

## Секция 4

# СТАНДАРТИЗАЦИЯ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 658.516

## АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ ВЫПОЛНЕНИЯ КООРДИНАТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ «НЕПОЛНЫХ» ПОВЕРХНОСТЕЙ

аспирант О.А. Кротова

Белорусский национальный технический университет

При решении комплекса измерительных задач мы достаточно часто сталкиваемся с поверхностями второго порядка, имеющими элементы прерывания. Например, шлицевый вал или канавка подшипника. Возникает вопрос: одинаковы ли эти поверхности с точки зрения задач контроля? Традиционно рекомендуется располагать контрольные точки равномерно по контролируемой поверхности. В случае со шлицевым валом это условие выполняется и, следовательно, можно использовать известные методики контроля, но нарушается при контроле канавок подшипника. Таким образом, данные поверхности не относятся к одной группе с точки зрения контроля размеров, формы или расположения. Под «неполными» поверхностями автор понимает поверхности, при измерении которых невозможно равномерное расположение контрольных точек на профиле.

Рассмотрим следующую классификационную схему [1], для чего используем «коэффициент целостности» ( $\xi$ ), который рассчитывается как отношение углового диапазона измеряемой поверхности к угловому диапазону полной окружности, т.е.

$$\xi = \frac{\alpha_i}{360^\circ}.$$

Такие поверхности второго порядка, как конус, цилиндр и сфера, наиболее часто встречаются на предприятиях машино- и приборостроения, поэтому более подробно были рассмотрены методики и средства, используемые для их измерений. Было выявлено, что: во-первых, среди рассмотренных методик нет специальных методик для «неполных» поверхностей;

во-вторых, данные методики выполнения координатных измерений имеют общую черту: все они могут быть реализованы через определение радиуса и центра окружности (табл.1).

При рассмотрении реальных объектов ось заменяется центром сечения, а поверхность – набором поперечных сечений, ряд из которых анализируется. Анализ поперечного сечения связан с построением базовой окружности в соответствии с требованиями стандартов. Стандарты различных стран предлагают в качестве баз использовать различные окружности. В настоящее время используют три варианта: описанная, вписанная и средняя окружность.

Определение радиуса поперечного сечения и положения центра на координатно-измерительных приборах, как правило, осуществляется с использованием дискретной модели, построенной по отдельным точкам. При этом реальный профиль воспроизводится с потерей некоторой информации о реальной детали, причем уровень искажения результатов зависит от числа контрольных точек, их расположения и формы контролируемого объекта.

Таким образом, эффективность координатных измерений определяется выбором минимально необходимого количества точек.

Рекомендации, связанные с выбором числа контрольных точек, противоречивы: по данным Московского НИИ измерений, для определения центра необходимо произвести не менее двенадцати измерений в точках, равномерно расположенных по профилю; фирма DEA (Италия) считает достаточным провести измерения в шести точках; фирма «Carl Zeiss» – в четырех.

Известна методика определения необходимого числа измерений при контроле отклонения от круглости при равномерном распределении точек по профилю окружности. Используется следующая зависимость:

$$n = \frac{1}{2} \frac{\pi P}{\arccos(1 - \delta)},$$

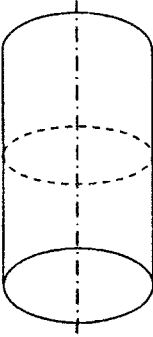
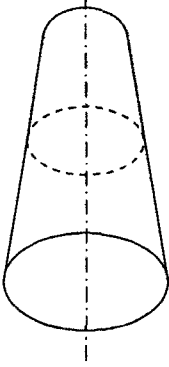
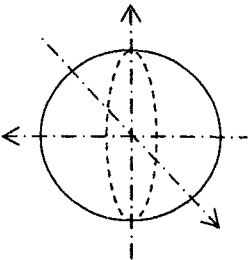
где  $\delta$  – допустимое значение относительной погрешности;

$P$  – уровень доверительной вероятности;

$n$  – необходимое число измерений.

