

Отличие фундаментальной метрологии от классической

В.А. Жмудь. ФГБОУ ВПО НГТУ (Новосибирск, Россия)

Abstract: В статье даны основные термины фундаментальной метрологии и отличие ее от классической метрологии. Статья предназначена абитуриентам и студентам младших курсов.

Ключевые слова: Фундаментальная метрология, классическая метрология, измерения, точность, ошибка, прецизионные измерения

ВВЕДЕНИЕ

Метрология – это наука об измерениях.

Задача классической метрологии состоит, как считается в измерении различных физических величин.

Следует помнить, что методов прямых измерений не существует, за редчайшим исключением. Под прямым измерением можно понимать такое действие, которое позволяет непосредственно получить значение искомой величины, без сравнения с эталоном и без необходимых вычислений. Можно привести пример прямого измерения: подсчет целого количества предметов.

Например, если производить подсчет монет по количеству, это можно в какой-то степени считать «прямым измерением», но это не имеет отношения к метрологии.

Подсчет суммы денег, образуемой монетами различных достоинств, уже не будет «прямым измерением», поскольку следует подсчитать отдельно монеты различных достоинств, потом эти количества умножить на достоинства монет, полученные произведения сложить. Тем самым после необходимых «экспериментальных» действий следует осуществить еще и «аналитические» действия, то есть расчеты.

Некоторые исследователи ошибочно относят, например, измерения частоты к прямым измерениям. Тому имеются основания, но, увы, ошибочные. Действительно, если частотой называют количество импульсов за единицу интервала времени, то измерение частоты является прямым подсчетом количества импульсов, которые попали в измерительный интервал, равный единичному интервалу времени. Таким интервалом может быть, например, одна секунда, тысяча секунд и так далее. Количество импульсов даст непосредственно значение частоты, выраженное в Герцах, килогерцах и так далее.

Все же такой метод измерения также не является прямым. В действительности

осуществляется измерение соотношения между измеряемой частотой и частотой некоторого эталона. Действительно, для того, чтобы задать интервал времени, на протяжении которого осуществляется подсчет количества импульсов измеряемой частоты, требуется некоторая эталонная (образцовая) частота. Как правило, это – высокочастотный высокостабильный генератор, с выхода которого импульсы поступают на счетчик – делитель частоты. Например, если используется генератор частоты 10 МГц, для получения интервала длительностью 1 с, требуется разделить эту частоту на 10 000 000. Если генератор формирует частоту с погрешностью, то и измерительный интервал будет сформирован с погрешностью, поэтому приходится согласиться, что частотомер этого типа также не измеряет частоту непосредственно, а осуществляет сравнение измеряемой частоты с эталонной частотой, то есть отыскивает коэффициент пропорциональности измеряемой величины к эталонной величине, или обратный коэффициент.

Косвенным измерением называют измерение тех величин, которые не представляют непосредственного интереса, но позволяют вычислить интересующие величины.

Пример 1. Пусть интерес представляет сила взаимодействия двух тел. К одному из тел можно прикрепить прибор для измерения силы, основанный на законе Гука. По растяжению пружины можно определить силу. На приборе может иметься шкала, прокалиброванная непосредственно в единицах силы. Поэтому у исследователя, использующего данный прибор, может создаться впечатление, что измеряется непосредственно сила. Однако все же измеряется величина растяжения пружины в сравнении с имеющейся шкалой. Сила определяется по этому растяжению, поэтому прибор предварительно следует калибровать, или технология производства пружины такова, что коэффициент растяжения известен заранее с погрешностью в пределах допустимой величины.

Пример 2. Пусть интерес представляет сила взаимодействия двух частиц. Можно зафиксировать траекторию частицы, из которой можно вычислить скорость и ускорение, а из ускорения вычислить силу, зная массу. Отметим, что на каждой операции вычисления могут вноситься математические погрешности. Также могут вноситься погрешности метода.

Кроме того, могут приноситься ошибки концептуальные, которые являются наиболее проблемными. К этому вопросу мы вернемся ниже.

1. КЛАССИЧЕСКАЯ МЕТРОЛОГИЯ

Метрология основана на следующих основных задачах:

1. Формирование эталонов основных физических единиц: времени, длины, массы, и так далее.

2. Создание и аттестация вторичных эталонов этих физических единиц.

3. Разработка, исследование и внедрение методов измерения, которое состоит в сопоставлении измеряемой физической величины с эталоном, результатом которого является получение численной меры соотношения измеряемой величины к эталону.

4. Измерение погрешностей воспроизводства эталонов.

