

УДК 006.91.001

Х.К. Радев

Технический университет, София, Болгария

## О ПОДХОДАХ К ИЗМЕРЕНИЮ И ЕГО ТОЧНОСТИ

Рассматриваются подходы к измерению и его точности в современной метрологии. На базе сравнительного анализа подходов оценивается их совместимость и область применения. Анализ рассмотренных подходов показывает наличие эволюции в философии измерения. Все подходы используют один и тот же математический аппарат. Нет различия в понимании вероятностного характера измерения. Результат измерения рассматривается как приближение, оценка размера измеряемой величины – как оценка, имеющая свои точностные характеристики.

**Ключевые слова:** измерение, подход, оценка, погрешность, неопределенность измерения.

### Основные положения, некоторые термины и определения

Объекты окружающего мира характеризуются своими свойствами. Для свойств, имеющих качественное выражение, принято наименование “номинальные свойства”, а для свойств, имеющих количественное выражение – наименование “величина”. Количественные свойства (величины) являются объектом измерения.

**Измерение** – это процесс экспериментального получения информации о размере величины.

**Значение величины** – это размер данной величины, выраженный числом и базой для сравнения (reference). [1]

Значение и размер не идентичны. Объекты измерения и их свойства существуют вне и независимо от нашего сознания. Значение величины является только отображением размера величины.

Истинное значение величины – непознаваемое, а полученное при измерении значение есть только приближение, оценка истинного значения.

**Оценка** – это приписанное значение величины. Она является полной только тогда, когда сопровождается информацией о ее качестве, т.е. информацией о ее точности.

**Точность оценки** – близость согласования между приписанным и истинным значениями величины (Подход погрешностей) или близость согласования между возможными приписанными значениями величины (Подход неопределенности)

Говорят, что измерение тем точнее, чем меньше его погрешность (при Подходе погрешностей), соответственно, чем меньше его неопределенность (при Подходе неопределенности).

Кроме вышеуказанных двух основных подходов – Подход погрешностей и Подход неопределенности, объектом рассмотрения в настоящей статье будут и другие подходы к измерению, которые являются их модификацией или гибридом.

### Подход погрешностей (классический подход)

Подход погрешностей (ПП) базируется на понятиях „истинное значение” и „погрешность”.

Принимается, что для данной измеряемой величины существует одно единственное значение, называемое “истинным значением”, которое соответствует определению величины. Это истинное значение может быть определено в принципе при “идеальных измерениях”.

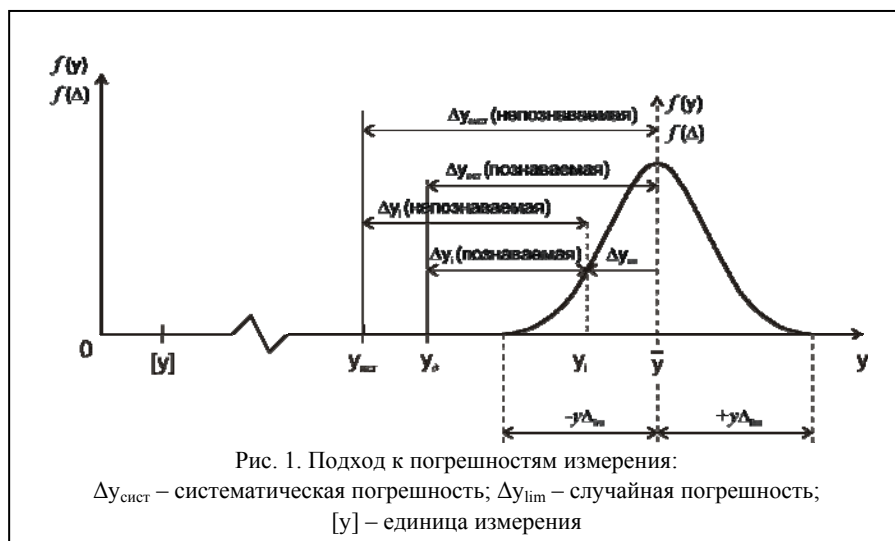
**Целью измерения** является определение значения измеряемой величины (оценки истинного значения) как можно ближе или как необходимо ближе к истинному значению путем исключения или введения поправок на все распознанные систематические погрешности и грубые погрешности, а также проведения достаточного числа повторных измерений для минимизации погрешностей вследствие случайных эффектов.

Но так как идеальные измерения не могут быть реализованы, вместо истинного используется действительное значение (условно принятое истинное значение) величины в соответствии с его определением в VIM1.

