

## Мотивы и направления пересмотра Руководства по выражению неопределенности измерения. Ч. 2. Формирование и процедуры оценки неопределенности

Э. А. ГОЛУБЕВ

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы,  
Москва, Россия, e-mail: [goledu@mail.ru](mailto:goledu@mail.ru)

Для обоснования нового подхода к оценке неопределенности измерений рассмотрены вопросы множественности ее показателей и инвариантности разброса измеренных значений по отношению к сдвигу (смещению), а также механизмы образования неопределенности. Приведены основные исходные положения предлагаемой методики оценки неопределенности.

**Ключевые слова:** показатели неопределенности, накопленная и вносимая неопределенности, принцип инвариантности разброса, цикл измерений.

For the explanation of new approach to estimation of measurement uncertainty the problems of multiplicity of uncertainty indicators, of invariance of measured values dispersion in relation to shift, and the mechanisms of uncertainty formation are considered. The basic provisions of the uncertainty estimation technique are presented.

**Key words:** uncertainty indices, stored and added uncertainties, principle of dispersion invariance, measurements cycle.

**Многообразие типов и значений неопределенности.** Настоящая статья является продолжением [1], где принято, что на представительном множестве измеренных значений  $y_i$  одного объекта их рассеяние (разброс) будет характеризовать прецизионность измерений, а на множестве значений, приписываемых любому (в том числе вновь измеренному) значению  $y_0$ , их рассеяние будет характеризовать неопределенность измерений, т. е. рассеяние значений, которые могли быть обоснованно приписаны измеряемой величине  $y_0$ . Показано, что эти рассеяния (точнее, значения их количественных мер) совпадают. При этом опорными значениями для одинаковых по форме, но антисимметричных распределений этих измеренных и приписанных величин на оси  $Y$  являются  $\bar{y}_i$ ,  $y_0$ . В результате совпадение мер неопределенности и прецизионности при одинаковых условиях выполнения измерений означает, что неопределенность можно оценивать по формуле для расчета выборочной дисперсии выходной случайной величины (дисперсии прецизионности):

$$s^2(y) = \frac{1}{N-1} \sum_i (y_i - \bar{y}_i)^2. \quad (1)$$

Однако понятия неопределенности и прецизионности неидентичны, так как в каждой разности  $y_i - \bar{y}_i$  измеренное  $y_i$  и опорное  $\bar{y}_i$  значения меняются местами с изменением своего знака. Разность  $y_i - \bar{y}_i$ , лежащая в основе обоих понятий, — это случайная погрешность измерений. При измерениях сериями измеренным  $y_i$  является среднее значе-

ние наблюдений, а опорным  $\bar{y}_i$  — среднее значение на множестве измерений (серий). Систематическая погрешность — это разность  $\bar{y}_i - c$ , где  $c$  — любое фиксированное опорное значение (в том числе истинное, действительное и эталонное).

Формула (1) упомянута в стандарте [2, ч. 3], хотя в ч. 2 этого стандарта для расчета прецизионности приведены значительно более сложные формулы, чем (1). Это вызвано спецификой [2], посвященного прежде всего правилам проведения и обработки результатов межлабораторных экспериментов с учетом выбросов в массиве получаемых данных. Естественно, процедуры удаления выбросов по правилам [3] в принципе могут использоваться при оценке неопределенности. Но при этом следует иметь в виду незначительную необходимую точность такой оценки (в сравнении с точностью самих измерений), так что в ряде случаев можно считать, что погрешности оценок по простой формуле (1), как правило, относительно невелики.

Прецизионность была введена, в частности, в [2] как понятие, характеризующее рассеяние (разброс) измеренных значений данного образца. В зависимости от условий измерений существует ряд типов прецизионности, крайними случаями которых являются повторяемость и воспроизводимость. Это значит, что формула для оценки прецизионности типов одна и та же, но значения разбросов, рассчитываемые по этой формуле, в разных условиях измерений, в том числе в разных лабораториях, различны. По смыслу изложенного в противовес Руководству [3] существует не один тип, а соответствующий ряд типов неопределенности.

