

Метрология: где спотыкаемся?

Адлер Юрий, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

В статье представлены основные вехи развития науки метрология, выявлены спорные и сложные моменты развития этого направления научного знания. Подробно описаны цели и задачи, которые сегодня стоят перед метрологией, раскрываются прикладные аспекты своеобразного методологического кризиса в метрологии. Представлен анализ комплекса вопросов, связанных с измерениями, что наглядно подтверждает кризис в прикладной метрологии.

Рассмотрены вопросы, связанные с процессом проведения измерительных процедур, а также представлены алгоритмы выполнения измерений в соответствии с правилами и процедуры обслуживания (поверки) оборудования. Операции измерения представляются системно, то есть с учетом сложных отношений эталонов, статистических выборок и пр. Статья изобилует многочисленными историческими примерами и интересными замечаниями.

В статье рассмотрены такие важные аспекты, как совместное обучение, вопросы выработки единой терминологической базы и разработки адекватных статистических баз. Статья снабжена рабочими кейсами вычислений значимых для анализа величин. Детально рассматриваются вопросы, связанные с мониторингом изменений характеристик измеряемой системы. В статье уточняются аспекты этой деятельности как элемента менеджмента качества. Также рассмотрены вопросы планирования эксперимента в сфере метрологии. Статья носит полемический характер.

Делается вывод, что метрология – на пути больших перемен. Эти переменны витают в воздухе, прослеживаются при решении различных задач. Цель статьи описать состояние, которое сейчас переживает метрология, обозначит ключевые точки и спорные моменты. А по сути – смоделировать первые шаги, которые позволят переменам в метрологии осуществиться.

Ключевые слова: командная работа; неопределённость и статистические модели; шкалы; стандартизация и непрерывное совершенствование; мониторинг измерительных систем; пробоотбор; оптимизация

Metrology: where do we stumble?

Adler Yuri, National Research Technological University «MISIS»

The article presents the main milestones in the development of the science of metrology, identifies the controversial and difficult aspects of the development of this area of scientific knowledge. The goals and objectives of metrology are described in detail, the applied aspects of a peculiar methodological crisis in metrology are revealed. An analysis of a set of issues related to measurements is presented, which clearly confirms the crisis in applied metrology.

Issues related to the process of carrying out measuring procedures are considered, and algorithms for performing measurements in accordance with the rules and procedures for servicing (checking) equipment are presented. Measurement operations are presented systematically, that is, taking into account the complex relationships of standards, statistical samples, etc. The article is replete with numerous historical examples and interesting remarks.

The article considers such important aspects as joint training, issues of developing a single terminological base and developing adequate statistical databases. The article is supplied with working cases of calculations of significant values for the analysis. The issues related to monitoring changes in the characteristics of the system being measured are considered in detail. The article clarifies aspects of this activity as an element of quality management. The issues of experiment planning in the field of metrology are also considered. The article is polemical.

It is concluded that metrology is in the way of big changes. These changes are in the air, can be traced in solving various problems. The purpose of the article is to describe the state that metrology is currently experiencing, identify key points and controversial points. And in essence - to simulate the first steps that will allow changes in metrology to be realized.

Keywords: teamwork; uncertainty and statistical models; scales; standardization and continuous improvement; monitoring of measuring systems; sampling; optimization

Метрологія: де спотикаємося?

Адлер Юрій, Національний дослідницький технологічний університет «МІСіС»

У статті представлені основні віхи розвитку науки метрологія, виявлені спірні і складні моменти розвитку цього напрямку наукового знання. Докладно описані цілі і завдання, які сьогодні стоять перед метрологією, розкриваються прикладні аспекти своєрідного методологічного кризи в метрології. Представлений аналіз комплексу питань, пов'язаних з вимірюваннями, що наочно підтверджує криза в прикладній метрології.

Розглянуто питання, пов'язані з процесом проведення вимірювальних процедур, а також представлені алгоритми виконання вимірювань відповідно до правил і процедури обслуговування (перевірки) обладнання. Операції вимірювання представляються системно, тобто з урахуванням складних відносин еталонів, статистичних вибірок тощо. Стаття рясніє численними історичними прикладами і цікавими зауваженнями.

У статті розглянуті такі важливі аспекти, як спільне навчання, питання вироблення єдиної термінологічної бази та розробки адекватних статистичних баз. Стаття забезпечена робочими кейсами обчислень значущих для аналізу величин. Детально розглядаються питання, пов'язані з моніторингом змін характеристик вимірюваної системи. У статті уточнюються аспекти цієї діяльності як елемента менеджменту якості. Також розглянуті питання планування експерименту в сфері метрології. Стаття носить політичний характер.

Робиться висновок, що метрологія - на шляху великих змін. Ці зміни витають в повітрі, простежуються при вирішенні різних завдань. Мета статті описати стан, яке зараз переживає метрологія, позначити ключові точки і спірні моменти. А по суті - змоделювати перші кроки, які дозволять змін в метрології здійснитися.

Ключові слова: командна робота; невизначеність і статистичні моделі; шкали; стандартизація і безперервне вдосконалення; моніторинг вимірювальних систем; пробовідбір; оптимізація

«На граните я строил – рухнуло,
На песке я построил – рухнуло,
Теперь начну с печного дыма».

Юлиан Тувим

Введение.

Измерения нужны всем. Всегда. Без них не обойтись. А метрология – это наука о том, что такое измерение, как оно устроено, какими свойствами обладает. А ещё – это организация практики разработки методов и инструментов измерения, их использования и интерпретации полученных результатов. Метрология стоит на пересечении бесчисленных дорог, где ей приходится обслуживать решение самых разнообразных задач, учитывать многочисленные требования самых разнообразных операторов процессов. Причём, каждый из участников этих многочисленных взаимодействий сам находится в состоянии развития и не представляет стабильную структуру. Такую ситуацию естественно можно охарактеризовать как кризис прикладной метрологии.

Давайте посмотрим, чем же конкретно занимается метрология. Всё начинается,

как обычно, с потребности человеческого общества в получении информации о характеристиках некоторого объекта или явления. Сами характеристики бывают разными. Некоторые из них, такие, например, как форма или размеры, можно определять непосредственно, а чтобы узнать, сколько в данном предмете содержится железа или меди, надо уже проводить анализ. Но прежде, чем измерить что-либо, надо иметь метод измерения и измерительный прибор или систему. Если они уже есть – прекрасно, а если нет, то нам предстоит изобрести метод и придумать прибор с такой функцией. К этому ещё необходимо приложить методологию использования прибора (инструкция по применению, пропись), а также правила интерпретации полученных результатов.

Что значит: «изобрести метод»? Мы привыкли измерять длины или расстояния в метрах, или в производных метра. Но как

измерить, например, расстояние от Земли до Луны? Здесь нужен метод. И люди придумали посылать на Луну лазерный луч, ждать его отражения от Луны и возвращения обратно. Тогда можно поделить общее время движения луча пополам и умножить на скорость его распространения. Так мы получим расстояние. А как узнать длину нано-объекта, его вообще можно увидеть только в микроскоп и при очень большом увеличении? Ну что ж, можно, например, сфотографировать изображение в микроскопе, измерить объект на изображении линейкой, а результат разделить на увеличение микроскопа. Вот и будет размер объекта.