Наиболее общим решением задачи контроля геометрических параметров окружности по результатам координатных измерений ограниченного числа контрольных точек является следующая зависимость:

## Характерные особенности контроля поверхностей второго порядка

№	Контролируемая поверхность	Графическое изображение	Контролируемые параметры отклонения расположения	
			Контролируемые формы	отклонения расположения
1	Цилиндр		<p>Поперечное сечение – окружность;</p> <p>Продольное сечение – <math>n</math>-окружностей</p>	<p>Положение центров <math>n</math>-окружностей – характеристика положения оси</p>
2	Конус		<p>Поперечное сечение – окружность;</p> <p>Продольное сечение – <math>n</math>-окружностей</p>	<p>Положение центров <math>n</math>-окружностей – характеристика положения оси</p>
3	Сфера		<p>Поперечное и продольное сечения – <math>n</math>-«неполных» окружностей</p>	<p>Положение центров <math>n</math>-«неполных» окружностей – характеристика положения оси</p>

$$n = \frac{\ln(1 - \sqrt{P})}{\ln\left(1 - \frac{1}{\pi} \arccos(1 - [\delta])\right)} + 1.$$

Была оценена возможность применения данной методики для поверхностей, представленных ограниченными участками окружности.

Экспериментальные исследования проводились на координатно-измерительной машине (КИМ) Contura 700 Standard. Диапазон измерения по координатным осям: ось  $X$  – 700 мм, ось  $Y$  – 1000 мм, ось  $Z$  – 600 мм. Допускаемая погрешность измерения –  $2,5 + L/250$  (в микрометрах). Действительная инструментальная погрешность – 2,04 мкм (на длине до 100 мм).

Алгоритм проведения эксперимента следующий:

1. Определяем значение относительной погрешности  $\delta$ . Для этого необходимо знать допуск на контролируемый параметр и значение инструментальной погрешности выбранного СИ. Значение инструментальной погрешности – 2,04 мкм (на длине до 100 мм). Требования технической документации – 120H8 ( $IT = 0,063$  мм). Значение вероятности прием равным 0,95. Относительная методическая погрешность не более 0,4.

2. Минимально необходимое количество контрольных точек  $n = 12$ .

3. Создаем базовую систему (рис.1). Система координат детали определяется оператором и является базовой координатной системой для данного плана контроля. Базовая система представляет собой систему координат детали, которая определяет положение детали на КИМ. Для этого система координат должна быть определена по всем шести степеням свободы (три вращательных и три поступательных). Система координат детали имеет пять опорных элементов: первичный опорный элемент (контролирует две из трех степеней свободы вращения), вторичный опорный элемент (контролирует третью степень свободы вращения), три третичных опорных элемента (контролируют три линейные степени свободы, это нулевые точки по осям  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ ).

4. Определяем куб безопасности (рис. 2). Плоскости безопасности обеспечивают для измерительных машин с возможностью выполнения режимам CNC перемещение щуповой конфигурации вокруг детали без столкновения. Плоскости безопасности совместно образуют параллелепипед безопасности, который выполняет





функцию своеобразной защитной «упаковки» вокруг детали и устройства ее крепления и защищает шуповую конфигурацию от столкновений.

5. Разрабатываем программу измерения. Программа измерения («план прогона») включает следующие действия:

- определение измеряемых элементов (рис.3). В качестве измеряемого элемента понимается элемент правильной геометрии, который должен быть зарегистрирован КИМ. Измеряемые элементы имеют заданную геометрию, на основе которой проводится оценка их размеров, формы и положения. Для этого измеряемые элементы соединяются с контролируруемыми параметрами. Измеряемые элементы определяются в так называемых формулярах, которые содержат заданные и действительные значения, а также различные возможности обработки;

- определение стратегии измерения (рис.4). Понятием «стратегия измерения» обозначены все элементы, которые определяются дополнительно, чтобы при согласованном функционировании Sa-lupso и КИМ достигнуть оптимального результата измерения (вытекают из особенностей процесса измерений или материала, или из других специальных требований);

- определение контролируемых параметров. Контролируемые параметры подразделяются на три группы (табл. 2).