Таким образом получается, что характеристики неопределенности измерения, выражающие степень несоответствия измеренному значению  $y_0$  различных возможных измеряемых значений, можно вычислить по правилам оценки прецизионности, т. е. на основе результатов многократных последовательных (во времени) измерений образца и использования их среднего значения в качестве опорного. Конкретное значение неопределенности определяется не только набором, но и относительной значимостью влияющих факторов, так что она однозначно устанавливается совокупностью случайных проявлений этих факторов.

На фоне положений о множественности типов неопределенности и невозможности ее оценки единственным значением (см. [1]) возникает вопрос — а нужна ли такая «полная» неопределенность? Например, полная неопределенность того или иного показателя качества при выпуске данной продукции должна опираться на усреднение по представительному множеству выпускающих предприятий. В таком случае почему каждому отдельному предприятию или калибровочной лаборатории нужно принимать на себя суммарные случайные погрешности всех своих коллег? Ему нужна не полная неопределенность, а лишь «неопределенность цепочки прослеживаемости» (накопленная неопределенность) от измерения вторичного эталона до рабочих измерений, выполняемых при реализации продукции, или до передаточных измерений. При этом должны учитываться неопределенности своего звена и предшествующих звеньев цепочки. Будем называть их вносимыми неопределенностями. Их оценку можно проводить независимо друг от друга, в том числе параллельно.

Дисперсию неопределенности цепочки можно определить как сумму дисперсий неопределенности ее звеньев, поскольку измерения, осуществляемые в различных звеньях, являются независимыми и можно суммировать (и интерпретировать в категориях «много больше» и «много меньше») только дисперсии. При этом есть основания ожидать, что при приближении к верхним звеньям цепочки слагаемые этой суммы будут уменьшаться, так что в ряде случаев неопределенность цепочки может быть аппроксимирована дисперсией последнего звена, у которого и влияющих факторов больше, и их воздействие на процесс измерения интенсивнее. Естественно, возможность такой аппроксимации должна быть аргументирована в каждом отдельном случае.

Таким образом, в оценке неопределенности на первые роли выходит вносимая неопределенность («внутрилабораторная воспроизводимость»), определяемая для каждой лаборатории специфическим набором известных, неизвестных и неформализуемых (но тем не менее учитываемых) влияющих факторов и их «весами» при воздействии на измеряемую величину. Для оценки неопределенности по (1) требуется лишь одно множество (измеренных значений), соответствующее воспроизведению в одной лаборатории реальных условий прикладных измерений, в том числе передаточных, и выполнению в этих условиях многократных измерений одного и того же образца. В этом случае нет необходимости априори определять, какие факторы следует считать значимыми.

При внутрилабораторных измерениях<sup>1</sup> в законе распространения нельзя считать независимыми не только наблюдения в пределах серии, но даже измеренные значения. Они зависимы по медленным и промежуточным факторам. Вследствие взаимозависимости в этом случае закон распространения было бы необходимо использовать в сложной форме, включающей ковариации. Но из-за отсутствия данных по ковариациям, а также их недостаточности по дисперсиям (входных величин) требуется их экспериментальное измерение, что, как отмечалось выше, резко увеличивает сложность оценки неопределенности. Можно, конечно, найти дисперсии и ковариации входных величин экспериментально, но оказывается, что при этом самым экономичным во всех отношениях является одновременное измерение всех входных величин в ходе оценки дисперсии выходной величины. Именно эта дисперсия и является искомым оценкой неопределенности, так что искать входные дисперсии просто нет необходимости. Это лишним раз подчеркивает необоснованность подхода Руководства [3] к оценке неопределенности измерений.

**Формирование неопределенности и принцип инвариантности разброса.** С учетом рассмотренного выше при оценке вносимой неопределенности речь идет об измерениях, отображающих изменчивость условий работы данной измерительной лаборатории, вызывающую «рассеяние значений, приписываемых измеряемой величине» [3]. Эти изменения обусловлены и произвольной, в том числе достаточно большой, разницей во времени между подготовительной стадией и последующими прикладными измерениями. Чтобы должным образом отобразить эти изменения, используемую информацию необходимо собирать в течение интервала времени (цикла измерений), превышающего эту разницу и значительно превышающего продолжительность одного измерения. «Отобразить должным образом» для данной лаборатории прежде всего означает «учесть все значимые влияющие факторы», вызывающие изменчивость измеренных значений при многократных измерениях одного и того же объекта [3]. Набор факторов (в том числе внешней среды) и степень их влияния могут быть различными даже для лабораторий одного и того же профиля. Поэтому учет приходится проводить для каждой лаборатории отдельно.