Конечно, это сильное упрощение ситуации. Но главная мысль ясна: мы должны либо пользоваться методом, который кто-то изобрёл до нас, либо мы вынуждены изобретать свой собственный метод, даже в таких «простых» случаях, как измерение линейных размеров. Метод, которым мы пользуемся по «историческим» причинам, никогда не бывает единственно возможным. Этот факт обеспечивает условия для прогресса, для непрерывного совершенствования, но и одновременно создаёт некоторую неопределённость.

Кроме метода, как мы знаем, нужен ещё измерительный прибор или измерительная система. Это обычно некоторая техническая система, которая тиражируется, если речь не идёт о каких-то уникальных системах, таких как Большой андронный коллайдер. Школьные линейки производятся ежегодно тысячами тиражами. Тиражирование измерительных систем создаёт очередную метрологическую проблему. Это проблема воспроизводимости результатов. Естественно хотеть, чтобы два разных человека, работая с двумя разными экземплярами измерительной системы, при измерении одного и того же объекта получали сопоставимые результаты. Иначе в измерениях не будет смысла. Если для школьных линеек это не слишком критично, то для реальных измерений это чрезвычайно важно. Значит, к производству тиражируемых измерительных систем должны предъявляться жёсткие требования. Одним из самых ярких примеров таких «жёстких» измерений служат измерения времени часами.

Таким образом, измерительная система нуждается в обслуживании и в правилах использования – в алгоритме работы. Конечно, как и в случае метода, выбор принципа работы и конструкции измерительной системы никогда не бывает единственно возможным. Достаточно вспомнить эволюцию часов от солнечных, песочных и водяных к механическим, а затем и к электронным вариантам.

Итак, мы обнаружили, что тиражируемые измерительные системы порождают неопределённость, связанную с выбором конкретного экземпляра измерительной системы. Более того, они нуждаются в обслуживании. Механические часы, например, нам приходится заводить и чистить, а в электронных – менять батарейки. И от качества обслуживания, как правило, зависит качество работы. В этой связи возникает масса вопросов. Как узнать, с какой частотой надо обслуживать данную измерительную систему? Должна ли эта частота меняться во времени (например, из-за старения системы)? Как узнавать об отказах и поломках системы и, следовательно, как организовать её ремонт или замену? Как оценивать её надёжность? Как, наконец, организовать менеджмент систем такого рода? Особенно, если речь идёт о широкомасштабных массовых измерениях, скажем, в заводской лаборатории.

На некоторые из таких вопросов есть ответы. Так, для проверки и настройки (наладки) системы существуют метрологические процедуры, такие как юстировка и калибровка. Для организации ремонта вполне годится технология «Всеобщего управления оборудованием» (TPM).

Следующий шаг, который предстоит совершить на пути к реализации измерения – это алгоритм использования измерительной системы, то, что мы называли инструкцией по применению, а в аналитической химии иногда называют «прописью». Собственно, это описание процесса измерения, которое должно быть полным, точным и, по возможности, не допускающим различных толкований. Конечно, такой процесс надо ещё разработать, и он должен быть оптимальным в смысле какого-нибудь заранее заданного критерия, например, времени или затрат. Это стандартная задача планирования экс-

периментов. После того, как алгоритм разработан, его надо стандартизовать, если мы хотим, чтобы им могли пользоваться разные люди, работающие на разных экземплярах измерительных систем, в разных точках земного шара. Иначе нет никакой надежды на воспроизводимость. И хотя он оптимален, стандартен и воспроизводим, всё равно, он никогда не будет единственно возможным.

Теперь пора заметить, что любое измерение – это сравнение, результаты которого мы хотим выразить некоторым определённым образом, обычно, с помощью чисел. Точнее, чтобы получить искомое число, нужны две системы с отношениями: эмпирическая и числовая, между которыми должна быть установлена функциональная связь. В математической теории измерений обе системы, вместе с функциональной связью между ними, образуют объект, который называется кортежем, а в метрологии кортеж называется шкалой. Но это не шкала измерительного прибора, просто два разных, хоть и отчасти связанных объекта, получивших по воле случая одинаковые названия. Все реальные действия и события происходят в эмпирической системе. Именно здесь происходит сравнение, результатом которого и служит измерение. Что же с чем сравнивается? Измерительная система предназначена для того, чтобы генерировать сигнал (информацию), вырабатываемый при её взаимодействии с объектом измерения. Сам по себе этот сигнал мало что говорит, пока его не сравнили с некоторым эталоном («опорным значением»). Вот различие между сигналом и эталоном и есть то, что мы хотим получить. Но результат мы хотим получить в числовом виде. А числа как раз находятся в числовой системе с отношениями. Ясно, что эта система должна принять структуру, максимально близкую к структуре эмпирической системы. Для этого и нужна функция, связывающая эмпирическую и числовую системы. При этом, важно иметь в виду, что выбор числового значения, скажем, для эталона, с формальной точки зрения совершенно произволен и служит предметом конвенции, то есть, договора. Это вопрос удобства и привычки, так что «печной дым» кажется слишком жёстким основанием.

Эталоны или стандартные образцы создают серьёзную проблему, поскольку их надо разрабатывать, измерять с заданной точностью, хранить и воспроизводить, в надежде сохранить во времени их ключевые свойства.

Получив наконец вожаемый результат измерения, мы хотим понять, какими же свойствами он обладает. Какова же неопределённость, связанная с ним? Насколько он надёжен? Меряет ли он именно то, что мы хотели измерить? Пока ответы на подобные вопросы не будут получены, мы, в сущности, не можем воспользоваться результатом трудов для принятия решений. Ситуация усложняется ещё и тем, что редко измерения бывают прямыми, как, например, измерение длины карандаша линейкой. Гораздо чаще измерения бывают косвенными, то есть, измеряется несколько величин, которые подставляются в некоторую формулу, и уже из неё находят искомое. Всё, что связано с оценением свойств измерений, обычно относится к прикладной математической статистике. Взаимодействие метрологии со статистикой – одна из ключевых проблем.

Ситуация усугубляется ещё и тем, что редко в распоряжении измерителя оказывается весь объект измерения. Часто приходится довольствоваться пробой или образцом, особенно, когда речь идёт об измерениях, связанных с составом материальных систем. Тогда во всей красе появляется статистическая теория выборок, плюс проблема подготовки пробы или образца к анализу (измерению). Ясно, что в таких случаях надо ещё каким-то образом распространить результаты измерения выборки (то есть образца или пробы) на весь объект, представляющий интерес, да ещё оценить неопределённость, связанную с таким обобщением. Наконец, стоит помнить, что сами измерения могут быть в некоторых случаях связаны с разрушением объекта, что делает в таком случае выборочные методы неизбежными.