Следовательно, существуют два вида погрешностей – непознаваемые, определенные по отношению к истинному значению и познаваемые – определенные по отношению к действительному значению.

Строго говоря, последние тоже являются непознаваемыми (условно познаваемыми), так как их характеристики положения (математическое ожидание – среднее арифметическое) и рассеивания (среднеквадратическое отклонение) определяются из ограниченного числа наблюдений. Для опознанных систематических погрешностей  $\Delta_{уст}$  вводятся поправки, а границы случайных погрешностей  $\Delta_{lim}$ , выраженные через среднеквадратическое отклонение и принятую доверительную вероятность, характеризуют рассеивание возможных приписанных

значений величини. Изложенный выше подход иллюстрируется на рис. 1.



Полный результат измерения при ПП содержит как оценку размера величины, полученной при измерении, так и границы случайных погрешностей, т.е.  $y \pm \Delta y_{\text{lim}}$ .

Анализ погрешностей содержит как статистические, так и нестатистические процедуры, что приводит к противоречию в этом анализе. Пока не найден удовлетворительный способ идентификации, а тем более введения поправок для всех погрешностей измерения.

Не существуют общепринятых средств комбинирования систематических и случайных погрешностей в одну “полную” погрешность, которая давала бы некоторое общее представление о том, насколько хорошо результат измерения соответствует истинному значению, т.е. о том, как близко находится он к истинному значению величины. [1]

Другой проблемой ПП является заложенное в определении действительного значения и цели измерения логическое противоречие – невозможно определить что-то “как можно ближе” или “так близко” к чему-то, которое принято по природе непознаваемым.

Это противоречие и отсутствие общепринятой хорошей процедуры описания принятого “качества” результата измерения являются основными причинами того, что современная метрология все больше отходит от философии и языка ПП к Подходу неопределенности.

### Подход неопределенности

Подход неопределенности (ПН) базируется на понятии „неопределенность измерения”. Он описан подробно в “Руководстве выражения неопределенности – GUM” [2] и базируется на следующих трех утверждениях:

1. Возможно охарактеризовать качество измерения, учитывая как случайные, так и систематические воздействия, исходя из

одинаковой базы и обеспеченного для этого инструментария. (Соответствующие составляющие неопределенности группируются по способу оценивания в две категории – типа А и типа Б и рассматриваются и комбинируются так, чтобы получить дисперсию в соответствии с правилами математической статистики и теории вероятности).

2. Невозможно знать истинное значение измеряемой величины. Результат

измерения после введения поправок для распознанных систематических воздействий все еще остается только единственной оценкой размера измеряемой величины, из-за неопределенности, возникающей от случайных воздействий и неполного познания введенных поправок.

3. Невозможно знать истинное значение погрешности результата измерения (определенное относительно истинного значения величины). Определенная таким образом погрешность является идеализированным понятием и не может быть точно известна.

При ПН принимается категорически, что невозможно знать насколько близко к истинному значению находится значение, полученное при измерении. Вместо этого создана методология и параметр (неопределенность), который используется для характеристики значений, для которых на вероятностной основе и по имеющейся, связанной с измерением информации, считается, что они соответствуют истинному значению.

**Целью ПН** является установление (на базе используемой информации) одного интервала приемлемых значений измеряемой величины, в котором с определенной вероятностью находится истинное значение величины. Этот интервал выражается расширенной неопределенностью и называется „интервал охвата”.

Подход неопределенности иллюстрируется на рис. 2.

Подход неопределенности не отбрасывает понятия истинное значение. Оно необходимо для описания цели измерения, а так же для формулирования модели измерения. Более того, принимается, что из-за конечного числа подробностей при формулировке определения измеряемой величины (дефиниции) существует не одно, а множество истинных значе-

ний. Вследствие этого возникает так называемая дефиниционная неопределенность (definitional uncertainty). Тогда в интервале охвата лежит не одно, а множество истинных значений величины.

ленностью, вычисляемой на базе априорной информации, связанной с измерением. И в этом случае предполагается, что введены поправки за все распознанные систематические воздействия.