5. Измерение погрешности метода измерения (изучение ошибок сопоставления физических величин и их эталонов)

6. Формирование правил учета всех компонент погрешности в вычислении погрешности результата измерения.

7. Разработка, апробация и верификация методов измерения вторичных величин, являющихся результатом вычисления из величин, получаемых непосредственными измерениями.

Можно отдельно выделить задачу формирования первичного эталона и метода его аттестации и все остальные.

Первую группу задач отнесем к фундаментальной метрологии, остальные – к классической метрологии. Первая задача – строго научная, остальные задачи – научно-технические или даже просто технические, инженерные.

Возможность создания первичного эталона, методы его аттестации и погрешность формируемой эталонной величины не исследуется в классической метрологии. Этими вопросами занимается фундаментальная метрология.

Классическая метрология определяет погрешности, вносимые всеми факторами, действующими в процедуре измерения. Она разделяет статистические погрешности и максимальные. Статистическая погрешность – это ожидаемая «в среднем» погрешность измерения, которая возникнет, если все факторы будут действовать независимо, и не в одну и ту же сторону. Максимальная погрешность вычисляется в предположении, что все факторы, вызывающие погрешность, действуют в одном и том же направлении, например, каждый из них приводит к занижению результата на максимально возможную величину при самых неблагоприятных сочетаниях их действия.

2. ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ МЕТРОЛОГИЯ

Основная задача фундаментальной метрологии может быть сформулирована следующим образом: Требуется оценить погрешность формирования заданных эталонных величин в условиях отсутствия более точных эталонов (стандартов) данных величин. Иными словами, стоит задача аттестации первичных эталонов.

Также к задаче фундаментальной метрологии относится исследование методов сопоставления вторичных стандартов с этим первичным стандартом [1, 2].

Следует различать применяемые для описания свойств первичного стандарта численные характеристики.

Погрешность – отличие формируемой величины от истинного ее значения. Эту величину невозможно измерить никакими способами, поскольку первичный эталон – это наилучшая мера интересуемой величины, все другие методы и средства измерения только хуже этого устройства. Погрешность можно лишь оценить теоретически или исследовать статистически в рамках некоторых гипотез. Погрешность может быть абсолютная или относительная. **Абсолютная погрешность** измеряется в единицах измеряемой величины, **относительная погрешность** равна отношению абсолютной погрешности к самой измеряемой величине (если эта величина не нулевая).

Нестабильность – величина отклонения формируемого значения от своего глобального среднего. Поскольку измерить глобальное среднее также не просто, эту величину также не просто измерить. Практикуют измерения нестабильности за различные интервалы времени, например, за 100, 1000, 10 000 секунд и так далее.

Невоспроизводимость – величина отличия сформированного значения эталонной величины от случая к случаю, от включения к включению. Эту величину также измерить достаточно не просто, но можно ее оценить по величине нестабильности в предположении выполнения некоторых гипотез, например, гипотезы эргодичности, что означает, что осреднение по множеству устройств статистически эквивалентно осреднению по времени сигнала от единственного устройства. Оснований для того, чтобы считать гипотезу эргодичности верной, как правило, не достаточно, но приходится ее принимать за отсутствием лучших подходов к этой проблеме.

Точность – величина, обратная относительной погрешности. Иногда ошибочно отождествляют погрешность и точность, например, утверждая: «Точность составляет десять в минус четырнадцатой степени». Такое определение ошибочно. Следует говорить либо

«Относительная погрешность составляет десять в минус четырнадцатой степени», либо «Точность составляет десять в четырнадцатой степени». Только при такой терминологии «повышение точности» будет соответствовать тому смыслу, который вкладывается в эту формулировку авторами.

Стабильность – аналогично точности, величина, обратно пропорциональная относительной нестабильности.

Воспроизводимость – аналогично величина, обратно пропорциональная относительной невоспроизводимости.

3. ПРИМЕНЯЕМЫЙ МЕТОД АТТЕСТАЦИИ ПЕРВИЧНЫХ ЭТАЛОНОВ

Традиционно для аттестации первичных эталонов рассматривается задача взаимной поверки большого количества идентичных эталонов, называемого в теории вероятности «ансамблем» идентичных устройств.

Решение этой задачи опирается на тот факт, что измерение разницы формируемых эталонами величин может быть сделано с достаточной точностью, за счет того, что в измерительных системах присутствует ограниченная снизу относительная погрешность, а не абсолютная.