Таким образом, мы бегом пробежали по всем ключевым этапам добычи результатов измерений и теперь готовы поговорить о трудностях и путях их преодоления.

Командная работа. Задачи, которые предстоит решать в процессе получения результатов измерений, столь многообразны, сложны

и так существенно могут повлиять на общий результат, что трудно себе представить, чтобы один человек мог решать их на требуемом уровне, причём постоянно. Ясно, что это задача команды, часто достаточно большой и состоящей из специалистов в разных областях теории и практики. Конечно, это не большая новость, и в реальной работе участвуют разные специалисты, например, по наладке измерительного оборудования и по самому процессу измерений. Как правило, они работают «каждый сам по себе», не вмешиваясь в работу друг друга. Между тем сами решаемые ими задачи обычно сильно переплетены и при выполнении одной из них важно учитывать ход дел в решении другой. Исходя из этого, видится вполне правдоподобным утверждение, что их совместная работа приведёт к лучшим результатам, чем автономная.

Но это гораздо легче сказать, чем сделать. Действительно, эти люди будут плохо понимать друг друга. Они ведь говорят на разных языках. Нужны большие усилия, чтобы научить их работать вместе. Первое, что для этого нужно, это создать климат открытости и доброжелательства в коллективе. И это – главная цель менеджмента, во всяком случае на первом этапе. Тогда возникнет основа для совместного обучения команды.

Совместное обучение команд. Оно потребует сначала для запуска совместной работы команды, а потом и постоянно, в ходе работы. Для начала важно, чтобы каждый видел и понимал весь процесс, тогда ему будет гораздо яснее и собственная роль, и собственное место в общем деле. Благодаря этому станет яснее, что можно попытаться улучшить в работе данного члена команды, чтобы облегчить работу соседа по логической цепочке задач. На языке менеджмента это называется совместным построением блок-схемы бизнес-процесса для данного измерения. Опыт показывает, что здесь мы имеем дело с весьма ответственным и очень трудоёмким процессом. Вместе с тем он, вместе с общей теоретической основой, служит прекрасным поводом для совместного обучения. Даже при высокой степени автоматизации измерительного процесса, нам всё равно важно понимать, как он функционирует, хотя бы потому, что иначе мы не сможем его починить в случае поломки

или отказа.

Конечно, сам процесс работы стоит рассматривать как источник информации для обучения команды. Для того, чтобы из процесса извлекать знания, важно систематически подвергать его рефлексии. Это неизбежно будет вести к углублению знаний о процессе и об обстоятельствах, в которых он протекает. Результат процесса измерения сам по себе, конечно, важен, но недостаточен для эффективного управления. Важно ещё систематически извлекать из процесса нечто, что позволяет команде чему-то научиться. А также и возможность получать в ходе работы удовольствие от самого процесса, и от взаимодействия с людьми, прежде всего, внутри команды.

Все эти усилия окупятся сторицей благодаря тому, что добытая в процессе информация будет систематически использоваться для поиска возможностей улучшения рабочего процесса как такового.

Общая терминология. Одно из главных препятствий в процессе обучения связано с тем, что в разных областях науки и практике одни и те же или близко родственные понятия часто обозначаются разными терминами. Наиболее известный пример – это статистический термин «ошибка» и метрологический термин «погрешность», которые используются для одного и того же понятия. По нашему мнению, такая ситуация нетерпима, поскольку неизбежно будет порождать непонимание и неверную интерпретацию. Любопытно, что это явление существует только на русском языке. Но в остальных европейских языках это понятие обозначается во всех случаях одним и тем же словом, например, «error» по-английски, «erreur» по-французски, или «die Fehler» по-немецки.

Не ясно, как разрешить эту проблему, но, если мы не найдём решения, то победителей не будет: проиграют все. Получается, что выработка общей терминологии – одна из важных задач обучения команды.

Неопределённость против «нормальности». В 19 и начале 20-го века, когда складывались методы статистической обработки результатов измерений, считалось непреложным, что результаты любых измерений – это случайные величины, подчиняющиеся нормальному распределению (распределению Гаусса). Такое

представление родилось ещё во времена Гаусса. Когда астрономы попросили его помочь в обработке результатов траекторных измерений, он считал, что симметричные отклонения результатов повторяющихся наблюдений от центра их группирования с быстрым убыванием вероятности по мере удаления от центра – это закон природы. Он видел свою задачу в том, чтобы найти формулу, математическую модель, как мы сказали бы теперь, которая бы правильно и по возможности точно описывала поведение такой случайной величины. Ему это прекрасно удалось, и мы имеем теперь простые и удобные формулы и методы расчёта на все случаи жизни.

И тут произошла подмена и, думается, вовсе не случайная. Те, кто собирался пользоваться формулами для нормального распределения, искренне полагали, что Гаусс открыл именно закон природы, которым очень удобно пользоваться. И они пользуются этим законом по сей день. Но теперь – с переменным успехом. То, что нормальный закон не универсален, было ясно всегда, и конечно это понимал Гаусс, хотя бы потому, что существуют не только случайные величины с непрерывными областями определения, для которых и предназначен закон Гаусса, но есть и случайные величины с дискретными областями определения, например, распределённые по закону Бернулли. Формально нельзя описать распределение дискретной случайной величины законом Гаусса, но с ростом числа наблюдений ошибка, связанная с заменой дискретного распределения нормальным, быстро стремится к нулю, что делает такую замену (аппроксимацию) вполне разумной. Правда, для этого надо всё-таки иметь некоторое число наблюдений.

Уже в самом начале 20-го века начали среди профессионалов появляться некоторые сомнения в безгрешности нормального закона. Первым был, видимо, Госсет, вынужденный писать под псевдонимом «Стьюдент», который в 1906 году обнаружил, что при очень малом числе наблюдений хвосты нормального закона поднимаются, то есть, относительно большие отклонения от центра становятся относительно более вероятными. Для описания такого распределения с «тяжёлыми» хвостами он построил распределение, которое теперь

называют распределением Стьюдента. Да, как можно догадаться, с ростом числа наблюдений различия между распределением Стьюдента и нормальным распределением быстро исчезают. Но всё-таки «святость» нормального распределения была поколеблена.

Кроме того, ещё в 1837 году Пуассон предложил дискретное распределение, названное позже его именем, для относительно редких событий, таких, например, как число распадов некоторого изотопа в единицу времени, которые измеряет счётчик Гейгера. Это был ещё один шаг в сторону разрушения мифа о нормальности всех распределений. Эта тенденция ещё усилилась, когда выяснилось, что есть распределение, которое нормально не для самих измеряемых величин, а для их логарифмов, так называемое «логарифмически нормальное» распределение. Оно имеет сильно вытянутый правый хвост и хорошо описывает, например, распределение по размерам кусков некоторой горной породы после её измельчения в шаровой мельнице.