Таблица 2

Группы контролируемых параметров

Группа	Плотность точек	Комментарий
Контроль размера	Низкая	Как правило, эти контролируемые параметры оцениваются при малом числе измеряемых точек. Рекомендуется оцупать в измеряемом элементе больше точек, чем минимально необходимо, чтобы получить оценку стандартного отклонения
Контроль положения	Средняя	Эти контролируемые параметры требуют более высокой плотности точек, так как отклонение положения накладывается на отклонение формы измеряемого элемента
Контроль формы	Высокая	Требуют высокой плотности точек на измеряемой поверхности. При рассмотрении формы также рекомендуется фильтрация низких частот, чтобы минимизировать влияние шероховатости поверхности

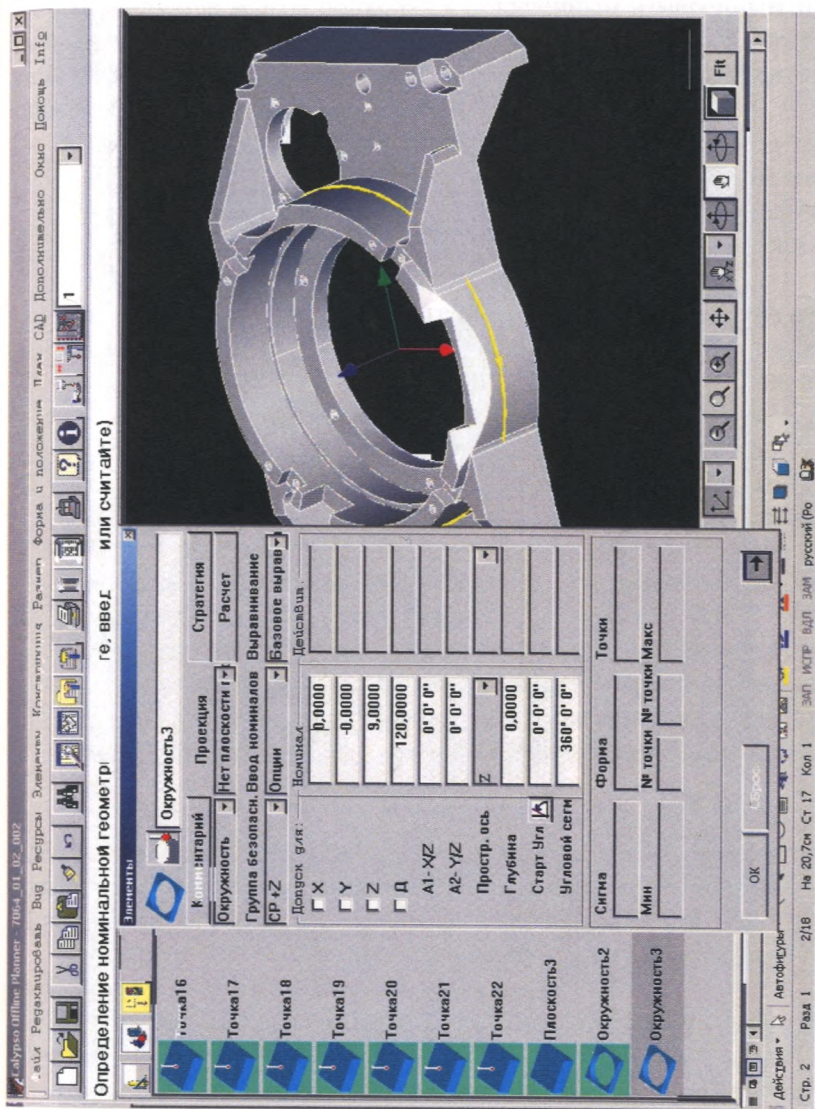


Рис. 3. Определение измеряемого элемента – окружности

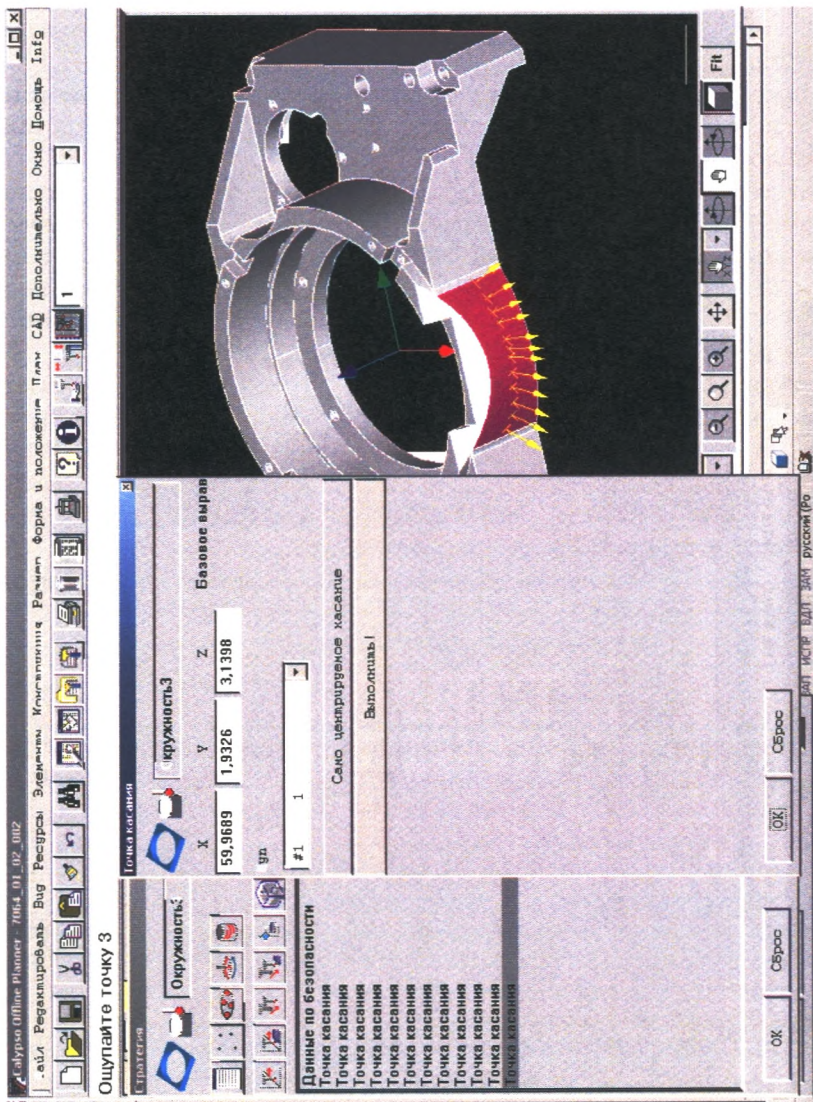


Рис. 4. Стратегия измерения – 12 контрольных точек

Calypso вычисляет «сглаженный элемент» на основе измеренных точек. С математической точки зрения сглаженным элементом здесь является такой, который имеет правильную геометрическую форму и «лучше всего» подходит к полученным измеренным значениям. Определение сглаженного элемента является целью проводимой обработки результатов измерений. Предлагаются следующие способы сглаживания (рис.5):

- по Гауссу. Рассчитывается минимум суммы квадратов отклонений между рассчитанным (идеальным) контуром и фактически ошупанным контуром. Таким образом, сглаживание по Гауссу нечувствительно к резко выпадающим значениям и приводит к однозначному результату;