В течение выполнения одного измерения, т. е. в условиях повторяемости, влияние промежуточных и медленных влияющих факторов можно считать неизменным, и разброс по ним отсутствует. В то же время для каждого измерения эти факторы могут проявляться в виде смещения измеренного значения, которое интерпретируется в метрологии как неточность компенсации или неисключенная систематическая погрешность. Кроме того с переходом к многократным измерениям и ростом их числа (и времени усреднения от начала цикла измерений) на множестве измерений возникает и увеличивается изменчивость и указанной погрешности, и неточностей, обусловленных влиянием факторов внешней среды. Все это вместе проявляется на множестве последовательно получаемых измеренных значений уже как случайный процесс, выборочная дисперсия которого определяется по (1).

<sup>1</sup> Термин «внутрилабораторные измерения» противопоставляется здесь не столько межлабораторным измерениям, сколько измерениям (той же величины), выполняемым в различных звеньях цепочки прослеживаемости.

При дальнейшем увеличении продолжительности и числа  $N$  измерений разброс измеренных значений растет (в идеализированном случае монотонно), так как включаются новые, все более медленные влияющие факторы, при том что старые, относительно быстрые факторы влияют не только на старые, но и на новые результаты. В принципе, в ходе последовательного выполнения измерений не бывает полностью независимых измерений — они остаются зависимыми по все более медленным факторам.

В число промежуточных влияющих факторов входит и процедура исключения систематических погрешностей, в результате чего образуются неисключенные систематические погрешности (НСП). Лучшим способом такого исключения является распространение понятий систематической и случайной погрешности на множество измерений и выделение случайной погрешности путем усреднения либо самих измеренных значений  $y_i$ , либо их погрешностей  $y_i - c$  (см. [1]). В результате реализации случайных погрешностей на множестве измерений образуются как суммы случайных составляющих НСП и неточностей, возникающих под воздействием других влияющих факторов.

Кроме роста разброса измеренных значений, переход к статистической модели означает замену множества опорных значений, соответствующих выборочным средним значениям мер разброса для серий, на единое опорное значение (общее среднее значение для цикла измерений). Также снимается ограничение, связанное в [3] с делением входных величин на два типа (А и В), и измеряемая случайная величина будет рассматриваться во времени на протяжении эксперимента как случайный процесс, автоматически включающий любые по длительности реальные воздействия условий измерений на измеренное значение.

На оси времени при многократных измерениях множество реализаций представляют упомянутым выше случайным процессом. При его обработке каждая реализация  $N$  измерений усредняется и образует значение выборочной меры неопределенности (стандартное отклонение, доверительный интервал, дисперсию, вычисляемую по (1)), а также выборочное среднее значение. В ходе цикла измерений с увеличением числа  $N$  усредняемых измеренных значений процесс усреднения охватывает все более медленные влияющие факторы, а выборочное среднее измеренных значений стремится к общему среднему, опорному для всего цикла. Каждая случайная реализация погрешностей  $N$  измерений трансформируется в разброс, увеличивающийся с ростом  $N$ . Так и возникает неопределенность измерений. А разность между общим средним и эталонным значениями образует одинаковую поправку на постоянно действующие влияющие факторы (в том числе неизвестные), которая является характеристикой правильности измерений и должна вводиться во все последующие измеренные значения.