Пример логарифмически нормального распределения надоумил людей искать такие преобразования исходных данных, которые делали бы распределение нормальным. Оказалось, что такие преобразования существуют почти всегда, но радость этого открытия была не долгой, поскольку вскоре выяснилось, что обратное преобразование результатов ведёт к весьма нежелательному явлению: статистическому смещению оценок. Единственное спасение – не делать обратных преобразований, а научиться говорить на языке преобразованных данных. А для этого обычно приходится создавать этот язык. Такая работа тянет на Нобелевскую премию, как это было, например, в близкой ситуации в 1911 году со Сванте Аррениусом, который с помощью преобразования координат создал язык формальной кинетики химических реакций.

Постепенно стало понятно, что есть три пути решения проблемы нормальности: верить, что нормальность в конкретном случае существует, проверять гипотезу о нормальности статистическими методами или искать альтернативные варианты. Первый путь трудно назвать научным, но у него есть известные

преимущества. Ни о чём не нужно беспокоиться, не нужны никакие советники или консультанты, есть шанс, что так и будет на самом деле. Ведь центральную предельную теорему теории вероятностей никто не отменил. А она утверждает, что при некоторых условиях смесь случайных величин с любыми распределениями будет описываться нормальным распределением. Другое дело, что её условия трудно проверить эмпирически. Второй путь тоже не усеян розами. Конечно, техническая возможность проверить гипотезу о нормальности распределения у нас благодаря усилиям Карла Пирсона существует. Но беда в том, что такая проверка никогда не даёт однозначный ответ. Можно лишь оценить вероятность того, что собранные данные не противоречат гипотезе нормальности. Эта вероятность растёт довольно медленно с ростом объёма выборки, но никогда не достигает единицы. Кроме того, из того, что наши данные не противоречат гипотезе нормальности, вовсе не следует, что они не противоречат ещё каким-нибудь другим законам распределения. Как же с этим быть? Это не ясно. Остаётся третий путь: искать другие законы распределения в надежде, что один из них будет хорошо соответствовать как теоретически, так и практически изучаемой ситуации. Здесь в свою очередь возможны две ситуации. Либо мы заранее знаем закон распределения, и этот закон – не нормальный, либо мы ничего не знаем. В первом случае Рональд Фишер приготовил нам метод максимума правдоподобия, позволяющий, обычно с помощью вычислительной процедуры, получить все интересующие нас оценки, прежде всего оценку неопределённости, связанной с полученным результатом. Правда, не ясно, откуда можно взять информацию о законе распределения. Второй случай приводит нас к поиску подходящего закона среди множества законов некоторого семейства распределений, например, среди распределений Пирсона. В сущности, нам приходится вернуться к проверкам статистических гипотез, теперь уже о соответствии некоторого распределения имеющимся экспериментальным данным. Исчезает теоретическая база, позволяющая придавать результатам какой-то физической смысл, как-то их интерпретировать, как это было в случае нормального распределения, да и любого заранее

известного распределения. Всё это может и не понадобиться, если есть хорошая идея относительно подходящего закона распределения. Вообще вся эта возня с проверками гипотез о законах распределения уводит нас в сторону от нашей главной цели. А она заключается в том, чтобы оценить измеряемую величину. Потребители результатов наших измерений, однако, настаивают, что им обязательно нужна ещё и оценка неопределённости. Они говорят, что $5 \pm 0,5$ – это что-то в районе пяти. А 5 ± 50 – это бог весть что. Если получится 5 ± 5 , то это какое-то положительное число, видимо, меньшее, чем 10. Поэтому число 5 само по себе практически ничего не говорит и не помогает принимать решения. А тогда зачем оно нужно?

Но не стоит уповать на отыскание заветного закона. В нашем распоряжении есть и другие хитрости. Например, байесовский подход. Действительно, можно притвориться, что нам ничего не известно, и воспользоваться любым законом, например, равномерным или нормальным. Тогда можно действовать по шаблону, но время от времени проверять гипотезу о том, соответствует ли принятое распределение накопленным новым экспериментальным данным. Суть байесовского подхода, предложенного Томасом Байесом в Англии и опубликованного в 1763 году, заключается в том, что «априорная» модель, та, что исследователь считал наиболее вероятной, «правильной» до начала сбора данных, под влиянием новой экспериментальной информации превращается, в соответствии с алгоритмом Байеса, в «апостериорную» (послеопытную) модель, которая может отличаться от априорной, и если это отличие статистически значимо, то от старой опытной модели придётся отказаться. И если эта старая модель была, например, моделью нормального распределения, то это будет означать, что она противоречит собранным данным. Тогда мы вынуждены извиниться, сказать, что мы погорячились и выдвинуть новую априорную модель. Так круг замыкается и всё повторяется с самого начала. Тут стоит сделать несколько замечаний. Любая априорная модель рано или поздно будет отвергнута под напором новых экспериментальных данных. Вопрос

только в том, хватит ли наших жизней, чтобы дождаться этого рокового момента или расхлёбывать, как обычно, придётся нашим потомкам? Каждая следующая априорная модель с необходимостью будет сложнее предыдущей, поэтому её будет трудней придумать и сложнее опровергнуть. И здесь мы сталкиваемся с концепцией «верификации» и «фальсификации» гипотез, предложенной Карлом Поппером ещё в 20-м веке. А в более широком контексте речь здесь идёт о том, что Томас Кун, тоже ещё в 20-м веке, назвал «Структурой научных революций». Вопрос в том, как новое знание, взаимодействуя со старым знанием, порождает революционные представления, меняющие парадигму развития науки, а, следовательно, и парадигму наших представлений о мире. Одно время в метрологических исследованиях было модно использовать байесовский подход, но, кажется, что эта мода уже сходит на нет, хотя ещё и остаются отдельные приверженцы.

Как видим, байесовский подход, хоть и возможен в принципе, не сулит нам райских куш. Поэтому не удивительно, что нашлись люди, которые задумались о том, нельзя ли вообще обойтись без информации о законе распределения? С некоторыми оговорками ответ на этот вопрос получился утвердительным. Так возникла непараметрическая статистика. Первая работа, которая привела к созданию непараметрической статистики, была опубликована в 1945 году американским инженером-химиком Френком Уилкоксоном. Ему было уже 52 года, и это была практически его первая публикация в области статистики. Вся вторая половина 20-го века ушла на построение теории, в которой непараметрическая статистика представлена как антипод классической. При этом стала ясна такая любопытная ситуация. Если представить себе, что в результате измерения возникает случайная величина с нормальным распределением, и в этом нет сомнений, то построение оценки неопределённости в рамках классической модели даст значения, например, доверительных интервалов, которое окажется более, чем в три раза уже, чем полученные для тех же данных значения непараметрических интервалов (это следует из так называемого неравенства Бахаду). Но если есть сомнения в верности клас-

сической модели, то непараметрическая модель по-прежнему будет давать «разумную» оценку неопределённости, в то время как классическая оценка может отличаться как угодно сильно. Значит, у нас есть выбор между «синицей в руках» и «журавлём в небе». Вот почему на практике всё чаще предпочитают непараметрические оценки, особенно в областях, где представление о нормальности изначально выглядит сомнительно, например, в медицинских исследованиях. Думается, что в метрологии похожая ситуация.

