

# Практика и особенности оценки неопределенности и ее аналитического расчета

Е. А. Фёдоров

Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации (Финуниверситет), Financial University  
egorfed@mail.ru

**Аннотация.** Методы вычисления неопределенности, так же как и методы оценивания характеристик погрешности, базируются на основных понятиях классической метрологии, математической статистики и теории ошибок. Сложность и объем вычислений, возникающих в практических задачах оценивания неопределенности измерений, требуют значительных ресурсов времени и труда.

**Ключевые слова:** неопределенность; измерения; мера; точность; погрешность

В большинстве случаев новое понятие «неопределенность» введено вместо ранее использовавшегося понятия «погрешность измерений», в частности, из-за стремления гармонизировать отечественную метрологию с зарубежными стандартами. Однако, в ряде случаев учет неопределенности результатов измерений лучше описывает ситуацию на рабочих местах, чем погрешность прибора. Поясним это на примере оценки микроклимата производственных помещений.

Согласно определению, приведенному в ГОСТ Р 54500.3-2011/Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008, неопределенность – это «параметр, относящийся к результату измерения и характеризующий разброс значений, которые могли бы быть обоснованно приписаны измеряемой величине». Наряду с неопределенностью, в новых НПА используется также понятие «расширенная неопределенность».

Согласно действующим СанПиН 2.2.4.548-96, для определения класса условий труда следует использовать среднесменную температуру воздуха. Если часть смены работник находится в условиях воздействия недопустимо низкой температуры, а часть – недопустимо высокой температуры, то среднесменная температура может оказаться вполне допустимой, что явно неадекватно определяет микроклиматические воздействия на работника. Если при этом используется прибор с малой погрешностью, то ее учет не приведет к лучшему согласию результатов измерений с действительным положением дел. В то же время, неопределенность измерений в этом случае будет существенно больше погрешности прибора и ее учет выведет результаты измерений из допустимой области значений температуры воздуха, что восстановит согласие результатов измерений с действительным положением дел. Считается, что термин «неопределенность» пришел на замену термину «погрешность». Однако, это не так.

Термин «погрешность» остается существовать, и он входит в международный метрологический словарь VIM.

## I. НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ В ИЗМЕРЕНИЯХ И ВЫЧИСЛЕНИЯХ: ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В 1993 г. был выпущен документ ИСО/МЭК «Руководство по выражению неопределенности измерений (GUM)», в котором было введено понятие «неопределенность измерений».

В Руководстве большое внимание уделяется различию терминов «погрешность» и «неопределенность». Утверждается, что они не синонимы и представляют собой совершенно различные понятия. По определению авторов Руководства, погрешность измерения  $\delta_i = X_i - \mu$  это – отклонение результата измерения  $X_i$  от его истинного значения вычисляемой величины  $\mu$ . Погрешность возникает из-за несовершенства процесса измерения. Хотя погрешность и не может быть точно определена, из-за неопределенности истинного значения, это определение рационально использовать для статистического описания процесса измерения. Размещение погрешности  $\delta$  идентично с распределением результатов измерений  $X$  с точностью до начала координат (рис. 1).

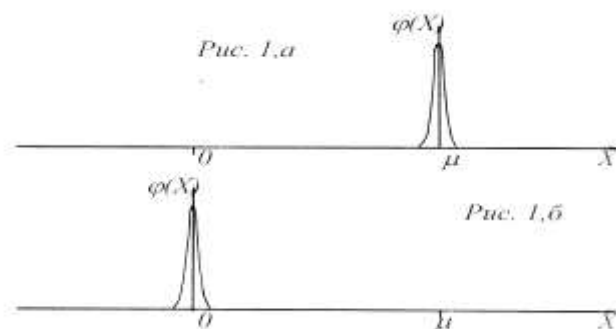


Рис. 1. Распределение измеряемой величины  $X$  (1,а) и погрешности вычислений  $\delta = (X - \mu)$  (1,б).  $\phi(X)$  – плотность распределения

Так как, истинное значение не может быть вычислено, то и погрешность, как понятие идеализированное не может быть определена точно. Поэтому, специалисты постарались во-первых, по возможности отказаться, от использования при изложении понятий «погрешность» и

«истинное значение измеряемой величины» в пользу понятий «неопределенность» и «оцененное значение измеряемой величины», во-вторых, переход от деления погрешностей по природе их проявления на «случайные» и «систематические» к другому делению – по способу оценивания неопределенностей измерений (по типу А – методами математической статистики и по типу В – другими методами).