- по Чебышеву. Определяет геометрический элемент путем минимизации максимального отклонения рассчитанного контура от фактически ошупанного контура. Экстремальные значения в значительной степени определяют результат расчета;
- расчет вписанного или соответственно описанного элемента. Описанный элемент формируется таким образом, чтобы ни одна точка касания не лежала вне элемента. Вписанный элемент выбирается так, чтобы ни одна из точек касания не лежала внутри элемента. Вписанный / описанный элемент формируется на основе экстремальных значений;
- расчет касательного элемента (вне/внутри). Касательным является самый большой элемент, вне которого не лежит ни одна из точек касания, или соответственно минимальный элемент, внутри которого нет ни одной из точек касания элемента.

6. Проводим измерения в 12 точках, изменяя угловой диапазон рабочей поверхности от 30 до 300°. Повторяем измерения по 5 раз для каждого углового диапазона (для исключения явных промахов). Полученные значения представлены в табл.3.

7. Определяем действительное значение радиуса контролируемой окружности путем сканирования:  $X_{\text{скан}} = 119,989$ .

8. Рассчитываем действительное значение относительной методической погрешности  $\delta^*$  для каждого углового диапазона (табл.4).

9. Для определения границ работоспособности рассматриваемой методики необходимо полученные значения  $\delta^*$  сравнить с допускаемым значением  $\delta$ . Для диапазона  $\delta^* \leq \delta$  методика признается работоспособной (рис.6).