И всё-таки трехкратная разница в оценках неопределённости – это слишком много. Нельзя ли попробовать её как-то уменьшить? В 1950 году британский химик Джордж Бокс, переехавший в США и переквалифицировавшийся в прикладного статистика, ввёл понятие о «робастных» оценках. Идея была очень простая: нормальная теория и непараметрический подход – две крайности, поэтому между ними такая большая разница. Есть смысл попробовать найти такие методы построения оценок, в том числе и неопределённости, которые бы не были чувствительны к некоторым нарушениям некоторых предпосылок. Такие «устойчивые» оценки не будут бояться, скажем, нарушения нормальности, конечно в известных пределах. Так возникла теория робастной статистики. Здесь, как правило, результат не удаётся получить «голыми руками» – приходится интенсивно использовать компьютер, к чему компьютер уже давно привык. Американский статистик Джон Тьюки построил такую устойчивую оценку среднего значения, которую назвал «гофер-оценкой». Она не боится почти никаких нарушений, как Ноев ковчег не боится всемирного потопа, поскольку, как свидетельствует Библия, он построен из дерева «гофер».

Таким образом, бегло рассмотрев основные ситуации и возможные решения, мы видим, что выбор модели наших данных, то есть в данном случае закона распределения случайной величины, измерения которым мы занимаемся, представляет значительные трудности и часто требует консультации профессионального статистика. Это один из важных аргументов в пользу командного подхода к измерениям. Совместное обучение команды позволит со временем всем участникам увидеть общую картину и понимать советы статистика-профессионала.

В 1987 году увидела свет первая версия международного стандарта ИСО 9000. Она содержала в себе призыв делать любое действие безупречно правильно и безошибочно. А тут какие-то ошибки, как их не назови, да ещё в измерениях, без которых качество немислимо. В детерминированных головах членов ТК 176 ИСО, разработавшего стандарт ИСО 9000, это не совмещалось. Думается, что это противоречие стало одним из побудительных мотивов для разработки концепции «неопределённости». Само это слово ввёл в науку, видимо, Вернер Гейзенберг в 1927 году, предложив «принцип неопределённости» в квантовой физике. К тому же давно пора было отказаться от идеи оценивать «истинное значение», которого никто не видел, и которого может быть и вовсе нет на свете, и перейти к тому, что доступно эмпирически. Это всех устраивало: ни ошибок, ни погрешностей, всё шито-крыто. Первый международный нормативный документ появился уже в 1993 году. Так в измерениях началась эра неопределённости, и нормативные документы посыпались как из рога изобилия. Это была настоящая революция. Как всегда бывает в таких случаях, перемены вызвали решительное сопротивление. Давайте посмотрим, что, собственно, нам предлагают, что в этом хорошо, и что – плохо. Начнём с самого начала. Зачем вообще люди измеряют что бы то ни было? Конечно, чтобы использовать полученные в результате измерения знания для принятия некоторых важных решений. Какую роль в этих решениях играет то обстоятельство, что полученные в результате измерения знания могут оказаться несовершенными? Конечно, это не может не влиять на качество принимаемых решений и в некоторых случаях может привести к далеко идущим негативным последствиям. К сожалению, можно утверждать, что никакие измерения практически никогда не могут привести к безупречным знаниям. Мы обречены всегда на несовершенные измерения. И выбора нет. Можно ли как-то защититься от неустранимого изъяна всех измерений? Радикально – нет, но ослабить неблагоприятные последствия, всё-таки можно. Для этого имеет смысл как-то оценить возможные отклонения от результата или результатов измерений.

В классической метрологии эту роль взяли на себя доверительные границы для измеренной случайной величины. И лучше всего казались границы, построенные в рамках нормальной модели. Прекрасно, но в конечном счёте предстоит сравнить полученные границы с некоторыми требованиями того, кто собирался использовать результаты для принятия решений – заказчика измерения. Вот тут то и возникает момент истины. Хотим ли мы оказаться «в шкуре» человека, который продал результат измерений, утверждая, что он соответствует требованиям заказчика, а заказчик выяснил, что этот результат не соответствует этим требованиям? Неизбежно возникает вечный вопрос о надёжности построенных границ. Или, как теперь модно говорить, о рисках, связанных с принимаемыми решениями.

Ввести представление о концепции неопределённости проще всего, сравнивая её с классической концепцией погрешности. О первом различии мы уже упоминали: вместо «истинного значения физической величины» рассматривается «некоторая оценка среднего значения некоторой величины». В этом различии проявляются два важных момента. Во-первых, отказ от концепции «истинного значения», как от некоторой метафизической сущности, которая на практике никогда и никому не известна, и замена его на «эмпирическое среднее», что всегда можно «пощупать». Несомненно, это приблизило результат к «реальному миру», одновременно сделав его менее фундаментальным. Стало ясно, что сама «фундаментальность» ничем не была обеспечена: извечная сказка про «голового короля». Во-вторых, отказ от термина «физическая величина» в пользу термина «величина» открыл дорогу в метрологию измерениям, выполненным в неметрических шкалах. Значение этого шага трудно переоценить и мы поговорим об этом подробнее в разделе о шкалах.

Вместо погрешности вводится понятие неопределённости измерения, которое трактуется как параметр, связанный с результатом измерений и характеризующий рассеяние значений, которое обоснованно можно приписать измеряемой величине. Также как и для классической теории измерения, в качестве характеристик неопределённости используется среднее квадратичное откло-

нение (СКО) и доверительный интервал, которые в новой концепции называются «стандартная неопределённость» и «расширенная неопределённость». Как видим, новая концепция всё ещё находится в «цепких объятьях» классической. Думается, что это естественно, но ненадолго. Тем не менее, это всё равно большой шаг вперёд.

Неопределённости измерений, также как и погрешности измерений, можно классифицировать по различным признакам:

- по месту (источнику) их проявления (методические, инструментальные и субъективные);
- по их проявлению (случайные, систематические и грубые);
- по способу их выражения (абсолютные и относительные).

Неопределённости принято делить на две группы – А и В. Неопределённости типа А – это неопределённости, которые можно оценить статистическими методами на основе повторных (многократных) измерений. Неопределённости типа В – неопределённости, которые оцениваются не статистическими методами, а на базе научного суждения, основанного на всей доступной информации о возможной изменчивости измеряемой величины. При этом предлагается два метода оценивания:

- для неопределённости типа А – использование известных статистических оценок среднего арифметического и среднего квадратичного, на основании результатов измерений и опираясь в основном на нормальный закон распределения полученных величин;
- для неопределённости типа В – использование априорной нестатистической информации, опираясь в основном на равномерный закон распределения возможных значений величин в определённых границах.

Исходными данными для вычисления неопределённости типа А служат результаты многократных измерений входных величин уравнения измерения, полученные при проведении испытаний. В качестве данных для вычисления неопределённости типа В используют:

- информацию нормативных документов (ГОСТ и ТУ на изделие, данные о методах и средствах измерений и испытаний,

условия проведения испытаний, внешние воздействующие факторы и т.д.);

- данные предшествовавших измерений величин, входящих в уравнение измерений; сведения о виде распределения вероятностей;
- данные, основанные на опыте исследователя или общих знаниях о поведении и свойствах приборов и образцов;
- неопределённости констант и справочных данных;
- данные поверки, калибровки, сведений изготовителя о приборе и другие аналогичные данные.