Основным понятием, используемым в Руководстве, является понятие «неопределенность измерения». В разделе II дается два определения этого понятия:

- «в своем самом широком смысле «неопределенность измерения» означает сомнение относительно достоверности результата измерения»;
- «неопределенность измерения есть параметр, связанный с результатом измерения, который характеризует дисперсию значений, которые могли быть обоснованно приписаны измеряемой величине».

Далее рассмотрим, как вычисляется неопределенность. В соответствии с определением, приведенным ГОСТ Р 54500.3-2011/Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008, погрешность – это «параметр, который связан с результатом измерения и описывает разброс значений, которые достаточно обосновано могут быть прикреплены к измеряемой величине. Например, таким параметром может быть стандартное отклонение или ширина доверительного интервала».

Отсюда ясно, что это определение не полное, и ему отвечают и другие величины, кроме приведенных – такие как размах выборки  $R = (X_{\max} - X_{\min})$  при установленном числе параллельных измерений. Бесспорно, что для практического пользования такое определение слабо и нуждается в детализации. Вследствие этого, проведя точный анализ сравнения таких понятий, как погрешность и неопределенность, установим неопределенность как «параметр центрированной случайной величины, который является разностью между истинным значением величины измеряемой и результатом измерений, то есть величины, которая совпадает по модулю с погрешностью измерений, но обратной ей по знаку». Иными словами, это такой параметр распределения величины  $(\mu - X_i)$ . Такое распределение по отношению к распределению погрешности измерений является зеркальным (рис. 2а) и, следовательно, они совпадают друг с другом при симметричной функции распределения (рис. 2б). Правда, и здесь не станет однозначно, что именно это за параметр. Таким образом, точного полного определения неопределенности нет, и придется иметь дело с величинами, которые определяемы в большой мере через примеры – так как недостаточно приведенных выше определений. После рассмотрения имеющихся литературных данных, можно сделать вывод, что из-за неопределенности во всех случаях исследуются симметричные распределения результатов измерений (результаты измерений анализируются как выборка из

нормально распределенной генеральной совокупности), а в качестве параметра, который упомянут в определении неопределенности, всегда принимают во внимание стандартные отклонения, которые описывают случайные и не выявленные ошибки измерений, оцениваемые разными способами.

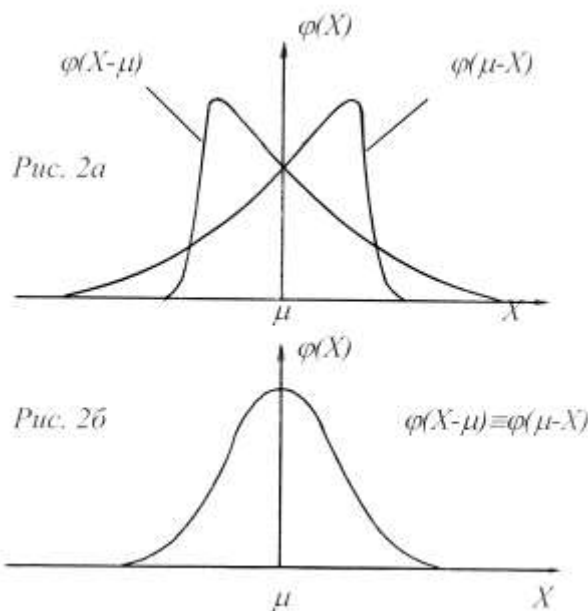


Рис. 2. Распределения погрешности результата измерений  $\delta = (X - \mu)$  и величины  $(\mu - X)$ , 2а – несимметричное распределение измеряемой величина, 2б – симметричное

Главные причины, по которым внедряется понятие «неопределенность», следующие:

1. Отсчет доверительного интервала в отсутствие систематических погрешностей начинается от  $\bar{X}$  – среднего значения конечных результатов измерений  $X_i$ . То есть, при использовании погрешности отсчет должен вестись от мат. ожидания  $\mu$ , а величину  $\bar{X}$  используют, так как  $\bar{X}$  – это, получается, самая лучшая оценка для  $\mu$ . Использовать неопределенность с этой точки зрения наиболее рационально – в определениях всех рассчитываемых параметров проявляются только наблюдаемые величины.
2. Методы оценки интервала, в котором располагается точная величина, более различны и лучше определены и в других документах, которые используют понятие неопределенность. Например, принимаются к сведению по-настоящему имеющие место, но часто игнорируемые в отечественной литературе скрытые систематические ошибки.
3. Применение неопределенности разрешает открыто решать вопрос о соответствии или несоответствии измеряемой характеристики качества принятым нормам. Если значение нормы не перекрывается

расширенной неопределённостью результата измерения, то, базируясь на данном результате можно сделать надёжное заключение о соответствии или несоответствии объекта испытания такой норме. Однако, это же относится к корректно рассчитанному доверительному интервалу.

