

РАСЧЕТ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

*ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси»
Минск, Беларусь*

В соответствии с требованиями СТБ ИСО МЭК 17025 при измерениях физических величин, и особенно при сертификационных испытаниях и калибровке конечный результат измерения необходимо представлять с расчетом неопределенности измерения.

Результат всякого измерения имеет невысокий уровень доверия, если не указана погрешность, с которой оно выполнено. В технике чаще применяется понятие точности измерений, определяемое как качество измерений и отражающее близость их результатов к истинному значению измеряемой величины, что для большинства традиционных задач является достаточным. В современной высокоточной технике важным является определение неопределенности измерения. Понятие неопределенности в измерениях является наиболее полной и признанной на международном уровне характеристикой точности измерений и является параметром, связанным с результатом измерений, который характеризует разброс значений, которые могут быть обоснованно приписаны измеряемой величине. Таким образом, неопределенность является количественной мерой точности соответствующего результата измерений и выражает степень доверия, с которой допускается, что значение измеренной величины в установленных условиях измерения лежит внутри определенного интервала значений. Неопределенность делает возможным сравнивать результаты измерений одинаковых измеряемых величин между собой или с эталонными значениями, что обеспечивает доверие к результатам измерений с помощью их сравнения и позволяет, например, устанавливать соглашения о взаимном признании результатов измерений.

Процесс оценки измеряемой величины состоит обычно из следующих последовательных этапов:

1. Описание измерения и составление его модели;
2. Оценивание значений и стандартных неопределенностей входных величин;
3. Анализ корреляций;
4. Составление бюджета неопределенности;
5. Расчет оценки выходной величины;
6. Расчет стандартной неопределенности выходной величины;

7. Расчет расширенной неопределенности;
8. Представление конечного результата измерений.

В большинстве случаев измеряемая величина не является прямо измеряемой, а зависит от других измеряемых величин. Так называемые влияющие величины воздействуют на нее и преобразуют ее «истинное» значение в то значение, которое показывает средство измерений.

Если все величины, от которых зависит результат измерений, изменяются, то их неопределенности можно оценить статистическими средствами. На практике неопределенности обычно оценивают, используя математическую модель измерения и закон распределения неопределенности.

Таким образом, измеряемую величину Y можно в общем виде выразить через функциональную зависимость:

$$Y=f(X_{изм}, X_1, X_2, \dots, X_N), \quad (1)$$

где $X_{изм}$ - значение, которое показывает средство измерений; X_i ($i=1, 2, \dots, N$) – входные величины.

Набор входных величин делится на величины, чьи значения и неопределенности определяются непосредственно в текущем измерении и на величины, чьи неопределенности вносятся в измерение из внешних источников.

При составлении математической модели измерения и выявлении необходимых входных величин следует учитывать следующие возможные источники неопределенности:

1.Метод измерения: число наблюдений, длительность измерения, методика измерения, эталоны или средства измерений.

2.Измерительное оборудование: неопределенность калибровки, вариация показаний, чувствительность или разрешающая способность.

3.Измеряемый объект: его температура, состояние поверхности с которой снимаются показания, геометрические размеры.

4.Окружающая среда: температура, влажность, давление, магнитные и электрические поля, уровень вибрации, освещенность.

5.Оператор: опыт, измерительное усилие, образование и т.д.

В зависимости от вида испытаний могут возникнуть и другие источники неопределенности.

Для каждой величины, входящей в уравнение (1) необходимо определить оценку и стандартную неопределенность. Так как все входные величины являются случайными непрерывными величинами их оценками являются их математические ожидания. Стандартными неопределенностями $u(x_i)$ входных величин X_i будут их стандартные отклонения, рассчитанные как положительный корень квадратный из дисперсии. Суммарную стандартную неопределенность получают из значений влияющих величин как положительный квадратный корень суммы членов, причем члены являются дисперсиями или ковариациями

этих других величин, взвешенными в соответствии с тем, как результат измерений изменяется в зависимости от изменения этих величин.

Оценку каждой входной величины X_i и связанную с ней стандартную неопределенность $u(x_i)$ получают из распределения вероятностей этой величины. В зависимости от вида имеющихся знаний о величине распределение вероятностей может быть распределением частот, то есть основанным на статистических данных или оно может быть априорным распределением, основанным на любой не статистической информации. На практике распределения вероятностей описываются с помощью функции распределения или функции плотности вероятности, которые чаще называют законами распределения случайных величин (закон Гаусса, прямоугольный, треугольный и т. д.). В зависимости от вида закона распределения вероятностей величины получают необходимые математические ожидания и стандартные отклонения величины.