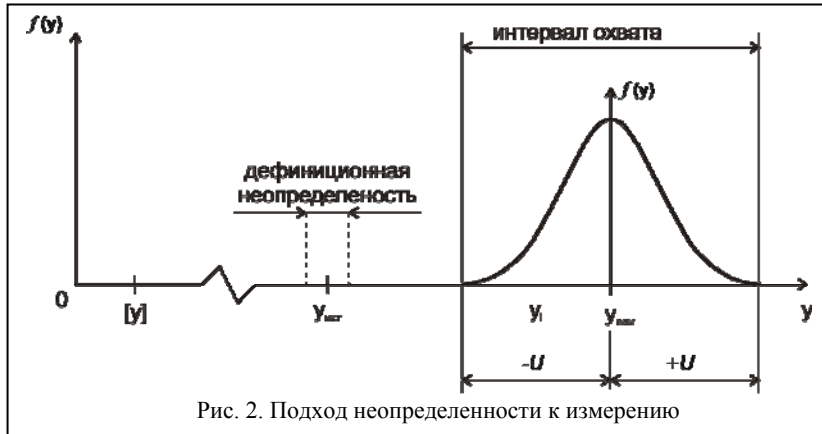


Рис. 2. Подход неопределенности к измерению

Дополнительная соответствующая информация может уменьшить интервал охвата. Однако даже самые совершенные измерения не могут исключить дефиниционную неопределенность, т.е. дефиниционная неопределенность устанавливает минимальную неопределенность измерения.

GUM принимает, что при хорошо определенной физической величине дефиниционная неопределенность пренебрежимо мала. Когда дефиниционная неопределенность является значимой по сравнению с остальными составляющими неопределенности, ее включение в бюджет неопределенности приводит к расширению интервала охвата.

На рис. 2 истинное значение показано как находившееся вне интервала охвата. Это может получиться из-за различных причин, включая неопознанные систематические погрешности, неподходящую оценку значений влияющих величин или явной грубой погрешности (промаха) при проведении измерения.

При ПН среднее арифметическое результата многократных измерений (измеренное значение, представительный результат измерения) принимается как лучшая оценка истинного значения при условии, что введены поправки для всех распознанных систематических воздействий и исключены грубые погрешности, т.е. при обеспеченной метрологической прослеживаемости. Неопределенность результата измерения вычисляется на базе апостериорной и априорной информации, связанной с измерением.

Результат единичного измерения является также оценкой (но не наилучшей) истинного значения величины с соответствующей неопреде-

ленностью. Полный подход ИЕС делает акцент на метрологическую совместимость результатов и на результаты единичного измерения.

Метрологическая совместимость определяется как свойство множества результатов измерения данной измеряемой величины, таких, что абсолютные значения разности любой пары значений двух различных результатов измеряемой величины, меньше значения, кратного стандартной неопределенности этой разности [3].

Целью Подхода ИЕС является получение результатов измерения, которые совместимы друг с другом в границах соответствующих им неопределенностей.

Считается, что с эксплуатационной точки зрения это все, что можно сделать при измерении (что можно было сделать) при измерении. Это иллюстрируется графически рис. 3, где четыре горизонтальные линии представляют множество возможных приписанных значений для четырех отдельных измерений одной и тоже измеряемой величины.

Неопределенность определяет размеры множества, а средний элемент (середина интервала) является только подходящей отметкой взаимного расположения множества и не представляет измеряемой величины лучше, чем остальные элементы множества. Целое множество это то, что представляет измеряемую величину. Все элементы множества имеют одинаковый статус.

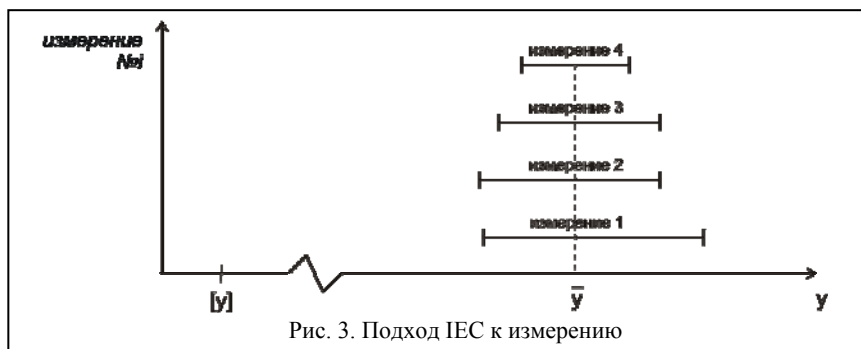


Рис. 3. Подход ИЕС к измерению

Тогда как при ПП погрешность является апостериорной оценкой достоверности приписанного значения, здесь неопределенность рассматривается как присущая составляющая результата измерения. Нельзя представить ни одного результата без приписанной ему неопределенности.

