стратегия случайной выборки, хотя стратегии Фора и Соболя лишь незначительно ей уступают в этом отношении. Следует заметить, что эти три названные стратегии обеспечивают примерно одинаковую продолжительность измерений и для не оптимизированной траектории движения датчика.

Таким образом, сделанные наблюдения позволяют заключить, что при координатных измерениях отклонения от плоскостности в отсутствие какой-либо оптимизации измерительной траектории предпочтительно использовать стратегию выборки по сетке с «дрожащими» узлами (джиттер). В условиях оптимизации траектории наилучшие результаты показывает стратегия

случайной выборки, что позволяет ее рекомендовать для проведения измерений. При этом для большинства рассмотренных стратегий выборки оптимизация траектории движения измерительного датчика существенно снижает продолжительность измерения, но требует дополнительных затрат на планирование координатных измерений.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Mian S.H., Al-Ahmari A. New developments in coordinate measuring machines for manufacturing industries // *International Journal of Metrology and Quality Engineering*. 2014. Vol. 5. Pp. 101-p1–101-p10. DOI: 10.1051/ijmqe/2014001.
2. Zeng L., Chen Y. Measurement point layout strategy of free-form surface based on gridding using coordinate measuring machine // *International Journal of Metrology and Quality Engineering*. 2023. Vol. 14. No. 7. Pp. 1–15. DOI: 10.1051/ijmqe/2023008.
3. Magdziak M. Determining the strategy of contact measurements based on results of noncontact coordinate measurements // *Procedia Manufacturing*. 2020. Vol. 51. Pp. 337–344. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.10.048.
4. Pedone P., Romano D. Designing small samples for form error estimation with coordinate measuring machines // *Precision Engineering*. 2011. Vol. 35. Pp. 262–270. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2010.10.002.
5. Raghunandan R., Rao P.V. Selection of sampling points for accurate evaluation of flatness error using coordinate measuring machine // *Journal of Materials Processing Technology*. 2008. Vol. 202. Pp. 240–245. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.09.066.
6. Poniatowska M. Optimizing sampling parameters of CMM data acquisition for machining error correction of freeform surfaces // *Acta Mechanica et Automatica*. 2018. Vol. 12. No. 4. Pp. 265–269. DOI: 10.2478/ama-2018-0040.
7. Chan F.M.M., King T.G., Stout K.J. The influence of sampling strategy on a circular feature in coordinate measurements // *Measurement*. 1996. Vol. 19. No. 2. Pp. 73–81. DOI: 10.1016/S0263-2241(96)00067-X.
8. Shen Y., Ren J., Huang N., Zhang Y., Zhang X., Zhu L. Surface form inspection with contact coordinate measurement: a review // *International Journal of Extreme Manufacturing*. 2023. Vol. 5. No. 5. Pp. 1–29. DOI: 10.1088/2631-7990/acc76e.
9. Lee G., Mou J., Shen Y. Sampling strategy design for dimensional measurement of geometric features using coordinate measuring machine // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 1997. Vol. 37. Issue 7. Pp. 917–934. DOI: 10.1016/S0890-6955(96)00096-X.
10. Colosimo B.M., Moya E.G., Moroni G., Petro S. Statistical Sampling Strategies for Geometric Tolerance Inspection by CMM // *Economic Quality Control*. 2008. Vol. 23. No. 1. Pp. 109–121. DOI: 10.1515/EQC.2008.109.
11. Colosimo B.M. Geometric Tolerances: Impact on Product Design, Quality Inspection and Statistical Process Monitoring. London, 2011. 336 p. DOI: 10.1007/978-1-84996-311-4.
12. Raghunandan R., Rao P.V. Selection of an optimum sample size for flatness error estimation while using coordinate measuring machine // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2007. Vol.47. Pp. 477–482. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.06.008.
13. Magdziak M. Estimating time of coordinate measurements based on the adopted measurement strategy // *Sensors*. 2022. Vol. 22. Iss. 19. ID 7310. Pp. 1–16. DOI: 10.3390/s22197310.
14. Kim W.-S., Raman S. On the selection of flatness measurement points in coordinate measuring machine inspection // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2000. Vol. 40 Pp. 427–443. DOI: 10.1016/S0890-6955(99)00059-0.
15. Woo T.C., Liang R. Dimensional measurement of surfaces and their sampling // *Computer-Aided Design*. 1993. Vol. 25. Issue 4. Pp. 233–239. DOI: 10.1016/0010-4485(93)90054-R.
16. Rajamohan G., Shunmugam M.S., Samuel G.L. Practical Measurement Strategies for Verification of Freeform Surfaces Using Coordinate Measuring Machines // *Metrology and Measurement Systems*. 2011. Vol. 18. No. 2. Pp. 209–222. DOI: 10.2478/v10178-011-0004-y.
17. He G., Sang Y., Pang K., Sun G. An improved adaptive sampling strategy for freeform surface inspection on CMM // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. Vol. 96. Pp. 1521–1535. DOI: 10.1007/s00170-018-1612-y.
18. Lalehpour A., Berry C., Barari A. Adaptive data reduction with neighborhood search approach in coordinate measurement of planar surfaces // *Journal of Manufacturing Systems*. 2017. Vol. 45. Pp. 28–47. DOI: 10.1016/j.jmsy.2017.07.001.
19. Edgeworth R., Wilhelm R.G. Adaptive sampling for coordinate metrology // *Precision Engineering*. 1999. Vol. 23. Pp. 144–154. DOI: 10.1016/S0141-6359(99)00004-5.
20. Ascione R., Moroni G., Polini W., Romano D. Adaptive inspection plans in coordinate metrology based on Gaussian Process models // *Procedia CIRP*. 2013. Vol. 10. Pp. 148–154. DOI: 10.1016/j.procir.2013.08.025.