4. Понятие погрешность изначально не являлось в западных странах настолько же распространенным, как в нашей стране. Поставленные перед необходимостью оценивать интервал, в котором располагается истинное значение, западные специалисты в качестве базы взяли «неопределенность».

Например, суммарная стандартная неопределенность или стандартная неопределенность, либо кратные им величины – расширенная неопределенность. В конечном счете предполагается нормальное распределение результатов измерений. Отсюда можно сделать вывод, что между описанием результатов измерений с использованием погрешности и с применением неопределенности имеется идентичное соответствие.

Коэффициент  $k = u(\bar{P})$ , где  $\bar{P}$  – это доверительная вероятность, для расширенной неопределенности выбирают равным два или три («коэффициент охвата»), что соответствует  $\bar{P} \cong 0.954$  и  $\bar{P} \cong 0.997$ . При расчете доверительных интервалов редко, но используют и другие значения  $k$ . Стандартное отклонение погрешности  $s_{(x-\mu)}$  совпадает со стандартным отклонением результатов измерений  $s_x$ . Величина  $u^2(\hat{\delta})$ , которая учитывает погрешность аттестации стандартных примеров, равняется  $\frac{\Delta}{3}$ , где  $\Delta$  – это полуширина интервала, в котором располагается принятое опорное значение. Член  $\sum_{j=1}^J c_j^2 u^2(z_j)$ , описывающий вклад неопределенности, обусловленной матричными эффектами, в нашей литературе обычно не рассматривается, так как предполагается, что эти эффекты очень малы. Как мы можем видеть, величины, которые соответствуют друг другу используются при описании результатов измерений с применением погрешности и неопределенности, почти идентичные. Тогда возникает вопрос для чего же необходимо такое понятие как неопределенность и связанные с ним величины?

Существуют различные опубликованные подходы к оцениванию неопределенности и/или вариативности в испытании. ИСО/МЭК 17025 не устанавливает какой-либо конкретный подход. Лабораториям рекомендуется использовать статистически обоснованные подходы. Все подходы, представляющие разумную оценку и приемлемые в рамках соответствующей технической дисциплины, принимаются в равной степени, и ни один их подходов не имеет преимуществ над другими. Ниже приведены примеры подходов.

а) Как промежуточная точность, так и воспроизводимость (в межлабораторных сличениях), описанные в ИСО 5725, могут быть использованы при оценке неопределенности измерений. Однако они могут не включать некоторые источники неопределенности, которые также должны быть оценены и объединены с точностью, если это существенно.

б) Руководство по выражению неопределенности измерений (GUM) часто считается документом, представляющим более строгий подход к оценке неопределенности. Однако в отдельных случаях достоверность результатов, рассчитанных по математической модели, возможно, стоит проверить, например посредством межлабораторных сличений.

с) В тех случаях, когда широко признанный метод испытаний устанавливает пределы для значений основных источников неопределенности измерения с указанием формы представления вычисленных результатов, то можно считать, что лаборатория удовлетворяет требованиям по неопределенности измерений, следуя этому методу испытаний.

Если измерение дает численный результат (или заявленный результат основан на численном результате), то необходимо оценивать неопределенность этих численных результатов. Если методика испытаний не предусматривает жесткой, метрологически и статистически достоверной оценки неопределенности измерений, то испытательной лаборатории следует попытаться разумно оценивать неопределенности результатов измерений. Это применимо в случае испытательных методик и рациональных, и эмпирических. В случаях, когда результаты испытаний не выражены численно или не основаны на численных данных (например, годен/не годен или положительный/отрицательный, или основаны на визуальных или сенсорных восприятиях, или других форм анализа качеств), то не требуется оценок неопределенности или другой вариативности результатов. Тем не менее лабораториям рекомендуется иметь представление о вариативности результатов, если возможно. Важное значение неопределенности качественных результатов испытаний является бесспорным, как и тот факт, что для проведения расчетов существует необходимая статистическая методика (процедура). Необходимо определять все существенные компоненты неопределенности для каждого испытания. Если определить один компонент с неопределенностью менее чем от 1/5 до 1/3 суммарной неопределенности измерений, то как правило на суммарную погрешность измерения это сильно не повлияет. А вот если таких компонентов несколько или более, то их общий вклад в суммарную неопределенность измерений может стать значительным и не может быть игнорирован. Даже там, где важным должен быть упор на общих данных точности или где должен применяться п. 5.4.6.2 примечание 2 Стандарта ИСО / IEC 17025, лаборатория должна, по крайней мере, попытаться определить все значимые компоненты неопределенности. Тем самым полученная информация позволит подтвердить разумность подхода, и

что были учтены все значимые компоненты. Полезными и наглядными способами представления цепочки шагового определения компонентов неопределенности является составление блок-схем или схем в виде «дерева». В некоторых случаях цепочка шагов в методе испытаний может быть общей для нескольких различных методов испытаний и, как только оценка неопределенности получена для некой цепочки шагов, то ее можно использовать для оценки неопределенности для всех методов, где применяется такая цепочка шагов.