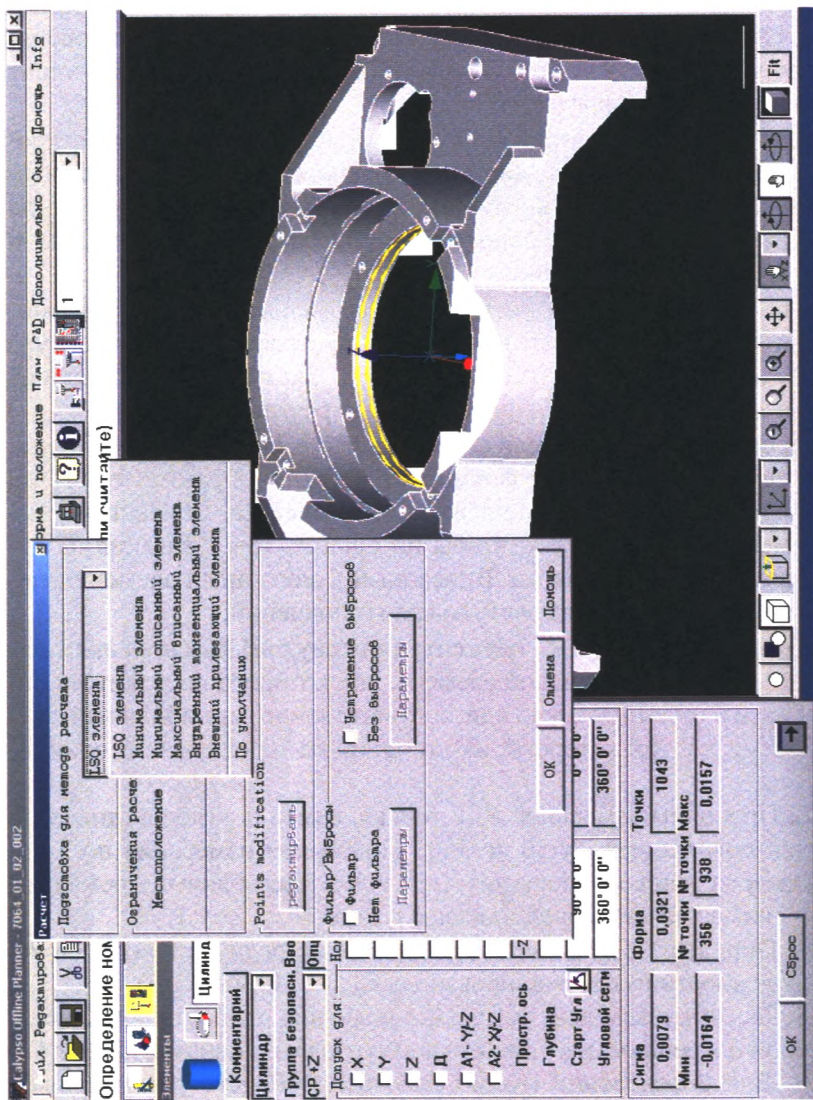


Рис. 5. Контекстное меню для выбора способа сглаживания

Таблица 3

Текущие значения контролируемого параметра

№	Угловой диапазон	$X_i$ (по Гауссу)	$X_{i \max}$	$X_{i \min}$
1	2	3	4	5
1	30°	120,226	120,228	120,224
2		120,047	120,050	120,044
3		120,313	120,314	120,312
4		119,796	119,802	119,791
5		119,733	119,837	119,829
6	60°	120,087	120,088	120,086
7		120,176	120,177	120,175
8		119,924	119,926	119,922
9		119,726	119,729	119,723
10		120,035	120,039	120,029
11	90°	120,116	120,118	120,414
12		119,861	119,863	119,859
13		120,168	120,171	120,166
14		119,898	119,901	119,894
15		119,954	119,956	119,951
16	120°	120,276	120,279	120,273
17		120,022	120,027	120,017
18		119,869	119,871	119,866
19		120,054	120,056	120,052
20		120,036	120,038	120,034
21	150°	119,978	119,979	119,976
22		120,281	120,283	120,279
23		120,066	120,068	120,063
24		120,058	120,060	120,057
25		120,005	120,007	120,002
26	180°	119,994	119,997	119,991
27		120,024	120,027	120,020
28		120,015	120,018	120,013
29		120,028	120,029	120,056
30		119,995	119,997	119,994