21. Ganesh S.H., Samuel G.L. A novel approach for estimation of profile deviation based on poles and pole circles for the inspection of 2D free-form profiles // *Computer-Aided Design*. 2023. Vol. 156. ID 103460. Pp. 1–25. DOI: 10.1016/j.cad.2022.103460.

22. Zhang B., Feng P., Sun Zh., Cheng Xi, Zeng L., Fan Ch.R. Efficient sampling method based on co-kriging for free-form surface measurement // *Precision Engineering*. 2023. Vol. 84. Pp. 136–147. DOI: j.precisioneng.2023.08.005.

23. Chen Ch., Jia H., Lu Y., Zhang X., Chen H., Yu L. An adaptive hybrid sampling method for free-form surfaces based on geodesic distance // *Sensors*. 2023. Vol. 23. Iss. 6. ID 3224. Pp. 1–19. DOI: 10.3390/s23063224.

24. Mian S.H., Al-Ahmari A., Alkhalefah H. Analysis and Realization of Sampling Strategy in Coordinate Metrology // *Mathematical Problems in Engineering*. 2019. Vol. 2019. ID 9574153. Pp. 1–19. DOI: 10.1155/2019/9574153.

25. Collins C.E., Fay E.B., Aguirre-Cruz J.A., Raman S. Alternate methods for sampling in coordinate metrology // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 2007. Vol. 221. Part B: Journal of Engineering Manufacture. Pp. 1041–1052. DOI: 10.1243/09544054JEM734.

26. Rajamohan G., Shunmugam M.S., Samuel G.L. Effect of probe size and measurement strategies on assessment of freeform profile deviations using coordinate measuring machine // *Measurement*. 2011. Vol. 44. Pp. 832–841. DOI: 10.1016/j.measurement.2011.01.020.

#### Информация об авторах

**Каменев Сергей Владимирович**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения, металлообрабатывающих станков и комплексов. E-mail: kamenev\_sergey@mail.ru. Оренбургский государственный университет. Россия, 460018, Оренбург, просп. Победы, д. 13.

**Марусич Константин Викторович**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения, металлообрабатывающих станков и комплексов. E-mail: mkv82@mail.ru. Оренбургский государственный университет. Россия, 460018, Оренбург, просп. Победы, д. 13.

Поступила 05.08.2024 г.