Неопределенность достоверного результата измерения должна быть такова, чтобы обеспечить совместимость с другими достоверными результатами измерения той же величины. Совместимость оценивается перекрытием результатов измерения. Критерий совместимости следующий:

Два результата  $y_1$  и  $y_2$  считаются совместимыми друг с другом, если:

$$|y_1 - y_2| \leq U_{12} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + 2rU_1U_2}, \quad (1)$$

где  $U_1$  и  $U_2$  – расширенные неопределенности  $y_1$  и  $y_2$ ;  $U_{12}$  – расширенная неопределенность их разницы;  $r$  – коэффициент корреляции.

Если  $y_1$  и  $y_2$  некоррелированы, т.е.  $r = 0$ , условие (1) приобретает вид

$$|y_1 - y_2| \leq U_{12} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2}. \quad (2)$$

Если  $y_1$  и  $y_2$  полностью положительно коррелированы ( $r = +1$ ), то

$$U_{12} = U_1 + U_2;$$

если  $y_1$  и  $y_2$  полностью отрицательно коррелированы ( $r = -1$ ), то

$$U_{12} = U_1 - U_2.$$

Особо важной особенностью Подхода ИЕС является его ориентация к измерениям с единичными наблюдениями (к единичным измерениям), что позволяет проводить исследование, изменяется ли измеряемая величина во времени посредством устанавливания совместимости результатов.

### Гибридный подход

Гибридный подход (ГП) содержит основные элементы ПП и ПН: погрешность и неопределенность. Погрешность соответствует определению в ВИМЗ [1].

Погрешность измерения – это разность между результатом измерения (измеренным значением величины) и референтным значением. Под **референтным значением** понимается значение величины, используемое как база для сравнения с величинами того же вида. В соответствии с определением референтным значением измеряемой величины может быть истин-

ное значение измеряемой величины или значение, приписанное по соглашению (конвенциональное значение). В первом случае референтное значение непознаваемое. При ГП погрешность  $\Delta y$  определяется относительно конвенционального референтного значения величины, т.е. погрешность познаваемая (см. рис. 4).

По определению погрешность является дифференциальной случайной величиной со своими характеристиками положения и рассеивания. Аналогично результату измерения оценка погрешности тоже может быть точечной или интервальной.

Точечной оценкой может быть значение погрешности единичного измерения  $\Delta y_i$ , среднее арифметическое значений погрешностей  $n$ -го числа повторяющихся измерений  $\Delta \bar{y}$  или среднее арифметическое значение погрешностей  $m$  серий из  $n$  измерений.

Измеренное значение (результат измерения) и референтное (конвенциональное значение) имеют соответствующую неопределенность. Следовательно, и оценка погрешности как разница между результатом измерения и референтным значением тоже имеет свою неопределенность. Неопределенность оценки погрешности формируется неопределенностями результата измерения и референтного значения.

**Целью ГП** является определение оценки погрешности и принадлежащей этой оценке неопределенности.

Это необходимо в двух случаях:

1) когда оцененная погрешность сравнивается с какими-то нормированными значениями, для того, чтобы дать заключение о соответствии или несоответствии (напр. при поверке средств измерения по данному параметру);

2) когда для оценки погрешностей измерения вводятся соответствующие поправки. В этом случае погрешности измерения рассматриваются как входные величины в модельной функции и неопределенности их оценок входят в неопределенность оценки входной величины.

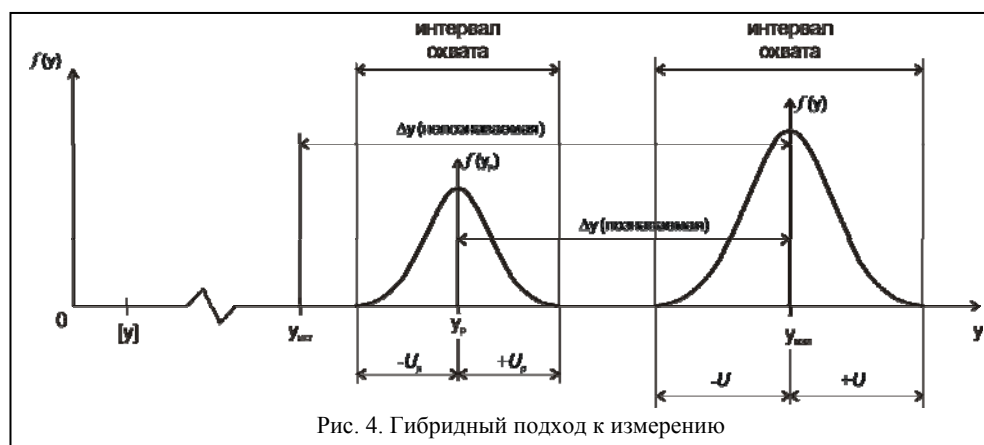


Рис. 4. Гибридный подход к измерению

Гибридный подход применяется на первом этапе обработки данных измерения, когда определяют оценки распознанных погрешностей и вводятся соответствующие поправки. Имеется одно последовательное применение ГП и ПН.