По типу имеющейся информации о величине (статистической или нестатистической) основано деление способов оценивания стандартных неопределенностей: оценивание по типу А и оценивание по типу В. Оценивание по типу А осуществляют путем статистического анализа серий наблюдений и значения стандартных неопределенностей получают из функции плотности вероятности, полученной из наблюдаемого распределения частот путем расчета стандартного отклонения и среднего значения в серии наблюдений. Используется и метод наименьших квадратов для подбора кривой к данным и получения соответствующих оценок параметров аппроксимации и их стандартных отклонений или же проводится дисперсионный анализ для определения значений отдельных случайных эффектов в измерениях.

При оценивании по типу В значения стандартных неопределенностей получают из априорной информации, то есть предполагаемой функции плотности вероятностей, основанной на данных предварительных измерений, опыте или знаниях о свойствах материалов и приборов, которые приводятся в свидетельствах о калибровке, сертификатах или справочниках.

Следует отметить, что стандартная неопределенность, связанная с оценкой измеряемой величины, имеет такую же размерность, как и само значение оценки.

Примеры по использованию того или иного закона распределения, а также по оценке необходимых параметров распределений в зависимости от имеющейся информации о входной величине приведены в ряде источников [1,2], но по умолчанию или при отсутствии любой другой информации принимают прямоугольное распределение. Расчет суммарной стандартной неопределенности для случая независимых и коррелированных входных величин также отличается и это следует учитывать в каждом конкретном случае. Важным этапом расчета неопределенности является определение коэффициентов чувствительности c_i , показывающих, как выходная оценка изменяется с изменением

значений входных оценок. Подробно эти вопросы рассмотрены, например в [2-5].

Для обобщения полученной информации в количественной форме о входных величинах составляют бюджет неопределенности. Бюджет неопределенности также используется для анализа вкладов $u_i(y)$ от каждого источника неопределенности в суммарную неопределенность с целью определения точности измерительного процесса, корректировки модели измерения, а также поиска способов уменьшения влияния некоторых источников неопределенности.

В ряде случаев производится расчет расширенной неопределенности U , т.е. величины, определяющей интервал вокруг результата измерений, в пределах которого находится большая часть распределения значений.

Расширенную неопределенность U получают путем умножения стандартной неопределенности выходной величины $u(y)$ на коэффициент охвата k :

$$U = k * u(y), \quad (2)$$

Значение коэффициента охвата k выбирается на основе уровня доверия p , для чего необходимо полное знание о распределении вероятностей значений выходной величины, характеризуемого оценкой выходной величины и ее стандартной неопределенностью. Например, распределение вероятностей выходной величины принимают нормальным когда оценку измеряемой величины получают из оценок значительного числа ($N \geq 3$) входных величин, которые описываются нормальным или прямоугольным распределениями, а также когда стандартные неопределенности этих оценок дают сопоставимые вклады в суммарную неопределенность, связанную с оценкой выходной величины. В таких случаях для расчета расширенной неопределенности, которая обеспечивает уровень доверия p , можно использовать квантили нормального закона распределения [2,4].

Рассмотрим примеры расчета неопределенности измерения, выполненные в испытательном центре ГНУ ФТИ НАН Беларуси при испытаниях токарных резцов.

Измерительная задача: измерить твердость опорной поверхности державки токарного резца, изготовленной из стали 50 ГОСТ1050-74. Метод измерения: непосредственное измерение на твердомере ТК-2М.

Математическая модель измерения: $T_d = T_u + \delta T_u + \delta T_{mt}$, где T_u - измеренное значение твердости по прибору, δT_u - погрешность прибора, δT_{mt} - погрешность образцовой меры твердости МТР №5978.

Выполнено 10 измерений твердости опорной поверхности державки и 10 измерений образцовой меры твердости. Измерения на державке дали значения от 40 до 42 HRC с $\bar{T}_d = 40,9$ и $\sigma = 0,738$ HRC. При измерении образцовой меры твердости получены соответственно значения от 44 до 45,

$\bar{T}_m = 44,7$ и $\sigma = 0,350$ HRC. При расчете неопределенности такие влияющие величины как вариации по нагрузке и деформация (износ) индентора в период эксплуатации не учитывались.

Бюджет неопределенности при измерении твердости приведен в таблице 1.