© Каменев С.В., Марусич К.В., 2025

**Kamenev S.V., \*Marusich K.V.**

*Orenburg State University*

*\*E-mail: mkv82@mail.ru*

## THE IMPACT OF POINT SAMPLING STRATEGIES ON ACCURACY OF COORDINATE MEASUREMENTS OF FLATNESS DEVIATION

**Abstract.** *The modern mechanical engineering is featured by continuous increasing of requirements for manufactured components. In this context, the most important index of component's quality is the geometric accuracy of their dimensions and shape. At the present stage of manufacturing development, the coordinate metrology seems to be the most versatile and reliable tool to control geometric accuracy of components. The basis of coordinate metrology is the various types of coordinate measuring machines (CMM) used to perform coordinate measurements. However, the performance and reliability of these measurements depend on the correctness of selected measuring strategy. The choice of a correct measuring strategy to provide reasonable balance between accuracy and performance of measurements is the technological problem with no unequivocal solution. In practice, the specified problem is solved with the search of point sampling strategy that suits to estimate the investigated geometry parameter of part with enough accuracy and minimal duration of the measurement. As a rule, this search is produced within the several popular sampling strategies on the basis of CMM operator experience and his individual preferences, what does not ensure the reliable results obtained. The presented article allows facilitating this search, what is based on efficiency analysis for some point sampling strategies relating to the estimation of surface flatness deviation. The data provided in the article allow estimating the influence of sampling size and pattern to the accuracy of deviation evaluation. Additionally, the article considers the problems that regard the selection of optimal movement trajectory for measuring probe under use of various sampling strategies. In this framework, the general conclusions about their efficiency are formulated.*

**Keywords:** *coordinate measurements, coordinate-measuring machine, geometric accuracy, point sampling strategy, flatness deviation*

## REFERENCES

1. Mian S.H., Al-Ahmari A. New developments in coordinate measuring machines for manufacturing industries. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*. 2014. Vol. 5. Pp. 101–101-p10. DOI: 10.1051/ijmqe/2014001.
2. Zeng L., Chen Y. Measurement point layout strategy of free-form surface based on gridding using coordinate measuring machine. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*. 2023. Vol. 14. No. 7. Pp. 1–15. DOI: 10.1051/ijmqe/2023008.
3. Magdziak M. Determining the strategy of contact measurements based on results of noncontact coordinate measurements. *Procedia Manufacturing*. 2020. Vol. 51. Pp. 337–344. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.10.048.
4. Pedone P., Romano D. Designing small samples for form error estimation with coordinate measuring machines. *Precision Engineering*. 2011. Vol. 35. Pp. 262–270. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2010.10.002.
5. Raghunandan R., Rao P.V. Selection of sampling points for accurate evaluation of flatness error using coordinate measuring machine. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008. Vol. 202. Pp. 240–245. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.09.066.
6. Poniatowska M. Optimizing sampling parameters of CMM data acquisition for machining error correction of freeform surfaces. *Acta Mechanica et Automatica*. 2018. Vol. 12. No. 4. Pp. 265–269. DOI: 10.2478/ama-2018-0040.
7. Chan F.M.M., King T.G., Stout K.J. The influence of sampling strategy on a circular feature in coordinate measurements. *Measurement*. 1996. Vol. 19. No. 2. Pp. 73–81. DOI: 10.1016/S0263-2241(96)00067-X.
8. Shen Y., Ren J., Huang N., Zhang Y., Zhang X., Zhu L. Surface form inspection with contact coordinate measurement: a review. *International Journal of Extreme Manufacturing*. 2023. Vol. 5. No. 5. Pp. 1–29. DOI: 10.1088/2631-7990/acc76e.
9. Lee G., Mou J., Shen Y. Sampling strategy design for dimensional measurement of geometric features using coordinate measuring machine. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 1997. Vol. 37. Issue 7. Pp. 917–934. DOI: 10.1016/S0890-6955(96)00096-X.
10. Colosimo B.M., Moya E.G., Moroni G., Petro S. Statistical Sampling Strategies for Geometric Tolerance Inspection by CMM. *Economic Quality Control*. 2008. Vol. 23. No. 1. Pp. 109–121. DOI: 10.1515/EQC.2008.109.
11. Colosimo B.M. *Geometric Tolerances: Impact on Product Design, Quality Inspection and Statistical Process Monitoring*. London, 2011. 336 p. DOI: 10.1007/978-1-84996-311-4.
12. Raghunandan R., Rao P.V. Selection of an optimum sample size for flatness error estimation while using coordinate measuring machine. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2007. Vol. 47. Pp. 477–482. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.06.008.
13. Magdziak M. Estimating time of coordinate measurements based on the adopted measurement strategy. *Sensors*. 2022. Vol. 22. Iss. 19. ID 7310. Pp. 1–16. DOI: 10.3390/s22197310.
14. Kim W.-S., Raman S. On the selection of flatness measurement points in coordinate measuring machine inspection. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2000. Vol. 40. Pp. 427–443. DOI: 10.1016/S0890-6955(99)00059-0.
15. Woo T.C., Liang R. Dimensional measurement of surfaces and their sampling. *Computer-Aided Design*. 1993. Vol. 25. Issue 4. Pp. 233–239. DOI: 10.1016/0010-4485(93)90054-R.
16. Rajamohan G., Shunmugam M.S., Samuel G.L. Practical Measurement Strategies for Verification of Freeform Surfaces Using Coordinate Measuring Machines. *Metrology and Measurement Systems*. 2011. Vol. 18I. No. 2. Pp. 209–222. DOI: 10.2478/v10178-011-0004-y.
17. He G., Sang Y., Pang K., Sun G. An improved adaptive sampling strategy for freeform surface inspection on CMM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. Vol. 96. Pp. 1521–1535. DOI: 10.1007/s00170-018-1612-y.
18. Lalehpour A., Berry C., Barari A. Adaptive data reduction with neighborhood search approach in coordinate measurement of planar surfaces. *Journal of Manufacturing Systems*. 2017. Vol. 45. Pp. 28–47. DOI: 10.1016/j.jmsy.2017.07.001.
19. Edgeworth R., Wilhelm R.G. Adaptive sampling for coordinate metrology. *Precision Engineering*. 1999. Vol. 23. Pp. 144–154. DOI: 10.1016/S0141-6359(99)00004-5.
20. Ascione R., Moroni G., Polini W., Romano D. Adaptive inspection plans in coordinate metrology based on Gaussian Process models. *Procedia CIRP*. 2013. Vol. 10. Pp. 148–154. DOI: 10.1016/j.procir.2013.08.025.
21. Ganesh S.H., Samuel G.L. A novel approach for estimation of profile deviation based on poles and pole circles for the inspection of 2D freeform profiles. *Computer-Aided Design*. 2023. Vol. 156. ID 103460. Pp. 1–25. DOI: 10.1016/j.cad.2022.103460.
22. Zhang B., Feng P., Sun Zh., Cheng Xi, Zeng L., Fan Ch.R. Efficient sampling method based on co-kriging for free-form surface measurement. *Precision Engineering*. 2023. Vol. 84. Pp. 136–147. DOI: j.precisioneng.2023.08.005.