Важнейшим положением при оценке неопределенности измерений является принцип инвариантности разброса по отношению к смещению. Он состоит в том, что при малых значениях относительной погрешности (т. е. практически всегда) изменение измеряемой величины (смещение) в пределах ширины уровня измерений<sup>2</sup> очень слабо влияет на раз-

брос получаемых значений при многократных измерениях. Здесь имеются в виду смещения, характерные для измерений различных объектов одного уровня. Причиной инвариантности разброса является приближенное равенство смещений и неизменность разности между измеренным и средним значениями на шкале отсчета измеренных значений. Эта разность, естественно, входит во все три меры разброса. В принципе инвариантности исходят из предположений о достаточно большом числе измерений, необходимых при оценке неопределенности, и о том, что типовые случайные погрешности много меньше измеренных значений. Это подтверждается экспериментально полученными зависимостями прецизионности от уровня измерений, приведенными в [2]. С учетом допускаемых погрешностей в оценке разброса они незначительно отклоняются от прямых линий, тем более в пределах уровня измерений.

Понимание неопределенности именно в качестве разброса, неизменного в больших пределах ширины уровня измерений, при оценке неопределенности (как и прецизионности) в общем случае усреднения измеренных значений на различных множествах означает, что:

опорным значением может быть только общее среднее измеренных значений;

неопределенность (прецизионность) не зависит от любых опорных (в том числе эталонных) значений измеряемого образца (или идентичных образцов) и не изменяется при «исключении» систематических погрешностей;

неопределенность (прецизионность) не зависит от неизменных во времени влияющих факторов, а также от монотонно изменяющихся влияющих факторов, в частности, обуславливающих дрейфы калибрующего оборудования и калибруемого прибора (при дрейфе разности  $y_i - \bar{y}_i$  изменяется не только уменьшаемое, но и вычитаемое) и систематические погрешности калибровки;

требования к долговременной стабильности измеряемого образца отсутствуют;

неопределенность (прецизионность) имеет ряд разновидностей, определяемых условиями выполнения измерений и «включенными» влияющими факторами;

накопленная неопределенность не зависит от различий (в рамках одного уровня) между общими средними значениями, полученными для звеньев цепочки прослеживаемости, а ее значение получается как квадратный корень из суммы дисперсий для звеньев цепочки.

Принцип инвариантности позволяет разделить процедуры оценки смещения случайных результатов измерений, с одной стороны, и их разброса — с другой. Такое разделение упрощает оценку неопределенности и делает ее значительно более точной и при этом, конечно, ни в малейшей степени не затрагивает принципы организации измерений, учета смещений, связанных с оценкой «истинного» значения измеряемой величины, калибровкой эталонов различных уровней, компенсацией дрейфа и прослеживаемостью. Ни о какой замене эталонов некими средними значениями речи быть не может.

По примеру некоторых других наук, в том числе метеорологии, можно было бы ввести термин «статистическая метрология» с позиций не только оценки качества измерений, но и более трудных задач оценки соответствия [4].

**Исходные положения предлагаемой методики.** В рассматриваемом подходе речь идет об экспериментальной

<sup>2</sup> Не определенное пока аналитически понятие ширины уровня измерений можно трактовать как диапазон измеренных значений, в пределах которого дисперсия неопределенности изменяется, например на 10 %.

оценке вносимой (лабораторией) неопределенности. В классификации [2, ч. 3] значение вносимой неопределенности  $u_c$  равно значению внутрилабораторной воспроизводимости. Это тип прецизионности, при котором естественным образом могут проявляться все влияющие факторы, вызывающие изменчивость измеренных значений в рамках одной лаборатории. Кроме воздействия внешних дестабилизирующих факторов, эта изменчивость определяется альтернативами выбора, конкретизирующими «внутрилабораторные» условия. Как и при оценке воспроизводимости, это может быть выбор среди нескольких операторов, экземпляров измерительного оборудования или допускаемых режимов его калибровки<sup>3</sup>. В рабочих обстоятельствах, естественно, могут осуществляться подобные замены и конечно же будут изменяться внешние условия. Эти факторы неизбежно будут порождать изменчивость показаний и неопределенность измерений. Поэтому исследование вносимой неопределенности состоит, во-первых, в многократных измерениях двух или нескольких образцов разных уровней в разных условиях, соответствующих обычным условиям работы лаборатории на протяжении времени, достаточного для воспроизведения их реального многообразия. Во-вторых, в исследовании входит обработка полученных результатов и их представление в форме, удобной для априорной оценки вносимой неопределенности измерения любых других образцов. Главное требование к измерениям при оценке неопределенности в ходе такого эксперимента — это их естественность, т. е. воспроизведение обычных условий рабочих измерений с практически возникающими изменениями состава операторов, измерительного оборудования, с естественными вариациями времени (суток) начала измерения. Но для каждого измеряемого образца результат эксперимента должен быть один — значение оценки стандартного отклонения измеряемой величины, полученное для всего периода времени, прошедшего от начала выполнения эксперимента<sup>4</sup>. Согласно принципу инвариантности разброса в последующих рабочих измерениях это значение (как значение неопределенности измерения) может быть приписано любому измеренному значению объекта соответствующего уровня. Таким образом, оценка неопределенности (как разброса) отделена от рабочих измерений. При этом термины «различные условия» и «различные влияющие факторы» относятся к мерам, пропорционально воспроизводящим реально существующую практику, в том числе к заменам операторов, оборудования или его отдельных блоков, равно как и к изменениям в результате калибровки и других процедур исключения систематических погрешностей. Такое исследование при естественной пролонгации для промежуточных результатов в принципе должно охватить и учесть все статистически значимые условия измерений и все, включая неизвестные, влияющие факторы.