В Таблице 1 приведено сопоставление терминов классической метрологии и концепции неопределённости. Представления об охвате возникают из-за того, что больше не действуют классические отношения между СКО и доверительными границами.

Оценивание результата измерений и его неопределённости проводится в следующей последовательности:

- составление уравнения измерений;
- оценка входных величин и их стандартных отклонений (неопределённостей);
- оценка измеряемой (выходной) величины и её неопределённости;
- составление бюджета неопределённости;
- оценка расширенной неопределённости результата измерений;
- представление результата измерений.

1. Составление уравнения измерения

В концепции неопределённости под уравнением измерения понимается математическая зависимость между измеряемыми величинами X_1, X_2, \dots, X_k , а также другими величинами, влияющими на результат измерения $X_{(k+1)}, X_{(k+2)}, \dots, X_m$, и результатом измерения Y :

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_k, X_{(k+1)}, X_{(k+2)}, \dots, X_m) \quad (1)$$

Величины X_1, X_2, \dots, X_m называются входными величинами, используемыми для оценивания неопределённости результата измерения, а результат измерения Y – выходной величиной измерения.

В качестве основы для составления уравнения измерения используется уравнение связи (в классическом понимании), т.е. зави-

симось $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_k)$. Далее, в результате анализа условий измерений и используемых систем измерений, устанавливаются другие факторы, влияющие на результат измерений. При этом величины $X_{(k+1)}, X_{(k+2)}, \dots$

X_m , описывающие эти факторы, включают в уравнение (1), даже если их влияние на результат Y незначительно. Задача оператора – по возможности наиболее полно учесть все факторы, влияющие на результат измерения.

Таблица 1

Классическая теория погрешности	Концепция неопределённости
Погрешность результата измерения	Неопределённость результата измерения
Случайная погрешность	Неопределённость оцениваемая по типу А
Неисключённая систематическая погрешность	Неопределённость оцениваемая по типу В
СКО погрешности результата измерений	Стандартная неопределённость результата измерения
Доверительные границы результатов измерения	Расширенная неопределённость результата измерения
Доверительная вероятность	Вероятность охвата (покрытия)
Коэффициент (квантиль) распределения погрешности	Коэффициент охвата (покрытия)

2. Оценка входных величин и их стандартных отклонений (неопределённостей).

Пусть имеются результаты n_i измерений входной величины X_i , где $i = 1 \dots m$. Как известно, при нормальном распределении наилучшей оценкой этой величины будет среднее арифметическое

$$X_{cp\ i} = \frac{1}{n_i} \sum_{q=1}^{n_i} x_{iq} \quad (2)$$

Стандартную неопределённость типа А определяют как среднее квадратичное отклонение по формуле:

$$u_A(x_i) = u_A(x_{cp\ i}) = \sqrt{\frac{1}{n_i(n_i-1)} \sum_{q=1}^{n_i} (x_{iq} - x_{cp\ i})^2} \quad (3)$$

Для вычисления стандартной неопределённости по типу В используют:

- данные о предыдущих измерениях величин, входящих в уравнение измерения;
- сведения, имеющиеся в метрологических документах по поверке, калибровке и сведения изготовителя о приборе;
- сведения о предполагаемом вероятностном распределении значений величин,

имеющихся в научно-технических отчётах и литературных источниках;

- данные, основанные на опыте исследователя или общих знаниях о поведении и свойствах соответствующих (подобных) систем измерений и материалов;

– неопределённость используемых констант и справочных данных;

- нормы точности измерений, указанные в технической документации на методы и системы;

– другие сведения об источниках неопределённостей, влияющих на результат измерения.

Неопределённости этих данных обычно представляют в виде границ отклонения значения величины от её оценки. Наиболее распространённый способ формализации неполного знания о значении величины заключается в постулировании равномерного закона распределения возможных значений этой величины в указанных границах (нижней b_{i-} и верхней b_{i+}) для i -ой входной величины. При этом стандартную неопределённость по типу В определяют по известной формуле для среднего квадратичного отклонения результатов измерений, имеющих

равномерный закон распределения:

$$u_B(x_i) = \frac{b_{i+} - b_{i-}}{2\sqrt{3}} \quad (4)$$

В случае других законов распределений формулы для вычисления неопределённости по типу В будут другие. В частности, если известно одно значение величины X_i , то это значение принимается в качестве оценки. При этом стандартную неопределённость вычисляют по формуле

$$u_B(x_i) = \frac{U_p}{k} \quad (5)$$

где U_p – расширенная неопределённость, k – коэффициент охвата. Если коэффициент охвата не указан, то, с учётом имеющихся сведений, принимают предположение о вероятностном распределении неопределённости величины X_i . Если известны граница суммы неисклѳенных систематических погрешностей, распределѳенных по равновероятному (равновероятному) закону $\theta(P)$ или расширенная неопределѳенность в терминах концепции неопределѳенности U_p , то коэффициенты охвата при числе неисклѳенных систематических погрешностей $m > 4$, зависит от доверительной вероятности. Коэффициент охвата $k=1,1$ при $P=0,95$; $k=1,4$ при $P=0,99$.

Неопределѳенности входных величин могут коррелировать. Для вычисления коэффициента корреляции $r(x_i, x_j)$ используют согласованные пары результатов измерений (x_{iw}, x_{jw}) , где $w = 1, 2, \dots, n_{ij}$; n_{ij} – число согласованных пар результатов измерений (x_{iw}, x_{jw}) . Вычисления проводят по известной формуле из статистики:

$$r(x_i, x_j) = \frac{\sum_{w=1}^{n_{ij}} (x_{iw} - x_{cp i})(x_{jw} - x_{cp j})}{\sqrt{\sum_{w=1}^{n_{ij}} (x_{iw} - x_{cp i})^2 \sum_{w=1}^{n_{ij}} (x_{jw} - x_{cp j})^2}} \quad (6)$$

Значимость коэффициента корреляции определяется критерием отсутствия или наличия связи между аргументами.

3. Оценка измеряемой (выходной) величины и её неопределѳенности.

Оценку измеряемой величины Y вычисляют как функцию оценок входных величин

X_1, X_2, \dots, X_m , по формуле (1), предварительно внося на все источники неопределѳенности, имеющие систематический характер, – поправки.

Вычисление суммарной неопределѳенности выходной величины проводят по тем же формулам, которые используются для расчѳта погрешностей косвенных измерений в классической концепции погрешности измерений.

В случае некоррелированных оценок входных величин, суммарную стандартную неопределѳенность $u_c(y)$ вычисляют по формуле

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{df}{dx_i}\right)^2 u^2(x_i)} \quad (7)$$

4. Составление бюджета неопределѳенности.