23. Chen Ch., Jia H., Lu Y., Zhang X., Chen H., Yu L. An adaptive hybrid sampling method for free-form surfaces based on geodesic distance. *Sensors*. 2023. Vol. 23. Iss. 6. ID 3224. Pp. 1–19. DOI: 10.3390/s23063224.

24. Mian S.H., Al-Ahmari A., Alkhalefah H. Analysis and Realization of Sampling Strategy in Coordinate Metrology. *Mathematical Problems in Engineering*. 2019. Vol. 2019. ID 9574153. Pp. 1–19. DOI: 10.1155/2019/9574153.

25. Collins C.E., Fay E.B., Aguirre-Cruz J.A., Raman S. Alternate methods for sampling in coordinate metrology. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 2007. Vol. 221. Part B: Journal of Engineering Manufacture. Pp. 1041–1052. DOI: 10.1243/09544054JEM734.

26. Rajamohan G., Shunmugam M.S., Samuel G.L. Effect of probe size and measurement strategies on assessment of freeform profile deviations using coordinate measuring machine. *Measurement*. 2011. Vol. 44. Pp. 832–841. DOI: 10.1016/j.measurement.2011.01.020

*Information about the authors*

**Kamenev, Sergey V.** PhD. E-mail: kamenev\_sergey@mail.ru. Orenburg State University. Russia, 460018, Orenburg, Prospect Pobedy, 13.

**Marusich, Konstantin V.** PhD. E-mail: mkv82@mail.ru. Orenburg State University. Russia, 460018, Orenburg, Prospect Pobedy, 13.

---

*Received 05.08.2024*

**Для цитирования:**

Каменев С.В., Марусич К.В. Влияние стратегии выборки точек на точность координатных измерений отклонения от плоскостности // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 2. С. 106–116. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-106-116

**For citation:**

Kamenev S.V., Marusich K.V. The impact of point sampling strategies on accuracy of coordinate measurements of flatness deviation. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2025. No. 2. Pp. 106–116. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-106-116