Помимо требования естественности эксперимента необходимо неукоснительно соблюдать положения методики

<sup>3</sup> В [3] приведены некоторые дополнительные влияющие факторы (источники неопределенности), но они в основном относятся к первым двум звеньям цепочек прослеживаемости и здесь не рассматриваются.

<sup>4</sup> Эксперимент в общем случае должен охватывать несколько измеряемых стабильных образцов, перекрывающих необходимый диапазон измерений. Однако для ориентировочной оценки неопределенности достаточно двух-трех образцов.

выполнения измерений (МВИ), относящихся и к исключению систематических погрешностей. Как и в [2], МВИ должна быть аттестованной.

Целью цикла измерений каждого образца является нахождение соответствующего значения неопределенности, для чего измеренные значения должны быть подставлены в формулу (1). Цель всего исследования — установление зависимости неопределенности от уровня измерений (вернее — от измеренных значений образцов)<sup>5</sup>. Эта зависимость при последующих прикладных (в том числе передаточных) измерениях позволит незамедлительно приписывать значение неопределенности результату измерения каждого нового образца. Естественно, в ходе эксперимента циклы измерений на различных образцах могут осуществляться параллельно.

При проведении цикла важно не только и не столько выполнить большое количество измерений, сколько охватить достаточный промежуток времени  $[0, T_0]$ , в течение которого (как можно рассчитывать) проявятся и будут автоматически учтены существенные внешние воздействия на процесс измерения в их естественных сочетаниях. На уточнение значения неопределенности «работает» именно время (длительность эксперимента в сопоставлении с длительностью измерения  $T$ ), а не рост числа измерений. В ходе последовательного выполнения эксперимента не бывает полностью независимых измерений — они остаются зависимыми по все более медленным факторам. Однако при достаточно больших значениях  $T$  влияние медленных факторов на интервал корреляции суммарного воздействия всех факторов (а следовательно, на неопределенность) становится все менее существенным.

Изложенная краткая процедура оценки неопределенности подобна процедуре контроля стабильности и в принципе не требует особой квалификации. Наиболее сложным вопросом является оценка продолжительности цикла  $T_0$ . Для ее обоснованной оценки можно воспользоваться характером зависимостей «текущих» статистических характеристик (дисперсии и среднего значения) измеренных значений  $y_i$  от времени  $t$ , прошедшего с начала цикла. Как упоминалось выше, с ростом  $t$  дисперсия должна возрастать за счет воздействия все более медленных влияющих факторов. Но с увеличением  $t$  влияющие факторы, в том числе медленные, должны иссякать, и возрастание дисперсии должно замедляться, дисперсия стремится к постоянному асимптотическому значению. Другим индикатором является стремление выборочного среднего значения к асимптоте, являющейся общим средним значением. Дисперсия  $s^2(T_0)$ , достаточно близкая (с точки зрения допустимой погрешности) в обоих случаях к асимптотическому значению, может считаться искомой дисперсией неопределенности.