Окончание таблицы 3

1	2	3	4	5
31	210°	119,995	119,997	119,994
32		120,001	120,002	120,001
33		120,007	120,013	120,001
34		120,012	120,013	120,010
35		119,997	120,000	119,997
36	240°	119,999	120,000	119,998
37		119,999	120,000	119,999
38		120,031	120,032	120,029
39		119,991	119,991	119,990
40		119,991	120,010	119,991
41	270°	120,010	120,002	120,010
42		120,002	120,002	120,002
43		120,020	120,021	120,019
44		119,990	119,990	119,989
45		119,989	119,990	119,988
46	300°	120,011	120,012	120,011
47		120,001	120,002	120,000
48		120,006	120,007	120,005
49		119,990	119,991	119,989
50		119,989	119,991	119,988

Таблица 4

Действительные значения относительной методической погрешности

№	Угловой диапазон	$\delta_{\max}$	$\delta_{\min}$	$\delta_{\text{диск}}$	$\delta^*$
1	30°	3,064	3,074	3,083	5,324
2	60°	2,098	2,091	2,085	3,622
3	90°	1,768	1,782	1,795	3,086
4	120°	1,783	1,752	1,722	3,036
5	150°	1,497	1,475	1,452	2,554
6	180°	0,393	0,353	0,313	0,614
7	210°	0,252	0,217	0,183	0,378
8	240°	0,221	0,211	0,200	0,365
9	270°	0,212	0,211	0,203	0,366
10	300°	0,180	0,167	0,158	0,293

Автором предлагается методика [2], основанная на использовании рядов Фурье. Для данной методики (методика №2) минимально необходимое количество контрольных точек определяется требуемой точностью, угловым шагом и заданной вероятностью.

Алгоритм осуществления эксперимента следующий:

1. Определяем значение относительной погрешности  $\delta$ . Для этого необходимо знать допуск на контролируемый параметр и значение инструментальной погрешности выбранного СИ. Значение инструментальной погрешности – 2,04 мкм (на длине до 100 мм). Требования технической документации – 95,4<sub>-0,1</sub>. Значение вероятности примем равным 0,95. Относительная методическая погрешность не более 0,6.

2. Рассчитаем минимально необходимое количество контрольных точек

$$n = 1 + \frac{360}{10} \left[ 1 - \frac{2}{3,14 \cdot 0,95} \arccos(1 - 0,6) \right] = 9$$

3. Создаем базовую систему, определяем куб безопасности и разрабатываем программу измерений.

4. Проводим измерения в 9 точках, изменяя угловой диапазон рабочей поверхности от 30 до 300° (рис.6). Повторяем измерения по 4 раза для каждого углового диапазона (для исключения явных промахов). Полученные значения представлены в табл.5.

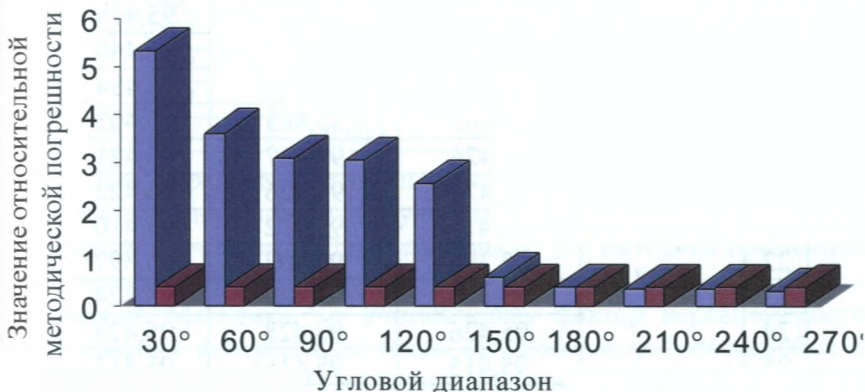


Рис.6. Зависимость действительной относительной методической погрешности от углового диапазона (методика №1)

5. Определяем действительное значение радиуса контролируемой окружности путем сканирования:  $X_{\text{скан}} = 95,406$ .

6. Рассчитываем действительное значение относительной методической погрешности  $\delta^*$  для каждого углового диапазона (табл.6).