Под бюджетом неопределѳенности понимается формализованное представление полного перечня источников неопределѳенности измерений по каждой входной величине с указанием их стандартной неопределѳенности и вклада их в суммарную стандартную неопределѳенность результата измерений.

5. Оценка расширенной неопределѳенности результата измерений.

Расширенная неопределѳенность равна произведению стандартной неопределѳенности $u(y)$ результата измерений на коэффициент охвата k :

$$U(y) = k u(y).$$

Руководство по неопределѳенности рекомендует рассматривать все результаты измерений при доверительной вероятности (вероятности охвата) $P=0,95$. При этой вероятности можно определить число степеней свободы по эмпирической формуле Уелча-Саттерзвайта

6. Представление результата измерений.

При представлении результатов измерений Руководство рекомендует приводить всю информацию, позволяющую проанализировать и / или повторить весь процесс получения результата измерений и вычисления неопределѳенностей, а именно:

$$v_{eff} = \frac{u^4_c}{\sum_{i=1}^m \frac{u^4(x_i)}{v_i} \left(\frac{df}{dx}\right)^4} \quad (8)$$

- алгоритм получения результата измерений;
- алгоритм расчёта всех поправок для исключения систематических погрешностей и их неопределённой;
- неопределённости всех используемых данных и способы их получения;
- алгоритмы вычисления суммарной и расширенной неопределённости, включая значение коэффициента охвата k .

Таким образом, в документах по результатам измерений следует представлять:

- u_c – суммарную неопределённость;
- U_p – расширенную неопределённость;
- k – коэффициент охвата;
- u_i – данные о входных величинах;
- v_{eff} – эффективное число степеней свободы.

Не стоит далее рассматривать здесь детали и особенности концепции неопределённости. Отметим лишь её достоинства и недостатки. Самое главное достоинство этого подхода – гораздо более надёжное и, следовательно, связанное с гораздо меньшими рисками, суждение о действительной неопределённости, присущей данному измерению. Из этого в свою очередь вытекают такие следствия, как конкурентные преимущества, связанные с большей надёжностью результатов, снижение рисков, связанных с судебными издержками. Кроме того, в этом подходе повышается внимание к деталям и нюансам измерительного процесса. А это значит, что становится доступной важная информация, позволяющая совершенствовать все аспекты измерения. Конечно, список достоинств можно продолжить, но давайте лучше сосредоточимся на недостатках. Вот главные из них: это сложнее, как правило, дольше, требует обучения операторов, обычно расширяет границы области неопределённости. Всё вместе означает, что получение полного результата будет стоить дороже, времени для этого потребуется больше, значит производительность труда измерителей снизится, понимание результатов пользователем потребует дополнительного обучения, а всю нормативную базу (а это – десятки тысяч документов!) предстоит переделать, да ещё перевести на разные языки. А если мы захотим получить результаты, сравнимые с классическими, то потребуется значительное число

дополнительных измерений, а это снова время, деньги, пропускная способность измерительных служб и прочее.

Вроде получается, что ещё не ясно, что лучше: классика или модерн. Но, с другой стороны, международные документы настаивают на обязательном использовании именно концепции неопределённости. Видимо, они прикинули, что существенное повышение качества результата оправдывает все дополнительные затраты и неудобства. А в международных проектах, например, при сличениях результатов измерений в разных измерительных лабораториях, да и при поставках продукции за рубеж, оценивание неопределённости уже стало неизбежным. Чем скорее мы прекратим сопротивление и займёмся делом, тем лучше.

Мониторинг измерительных систем. Контрольные карты Шухарта.

Есть большая разница между отдельными измерениями и, например, массовым контролем качества постоянно выпускаемой продукции. В первом случае всё можно заранее продумать и тщательно организовать, как, например, при проведении эксперимента Майкельсона – Морли. Что же касается второго случая, то здесь мы попадаем в объятия системы менеджмента качества со всеми неизбежно вытекающими из неё следствиями, такими, как, скажем, требования стандарта ИСО 9000: 2015 [3] и стандарта ИСО/МЭК 17025: 2017[2]. В этом случае мало наладить измерительную систему, важно ещё, чтобы все достигнутые качества первого измерения повторялись из раза в раз на протяжении сколь угодно долгого времени [1]. Ясно, что это несоизмеримо более сложная задача.

Средством решения задач такого масштаба служит мониторинг состояния измерительной системы во времени, то есть систематическое наблюдение состояния системы, чтобы иметь возможность своевременно вмешаться, если что-то пойдёт не так. А лучший из известных инструментов мониторинга – это контрольная карта, предложенная Уолтером Шухартом в 1923 году. Она представляет собой простой график, где по горизонтальной оси в выбранном масштабе откладывается время или какой-нибудь показатель, связанный со временем, например,

последовательные номера произведённых изделий, а по вертикальной оси – какая-то характеристика изделия, например, его длина или концентрация углерода в металле, из которого сделано это изделие. Такое представление данных в виде их развёртывания во времени позволяет оценить их эмпирическое среднее и их вариабельность относительно этого среднего, которую можно выразить, например, в терминах квадратичной ошибки. Естественно думать, что эта вариабельность как раз и характеризует способность измеряемой системы к вариации, хотя бы на данном отрезке времени.

Можно ли говорить о том, что присущая системе вариабельность сохраниться в будущем? Иными словами, можно ли прогнозировать поведение системы по прошлым данным, упорядоченным во времени? Это же извечная человеческая мечта! Оказывается, что сама карта может пролить свет на эту проблему. Действительно, если нанести на контрольную карту линию, параллельную оси времени и идущую на высоте, соответствующей среднему арифметическому на вертикальной оси, и прибавить к среднему три квадратичных ошибки, как предлагает Шухарт, а потом отнять от среднего те же три квадратичных ошибки, то можно провести ещё две линии, которые параллельны линии среднего, но одна из них идёт выше, а другая – ниже линии среднего. Они образуют полосу, внутри которой должны оказаться практически все результаты измерений. Если хоть одна экспериментальная точка окажется вне этой полосы, неважно выше или ниже, то система будет не стабильной, не статистически управляемой, а при такой системе предсказания её будущего состояния не могут быть надёжными. Но этого мало. Даже если все точки лежат внутри полосы, всё равно они могут нести в себе информацию о трендах, регулярных колебаниях или иных характерных особенностях изучаемой системы. Во всех таких случаях предсказание оказывается невозможным.