## II. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ РАСЧЕТА ПОГРЕШНОСТИ И НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

Погрешность измерения относится строго только к результату конкретного измерения индивидуального образца. В ходе составления контракта с клиентом должно быть оговорено и согласован вопрос о том, будет ли результат испытаний и неопределенность относиться к конкретному испытываемому образцу или к партии, из которого он выбран.

Там, где выборка (или подвыборка) является составной частью испытаний, то лаборатория должна рассматривать неопределенность вследствие такой выборки. Оценивание репрезентативности выборки образца или набора образцов из большого числа партии требует понимания однородности большей части образцов и дополнительного статистического анализа. Если метод испытаний включает в себя специальные процедуры выборки образцов, предназначенные для характеристики партии, серии или состава более крупной численности, то неопределенности измерений для отдельных измерений часто незначительны относительно статистической вариативности партии, серии или состава более крупной численности. В тех случаях, когда погрешность отдельных измерений велика относительно стандартного отклонения выборки, то погрешность измерения должна учитываться при характеристике партии, серии или состава более крупной численности. Если в процедуру испытаний входят специальные процедуры по подвыборке, то, как часть оценки неопределенности измерений, необходимо проанализировать репрезентативность подвыборки. При возникновении сомнений по поводу репрезентативности подвыборки, рекомендуется взять множество подвыборок и провести испытания для оценивания однородности подготовленных образцов, из которых были взяты подвыборки. Если имеется только один образец и тот оказался поврежденным во время испытания, то точность выборки напрямую определить нельзя. Однако должна приниматься во внимание точность измерительной системы. Возможный метод оценки точности выборки – это проведение испытания партии «однородных» образцов на высокую сходимость результатов измеряемой величины и на основе полученных результатов рассчитывается стандартное отклонение выборки.

Порядок расчета неопределенности измерений сводится к следующим этапам: а) составление уравнения измерения, характеризующего измерительный процесс; б)

определение источников неопределенности для каждой входной величины, составление перечня источников и соответствующих им составляющих неопределенности измерений; в) исследование возможности оценивания каждого источника по типу А или по типу В; г) определение предполагаемого закона распределения для неопределенностей типа В; д) расчет стандартных неопределенностей и составление бюджета (таблица) стандартных неопределенностей; е) расчет суммарной и расширенной неопределенности измерения.

Этапы расчета погрешности измерений: а) составление уравнения измерения, характеризующего измерительный процесс; б) определение источников погрешности измерений для каждой входной величины, составление перечня источников и соответствующих им составляющих погрешности измерений; в) формирование исходных данных для расчета погрешности; г) количественная оценка составляющих погрешности, приведенных к одной и той же точке измерительной схемы; д) объединение (суммирование) составляющих погрешности измерений, получение результирующей (суммарной) характеристики качества измерений.

В отличие от привычной погрешности измерений, которая является характеристикой измерительного прибора и приводится в сопроводительной документации, неопределенность сама по себе должна оцениваться в процессе каждого акта измерения. При этом, наряду с погрешностью измерительного прибора, должны учитываться количество отдельных проведенных измерений и разброс их результатов, определяться количество степеней свободы распределения результатов по вероятности их появления, задаваться коэффициентом охвата и т.д. Все это требует серьезной подготовки для грамотного проведения статистических расчетов. Тем более, если математическая модель измерения достаточно сложная и громоздкая, то производные (коэффициенты чувствительности) тоже приходится считать численно. Возможно, также, сама математическая модель измерения не имеет точного аналитического представления, что делает практически невозможным оценивание неопределенности «вручную».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Комарцова Л.Г., Максимов А.В. Нейрокомпьютеры: Учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 400 с.
- [2] Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Пер. с польск. И.Д. Рудинского. М.: Горячая линия -Телеком, 2006. 452 с.
- [3] Звягин Л.С. Методы теории нечетких множеств в аспекте оценки экономической эффективности и инвестиционных проектов в условиях неопределенности// Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. 2015. Т. 2. С. 153-158.
- [4] Звягин Л.С. Новая экономическая реальность и риски в развитии инновационного предпринимательства// Планирование и обеспечение подготовки кадров для промышленно-экономического комплекса региона. 2015. № 1. С. 126-133.
- [5] Фролов А.А., Муравьев И.П. Информационные характеристики нейронных сетей. М.: Наука, 2005, 160 с.