Пример 3. Лазерные частотные эталоны формируют сигнал порядка $F_L = 10^{14}$ Гц. Для измерения этой величины с погрешностью не более $\Delta F = 1$ Гц требуется устройство, у которого погрешность была бы не больше. Это соответствует относительной погрешности (то есть отношению абсолютной погрешности к измеряемой величине) порядка $\delta F = \Delta F / F_L = 10^{-14}$. Если указанный эталон является наилучшим на данном этапе развития техники, то не может существовать измерителей частоты с такой погрешностью. Имеется возможность сформировать разностную частоту. Допустим, ее значение должно быть также на уровне $\Delta F = 1$ Гц. Измерять частоту 1 Гц с погрешностью 1 Гц не проблема. Однако в этом случае важно знать знак этой частоты, то есть следует знать, какой из двух сличаемых стандартов частоты формирует частоту большую, чем другой. Более простое решение будет в случае, если мы можем перенести эту разностную частоту на некоторую несущую частоту, которая наиболее удобна для измерений. Это может быть любая частота в диапазоне от 1 КГц до 100 МГц, поскольку измерения частот в этом диапазоне осуществляются наиболее простым путем. Например, эта частота равна $F_0 = 1$ МГц. Измерение такой частоты с погрешностью $\Delta F = 1$ Гц уже не представляет никакой проблемы. Относительная погрешность для такого измерения составляет всего лишь $\delta F = \Delta F / F_0 = 10^{-6}$. Имеются частотомеры, погрешность которых существенно ниже.

Таким образом, задача измерения разницы формируемых двумя эталонами величин может быть решена, если возможно выполнение следующих шагов: а) формирование разностной частоты с одновременным добавлением несущей частоты, результат которого характеризовался бы погрешностью, как минимум, на порядок меньше, чем требуемая погрешность измерения; б) измерение результата с погрешностью, не превышающей требуемый максимум. Эти условия выполняются, поэтому измерение разностной частоты двух частотных эталонов в целом обеспечивается с приемлемой точностью в требуемом частотном диапазоне. Некоторые детали этих измерений требуют дальнейших научных исследований. Это относится к статистике этих разностных частот при осреднении за различные временные интервалы, от минимальных (0,001 с и менее) до максимальных (1000 с и более).

4. О КОНЦЕПТУАЛЬНЫХ ОШИБКАХ

Концептуальные ошибки – это ошибки, которые вносит концепция (теория) измерения. Бывает, что авторы, чрезвычайно тщательно анализирующие все методические и инструментальные источники ошибки, не замечают концептуальной ошибки.

По некоторым вопросам можно утверждать, что наука до сих пор не имеет достаточных оснований для того, чтобы сделать однозначный выбор в пользу той или иной теории (точнее сказать «гипотезы»), а без этого концептуальные ошибки неизбежны.

Пример 4. Можно лазерными методами измерять изменения длины двух плеч интерферометра, и обратить внимание на то, что в результатах измерения присутствует колебания с суточным периодом и с полусуточным периодом [3]. Естественно предположить, что эти колебания вызваны периодическими изменениями ориентации Земли относительно Солнца. Однако следует учесть, что могут также действовать и другие факторы. Например, установка для измерений питается от электросети, которая питает также находящийся неподалеку поселок. Потребление электроэнергии жителями также имеет суточные колебания: в темное время суток она потребляется для освещения, ночью оно резко снижается, также во время приготовления пищи потребление возрастает. Эти периодические изменения нагрузки строго связаны со временем суток. Если генератор недостаточно мощный, или если подводящие проводники обладают недостаточной электропроводностью, то эти периодические колебания потребления энергии могут повлиять на напряжение питания лазерной системы. В свою очередь изменения напряжения питания лазерной системы может вызвать небольшие колебания частоты

излучения, которые также скажутся на результатах измерений. Поэтому исследователям необходимо тщательно исследовать все возможные причины изменений измеряемых величин. Детальные исследования позволили исключить этот фактор из измерений.

Пример 5. При измерении частоты счетным методом, например, за время, равное 100 с, можно получить только целое количество периодов измеряемой частоты. Отличие на один импульс даст отличие частоты на величину 0,01 Гц. Из этого можно заключить, что результаты измерения будут дискретными с шагом в 0,01 Гц. Это – методическая погрешность, которая не имеет ничего общего с природой измеряемой физической величины. Однако эта дискретность присуща любому частотомеру, который использует этот метод измерения. Поэтому можно ошибочно предположить, что указанная дискретность является неотъемлемым свойством частоты как таковой, то есть предположить, что частота принципиально изменяется дискретно. Если время измерения увеличить в 10 раз, погрешность снизится в 10 раз. И наоборот, если время измерения уменьшить в 10 раз, погрешность возрастет в 10 раз. Тем самым можно указать, что произведение погрешности на время осреднения является константой, то есть можно усмотреть некий «принцип неопределенности» для измерения частоты. На самом деле это может относиться только к методике измерения. При другой методике эта погрешность может существенно снижена. В частности, при использовании тех же измерительных интервалов погрешность может быть снижена в 1000 раз и более [4, 5].