Таблица 5

Текущие значения контролируемого параметра

№	Угловой диапазон	$X_i$ (по Гауссу)	$X_{i \max}$	$X_{i \min}$
1	2	3	4	5
1	30°	95,252	95,254	95,249
2		96,268	95,269	96,266
3		95,883	95,885	95,881
4		96,134	96,136	96,131
5	60°	95,426	95,427	95,425
6		95,331	95,333	95,329
7		95,677	95,679	95,676
8		95,587	95,589	95,582
9	90°	95,453	95,454	95,542
10		95,395	95,398	95,393
11		95,547	95,549	95,543
12		95,452	95,454	95,450
13	120°	95,424	95,425	95,422
14		95,394	95,396	95,392
15		95,477	95,479	95,475
16		95,444	95,446	95,440
17	150°	95,435	95,436	95,434
18		95,403	95,405	95,402
19		95,424	95,427	95,421
20		95,423	95,426	95,422
21	180°	95,411	95,412	95,410
22		95,399	95,402	95,397
23		95,426	95,429	95,424
24		95,426	95,428	95,424
25	210°	95,415	95,416	95,413
26		95,421	95,423	95,414
27		95,421	95,424	95,419
28		95,419	95,421	95,416

1	2	3	4	5
29	240°	95,405	95,407	95,404
30		95,414	95,416	95,412
31		95,416	95,419	95,414
32		95,411	95,414	95,410
33	270°	95,409	95,410	95,408
34		95,414	95,416	95,412
35		95,410	95,413	95,408
36		95,410	95,412	95,408
37	300°	95,406	95,407	95,404
38		95,413	95,416	95,411
39		95,405	95,408	95,403
40		95,406	95,408	95,404

Таблица 6

Действительные значения относительной методической погрешности

№	Угловой диапазон	$\delta_{\max}$	$\delta_{\min}$	$\delta_{\text{диск}}$	$\delta^*$
1	30°	2,782	2,773	2,778	4,812
2	60°	0,689	0,681	0,686	1,187
3	90°	0,311	0,303	0,309	0,534
4	120°	0,181	0,169	0,176	0,304
5	150°	0,092	0,081	0,086	0,150
6	180°	0,071	0,063	0,068	0,117
7	210°	0,078	0,052	0,069	0,117
8	240°	0,044	0,027	0,032	0,062
9	270°	0,038	0,020	0,028	0,052
10	300°	0,023	0,012	0,012	0,029

7. Для определения границ работоспособности рассматриваемой методики необходимо полученные значения  $\delta^*$  сравнить с допустимым значением  $\delta$ . Для диапазона  $\delta^* \leq \delta$  методика признается работоспособной (рис.7).

**Вывод.** Методика, не учитывающая фактор неравномерного расположения контрольных точек на профиле, работоспособна в диапазоне от 200 до 360°; методика, учитывающая фактор неравномерного расположения контрольных точек на профиле, работоспособна в диапазоне от 80 до 360°.

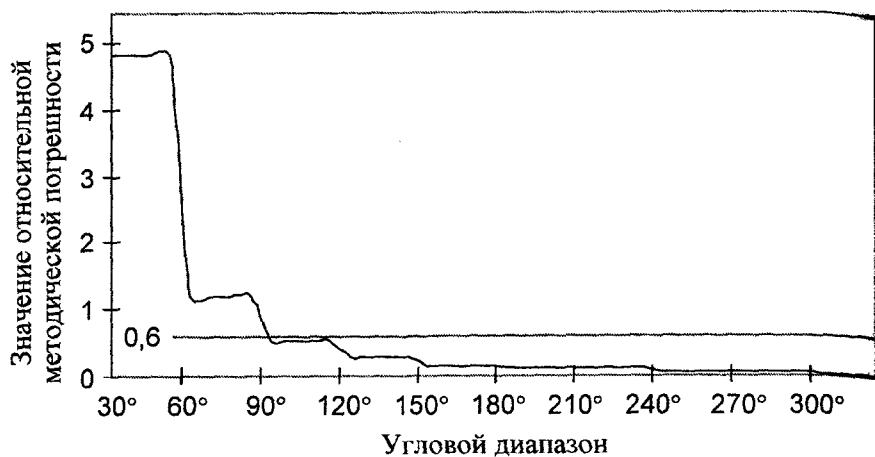


Рис. 7. Зависимость действительной относительной методической погрешности от углового диапазона (методика №2)

#### Использованные источники

1. Соломахо, В.Л., Кротова, О.А. Анализ применимости методик выполнения координатных измерений к сложным поверхностям, имеющим элементы прерывания // Метрология и приборостроение. – 2003. – № 3. – С.26.
2. Соломахо, В.Л., Соколовский, С.С., Кротова, О.А. Особенности координатных измерений сложных поверхностей, представленных ограниченными участками окружности // Вестник БНТУ. – 2003. – № 1. – С.43.