То же самое имеет место и при Подходе ИЕС, где в показания прибора вводятся поправки для оценок погрешностей, установленных при калибровке.

**Целью последовательного применения ГП и ПН** является определение интервала значений, который можно приписать измеряемой величине, после введения поправок на все распознанные систематические эффекты.

### Заключение

Анализ рассмотренных подходов показывает наличие эволюции в философии измерения.

Все подходы используют один и тот же математический аппарат.

Нет различия в понимании вероятностного характера измерения.

Результат измерения рассматривается как приближение, оценка размера измеряемой величины – как оценка, имеющая свои точностные характеристики

Основные подходы (Подход погрешностей и Подход неопределенности) нельзя противопоставлять. Они имеют много общих элементов и дополняют друг друга. Это иллюстрируется Гибридным подходом.

Общим для основных подходов (ПП и ПН) являются такие основные этапы процедуры оценивания характеристик погрешностей и вычисления неопределенности измерения как:

- анализ модельной функции;
- выявление источников погрешностей, соответственно неопределенности измерения и количественное оценивание их влияния;

– введение поправок на все распознанные систематические эффекты.

Оценивание неопределенности предполагает предварительное исследование для выявления и исключения из информационного массива наблюдений, содержащих грубые отклонения (промахи, грубые погрешности), а также введение поправок на все распознанные систематические эффекты.

Можно сказать, что **каждому неисправленному результату измерения присущи погрешность и неопределенность**. Для оценок погрешностей вводятся поправки, а неопределенности оценки погрешностей вводят в бюджет неопределенности исправленного результата.

Таким образом, **неопределенность утверждается как универсальный параметр, характеризующий точность любого исследования**.

Строго говоря, **каждая оценка имеет свою неопределенность, а со своей стороны – каждая неопределенность имеет свою оценку с соответствующей неопределенностью**.

### Список литературы

1. ISO/IEC GUIDE 99:2007(E/F) *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM 3)*.
2. *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM), BIPM, IFCC, ISO, IOPAC, IUPAP, OTML 1<sup>st</sup> edition 1995*.
3. IEC EN 0060359:2002 *Electrical and Electronic measurement equipment – Expression of performance*.
4. Charles Ehrlich, Rene Dybkaer, Wolfgang Woger. *Evolution of philosophy and description of measurement (preliminary rationale for VIM3), Accred Qual Assur (2007) 12:201-218 DOI 10.1007/s00769-007-0259-4*.

Поступила в редколлегию 3.05.2008

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. И.П. Захаров, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

### ЩОДО ПІДХОДІВ ДО ВИМІРЮВАННЯ ТА ЙОГО ТОЧНОСТІ

Радев Х.К.

*Стаття розглядає різні підходи до вимірювання та його точності у сучасній метрології. На базі порівняльного аналізу підходів оцінюється їх сумісність та галузь застосування. Аналіз розглянутих підходів показує наявність еволюції у філософії вимірювання. Всі підходи використовують один і той же математичний апарат. Немає відмінності в розумінні імовірнісного характеру вимірювання. Результат вимірювання розглядається як наближення, оцінка розміру вимірюваної величини – як оцінка, що має свої точнісні характеристики.*

**Ключові слова:** вимірювання, підхід, оцінка, погрешність, невизначеність вимірювання.

### ABOUT THE APPROACHES OF MEASUREMENT AND THEIR ACCURACY

Radev H.K.

*This paper considers the different approaches of measurement and their accuracy. Through comparative analysis of the approaches their compatibility and fields of application are evaluated. The analysis of the considered approaches is shown by the presence of evolution in philosophy of measuring. All approaches use the same mathematical vehicle. There is not distinction in understanding of probabilistic character of measuring. A measuring result is examined as approaching, estimation of size of the measured size – as an estimation, having the accuracy descriptions.*

**Keywords:** measuring, approach, estimation, error, measuring vagueness.