Пример 6. Известно, что траектория заряженных частиц, движущихся с релятивистскими скоростями (то есть со скоростями, соизмеримыми со скоростью света), такова, что если рассчитать ускорение, в нем появляется релятивистский коэффициент. Этот коэффициент принято ставить в знаменатель и относить к массе, а силу взаимодействия принято считать независимой от скорости частицы. В таком предположении масса частицы, скорость которой равна скорости света, равна бесконечности. Но имеет право на существование и другая гипотеза, которая состоит в том, что данный коэффициент следует относить к силе. В этом предположении масса подвижной частицы остается неизменной, а сила ослабляется; в пределе при скорости частицы, равной скорости света, сила электромагнитного взаимодействия падает до нуля. С позиции эксперимента обе гипотезы равноправны [6].

Пример 7. По траектории частицы можно вычислить ее скорость, если знать время существования этой частицы. Если полученная скорость оказывается выше, чем скорость света,

то имеют право на существования две гипотезы. Первая гипотеза, принятая в теории относительности, утверждает, что при движении частицы с релятивистской скоростью время в системе, связанной с этой частицей, замедляется. Из этого может следовать, что при том же самом времени жизни частицы фактическое время ее существования в неподвижной системе отсчета увеличится, поэтому якобы действительная скорость частицы отнюдь не превышает скорость света. Вторая гипотеза, которая теорией относительности отвергается, состоит в том, что данный эксперимент доказывает, что скорость частицы превышает скорость света. Этот эксперимент согласно второй гипотезе опровергает утверждение теории относительности о том, что частица не может двигаться со скоростью большей, чем скорость света. Проблема состоит в том, что никакой эксперимент в классе рассмотренных в этом примере экспериментов не может дать основания в пользу выбора первой или второй гипотезы. Эти обе гипотезы имеют право на существование в классе рассмотренных экспериментов [6].

Таким образом, мы видим, что результат измерения существенно зависит не только от погрешностей первичных эталонов, погрешностей сличения вторичных эталонов с первичными, погрешностей сличения измеряемой величины со вторичными эталонами, погрешностей расчета, но также и от выбранной гипотезы о механизмах исследуемого явления.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] В.А.Жмудь. Разработка автоматизированной системы адаптивного управления спектрометром сверхвысокого разрешения и мобильным стандартом частоты на его основе. - Гос. научно-техническая программа «Фундаментальная метрология» - Сб. отчетов за 1996 г. Новосибирск, 1996, с.158-162.
- [2] В.А.Жмудь. Автоматизированные системы управления полупроводниковыми лазерами для прецизионной спектроскопии. - Гос. научно-техническая программа «Фундаментальная метрология» - Сб. отчетов за 1997 г. Новосибирск, 1998, с.173-177.
- [3] Орлов В.А., Фомин Ю.Н., Семибаламут В.М., Терешкин Д.О., Жмудь В.А. Комплекс для измерения сверхмалых приливных деформаций скальных пород на основе He-Ne-лазера. Автоматика и программная инженерия. 2014. № 3 (9). С. 54–65. НГТУ, ИЛФ, Геофизическая служба СО РАН (Новосибирск, Россия).
- [4] Патент РФ N 2210785 (приоритет от 13.07.01.) Цифровой частотомер. В.А. Васильев, В.А. Жмудь, А.М. Гончаренко. Оpubл.: Гос. реестр изобретений РФ. Бюлл. N23, 20.08.03. G01 R25/00, H03 D13/00
- [5] А.М. Гончаренко, В.А. Жмудь. Цифровой частотомер. Патент РФ на изобретение

N2278390. G01R 23/02. Оpubл. Бюлл. N17, от 20.06.06.

E-mail: oao_nips@bk.ru

- [6] В.А. Жмудь. Теорема Котельникова-Найвиста-Шеннона, Принцип Неопределенности и Теория Относительности. Автоматика и программная инженерия 2014. №1 (7). С. 127–136.



Вадим Жмудь – заведующий кафедрой Автоматики в НГТУ, профессор, доктор технических наук, автор 200 научных статей. Область научных интересов и компетенций – теория автоматического управления, электроника, лазерные системы, оптимизация, измерительная техника.

The Difference between Basic Metrology and Classical One

VADIM ZHMUD

Abstract: The paper gives the main determinations of basic metrology and its difference from the classical one. The paper is addressed to abiturients and students of the first courses.

Key words: Basic metrology, classical metrology, measurements, accuracy, error, precision measurements