Таблица 1

Входная величина X_i	x_i , HRC	+/-, HRC	Тип неопред.	Тип распределения	$u(x_i)$, HRC	c_i	$u_i(y)$, HRC	Вклад, %
1.Измеренное значение твердости	40,9		A	нормальное	0,233	1	0,233	9,6
2.Погрешность прибора ТК2М (по паспорту)		1,5	B	прямоугольное	0,866	1	0,866	35,7
3.Размах показаний прибора при поверке его по образцовым мерам твердости МТР (по паспорту)		1,5	B	прямоугольное	0,866	1	0,866	35,7
4.Размах значений твердости образцовой меры №5978 (по паспорту)		0,8	B	прямоугольное	0,462	1	0,462	19
5.Наблюдаемая разница между эталонным образцом твердости и показанием прибора(измерение)		1,0	A	Нормальное	0,111	1	0,111	
Определяемое значение твердости	40,9				2,427			

Суммарная стандартная неопределенность, рассчитанная по экспериментальным данным (п.5) равна **1,672 HRC**, а по паспортным данным (п.4) **-2,427 HRC** и использована в дальнейших расчетах.

С учетом стандартной неопределенности результат измерения твердости имеет вид **$T=40,9 + - 2,427 HRC$** , с учетом расширенной неопределенности **$T=40,9 + - 4,854 HRC$** (p_{95}).

Выполнено измерение шероховатости опорной поверхности державки резца. Метод измерения: непосредственное измерение на профилометре мод.250. Математическая модель измерения: **$R_\delta = R_u + \delta R_u + \delta R_m$** , где R_u - измеренное значение шероховатости по прибору, δR_u - погрешность прибора, δR_m - погрешность меры шероховатости из комплекта прибора мод. 250.

Выполнено 10 измерений шероховатости опорной поверхности державки и 10 измерений шероховатости по образцовой мере. Измерения шероховатости державки по параметру R_a имели значения от 1,34 до 1,6 мкм с $\bar{R}_a = 1,47$ и $\sigma = 0,1346$ мкм. При измерении образцовой меры шероховатости получены соответственно значения от 0,58 до 0,64 мкм, $\bar{R}_{a м} = 0,6220$ и $\sigma_m = 0,0472$ мкм. Стандартная неопределенность составила значения 0,0426 и 0,0149 мкм соответственно при измерении на державке и на мере шероховатости.

Бюджет неопределенности измерения шероховатости приведен в таблице 2.

Таблица 2

Входная величина X_i	Значение оценки R_a , мкм	+/- R_a , мкм	Тип неопред.	Тип распределения	$u(x_i)$, мкм	c_i	$u_i(y)$, мкм	Вклад, %
Измеренное значение шероховатости поверхности	1,47		A	нормальное	0,0426	1	0,0426	25,22
Предел основной погрешности профилометра		0,164	B	прямоугольное	0,0947	1	0,0947	56,07
Погрешность эталонной меры шероховатости		0,0547	B	прямоугольное	0,0316	1	0,0316	18,71
Определяемое значение шероховатости	1,47				0,1689			

Предел основной погрешности профилометра **$\delta R_a = 0,02 * R_{a \text{ вн}} + 0,04 * R_w$** , где $R_{a \text{ вн}}$ - верхний предел поддиапазона измерения (5 мкм),

R_a - максимальное измеренное значение шероховатости.

$$\delta R_a = 0,02 * 5 + 0,04 * 1,6 = 0,164 \text{ мкм.}$$

Погрешность эталонной меры шероховатости принимается равной 1/3 основной погрешности профилометра $\delta_s = 0,0547$ мкм, $u_s = \delta_s / \sqrt{3} = 0,0316$ мкм.

Суммарная стандартная неопределенность равна $0,1689$ мкм, расширенная неопределенность $U = 0,3378$ (p_{95}). Значение шероховатости с учетом расширенной неопределенности $R_a = 1,47 \pm 0,3378$ мкм.

Таким образом, приведенные расчеты показывают значительно более высокую надежность результата измерения с расчетом неопределенности измерения в сравнении с традиционным представлением результата с указанием среднего значения величины и погрешности измерительного прибора.

ЛИТЕРАТУРА

1. СТБ ГОСТ Р 50779.10-2001 Статистические методы. Вероятность и основы статистики. Термины и определения. 2. Браули К.А. Статистическая теория и методология в науке и технике. -М., 1977. 3. Захаров И.П., Кукуш В.Д. Теория неопределенностей в измерениях.- Харьков, 2002. 4. Крамер Г. Математические методы статистики. -М., 1948. 5. Зайдель А.Н. Погрешности измерений физических величин.- Л., 1985.

УДК 621.9

Цыганков Л.Е., Туромша В.И.

РАЗВИТИЕ КОНСТРУКЦИЙ ПЛОСКОШЛИФОВАЛЬНЫХ СТАНКОВ

РУПП «Станкозавод «Красный борец»

Орша, Беларусь

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

В настоящее время совершенствование конструкций плоскошлифовальных станков развивается в следующих направлениях:

- повышение точности, производительности и надежности;
- обеспечение автоматической работы станка по циклу, что исключает влияние человеческого фактора на результаты работы;
- обеспечение простоты обслуживания, эксплуатации и управления станком.