Результат прикладного измерения должен представлять собой измеренное значение, т. е. «рабочее» значение, полученное как наиболее правдоподобное в соответствии с МВИ и скорректированное с учетом систематической погрешности (см. выше), плюс-минус удвоенное стандартное отклонение неопределенности, в рамках которого с вероятностью 90—95 % находится истинное значение измеряемого образца. Если известно действительное или эталонное

<sup>5</sup> Требования к точности оценки как значений неопределенности, так и измеренных значений образцов в этом случае невысокие.

значение с измеряемого образца, то, с точки зрения оценки неопределенности, в ходе эксперимента нет необходимости как-то использовать это значение, если такое использование не предусмотрено МВИ (в частности, когда измеряемым объектом является эталон). Но многократные измерения эталона являются мощным средством оценки правильности  $\bar{y}_i(T_0)$  – с измерений, выполняемых лабораторией, т. е. величины, корректирующей все измеренные значения. Описанный эксперимент является не только адекватным средством априорной оценки неопределенности, но и наиболее эффективным способом априорной оценки правильности измерений. Напомним, что в соответствии с [2] правильность — это статистическое понятие, оценка которого основывается на выполнении большой серии измерений.

Изложенные выше исходные положения могут быть использованы для подготовки проекта Положения по оценке и выражению неопределенности измерений на уровне пред-

приятия.

#### Л и т е р а т у р а

1. **Голубев Э. А.** Мотивы и направления пересмотра Руководства по выражению неопределенности измерения. Ч. 1. Недостатки Руководства и Дополнения 1 // Измерительная техника. 2012. № 11. С. 10—14.

2. **ГОСТ Р ИСО 5725—002.** Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Ч. 1—6.

3. **Guide** to the expression of uncertainty in measurement. ISO, 1993. Руководство по выражению неопределенности измерения / Пер. с англ. СПб.: ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, 1999.

4. **Голубев Э. А., Исаев Л. К., Чирков А. П.** Об оценке качества поверки средств измерений // Измерительная техника. 2006. № 8. С. 18—22; **Golubev E. A., Isaev L. K., Chirkov A. P.** Estimating the quality of verification of measurement instruments // Measurements Techniques. 2008. V. 49. N 8. P. 762—768.

Дата принятия 11.09.2012 г.

## МЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

531.7.08:519.245:538.911:538.975

### Моделирование и оценка параметров морфологии поверхностей тонких пленок нано- и микроэлектромеханических систем

**В. А. ВАСИЛЬЕВ, П. С. ЧЕРНОВ**

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия, e-mail: opto@bk.ru

*Рассмотрены тонкопленочные нано- и микроэлектромеханические системы датчиков давления, экспериментальные и теоретические методы изучения и результаты оценки параметров морфологии поверхностей пленок. Разработаны модель и алгоритм роста тонких пленок, учитывающие диффузию частиц.*

**Ключевые слова:** нано- и микроэлектромеханические системы, датчики, тонкие пленки, морфология поверхности.

*The thin film nano- and microelectromechanical systems of pressure sensors, experimental and theoretical methods of study and estimation results of films surfaces morphology are considered. The model and algorithm of thin films growth with taking into account the particles diffusion is developed.*

**Key words:** nano- and microelectromechanical systems, sensors, thin films, surface morphology.

При создании тонкопленочных нано- и микроэлектромеханических систем (НиМЭМС) датчиков давления [1] существует проблема получения тонких пленок материалов с заданными характеристиками. Известно, что поверхностные эффекты оказывают значительное влияние на свойства тонких пленок. Изучение поверхности пленок и оценка параметров их морфологии открывает путь к управляемому синтезу тонкопленочных структур, повышению качественных и эксплуатационных характеристик датчиков давления на основе НиМЭМС.

Анализ известных технических решений датчиков давления с тонкопленочными тензорезисторными системами показал, что наиболее общими элементами являются слои — диэлектрический 1, тензорезистивный (хром—никель) 2, адгезионный 3, контактный (проводящий) 4 (рис. 1). Они последовательно наращиваются на упругом элементе (чаще всего в виде металлической мембраны) методами термического испарения в вакууме или магнетронного напыления.

Рост поверхностей перечисленных тонкопленочных элементов обычно исследуют экспериментально методами ска-