Более того, во всех таких случаях система нуждается во вмешательстве ради возвращения её в статистически стабильное состояние. Работать со статистически неуправляемой системой не имеет смысла, поскольку

её поведение непредсказуемо. Но как же вернуть систему в статистически управляемое состояние? Снова нам на помощь приходит команда, которая осуществляет данное измерение. Чтобы команда могла помочь в этом важном деле, её надо вооружить соответствующим инструментарием. Подходящий инструментарий был разработан в Японии после Второй мировой войны профессором Исикава Каору и его учениками. Он получил широкое распространение во всём мире и известен как «семь простых инструментов статистического контроля качества». Эти инструменты предназначены для регулярного сбора информации о процессе, её наглядного представления и предварительного анализа. Благодаря данным, собранным с помощью семи инструментов, команда получает информацию для выдвижения гипотез о возможных путях и методах возврата процесса измерения в управляемое состояние. Остаётся «только» проверить эту гипотезу экспериментально. Для этого удобно пользоваться ещё одним инструментом, который Эдвардс Деминг привёз в Японию в 1950 году под именем «цикла Шухарта». Японцы стали называть его «циклом Деминга», а мы теперь называем его «циклом Шухарта – Деминга». Он представляет собой стандартный алгоритм проверки гипотез, сформулированный в удобной форме: «планируй – делай – проверяй – действуй». Предполагается, что этот цикл будет повторяться, меняя неудачные гипотезы на новые, до тех пор, пока не удастся достичь стабильного состояния. Деятельность по возвращению системы в стабильное состояние будет иметь систематический характер, поскольку стабильное состояние не естественно, чего нельзя сказать о нестабильном состоянии. Борьба с энтропией – это навсегда, но всё-таки время от времени мы будем наслаждаться стабильными состояниями, во время которых возможны как прогноз, так и совершенствование системы.

Прежде чем идти дальше, сделаем ещё одно важное замечание. Ясно, что для того, чтобы пользоваться новыми понятиями, надо дать им определения. Но не всякие определения подходят, не всякими удобно пользоваться. Шухарт и Деминг призывают

нас пользоваться так называемыми «операциональными» определениями, представление о которых ввёл американский физик и философ, лауреат Нобелевской премии Пол Бриджмен в 1928 году. Смысл таких определений заключается в том, чтобы оно содержало, если возможно, алгоритм построения данного понятия с указанием измерений, которые проводятся при его построении. Так операционным определением статистически управляемого состояния будет контрольная карта, в которой все результаты измерений укладываются в полосу, и в них нет видимых структурных особенностей. Для перехода в неуправляемое состояние должна быть «причина», которая обычно называется «особой». А вариация в управляемом состоянии объясняется «обычной» причиной.

Ясно, что при длительной эксплуатации любой измерительной системы неизбежны ситуации, где требуются наладки, настройки, юстировки измерительных систем, то есть их обслуживание и ремонт. Поэтому мы вынуждены обсудить этот круг вопросов. Обслуживание измерительных систем в принципе не отличается от обслуживания любого другого оборудования, разве что оно часто «тоньше» и требует более аккуратного и более квалифицированного обращения. Этому приходится специально обучать сотрудников. Поэтому часто бывает так, что обслуживают оборудование одни люди, а работают на нём – другие. Это тем более требует организации командной работы. В 70-е годы прошлого века в Японии возник новый подход к обслуживанию и ремонту оборудования, который, думается, надо сделать обычным для обслуживания измерительных систем. Он существенно отличается от концепции ППР – планово-предупредительного ремонта, причём он гораздо выгодней экономически. Выгода возникает в связи с тем, что создатели этого подхода в полной мере обладают тем, что называется статистическим мышлением, поэтому они не проводят профилактических работ, когда в них нет необходимости. Из теории надёжности технических систем известно, что новое оборудование сначала часто отказывает. Это связано с освоением персоналом навыков работы с новым оборудованием и процессами прира-

ботки самого оборудования. Затем наступает период нормальной эксплуатации системы и её поломки и отказы наблюдаются относительно редко. Но со временем всякая система начинает стареть, что неизбежно ведёт к постепенному росту числа отказов в единицу времени. В конце концов оборудование приходит в негодность и его приходится либо ремонтировать, либо заменять.

Японский подход, который называется ТРМ (мы уже упоминали его во введении), не имеет устойчивого перевода на русский язык. Предпочтительным видится термин «Всеобщая эксплуатация оборудования». Он предполагает создание команды, в которую входят все, кто работает с этим оборудованием, то есть операторы, наладчики, менеджеры, а также специалисты по метрологии, статистики и, возможно, другие специалисты. В отличие от команды, о которой мы говорили выше, и которая предполагает добровольное участие, в данном случае речь идёт об административной структуре. Создав команду, администрация организует её систематическое обучение, в программу которого входят: изучение материальной части оборудования, теория его работы, классификация возможных отказов и поломок, методы ранней диагностики отказов, охрана труда и техника безопасности. Кроме того, команду обучают средствам и методам сбора и первичной обработки информации о работе оборудования и об его состоянии. Обычно это «семь простых инструментов статистического контроля качества». А ещё их знакомят с началами методов бережливого производства, прежде всего, с концепцией 5С, предназначенной для создания и поддержания порядка на рабочих местах, что полезно всегда.

После первоначального обучения команда начинает регулярно собирать данные о работе оборудования и собираться для их обсуждения. Возникает рефлексия, направленная на осмысление собираемой информации, на выдвижение гипотез о возможностях совершенствования работы. Попутно может возникнуть информация, важная для тех, кто разрабатывает следующие поколения оборудования, на котором мы работаем. Вывод прост: не имеет смысла «просто работать на оборудовании, просто его эксплуатировать»,

поскольку при этом теряется огромная бесценная информация, помогающая понимать, улучшать, совершенствовать все системы и процессы, связанные с оборудованием. И этот вывод универсален. Он относится ко всему, что мы делаем или собираемся делать.

Вернёмся к мониторингу измерительных систем. В сущности, он предназначен для того, чтобы минимизировать наши потери, возникающие из-за того, что иногда мы ошибочно принимаем статистически управляемый процесс за неуправляемый. Тогда мы вмешиваемся в нормально работающий процесс, пытаясь вернуть его в управляемое состояние, а это, конечно, делает его неуправляемым. Но бывает и наоборот, когда мы благодушно полагаем, что всё в порядке, что процесс управляем, а он уже утратил это важное состояние. И мы ничего не делаем, когда ситуация требует вмешательства. Обе ошибки неизбежны, но контрольная карта Шухарта минимизирует число случаев их появления. Ни глубокие знания, ни общие соображения, ни большой практический опыт не могут конкурировать с картой Шухарта. Карты, в среднем, всегда лучше.

Существование управляемого процесса вовсе не означает отсутствие ошибок и дефектов. Оно говорит лишь о том, что они случайны, и что пределы их чисел предсказуемы. Да и вообще управляемость ведь не цель, а только условие, позволяющее заниматься непрерывным совершенствованием. Только совершенствование способно повлиять на среднее число ошибок или дефектов, а, следовательно, и на экономику. Когда речь идёт о массовых измерениях, выполняемых постоянно во многих лабораториях и в разных странах, проблема управляемости включает в себя ещё различия разных экземпляров оборудования и разных исполнителей.

Настройка, наладка, юстировка измерительной системы существенно зависит от статистической управляемости этой системы. Если система статистически неуправляема, нестабильна, то её нет смысла настраивать. Вместо этого самое время заняться созданием команды, которая с помощью семи простых инструментов может собрать информацию, чтобы на её основании выдвинуть содержательную вероятную гипотезу

о причине разладки системы и разработать процесс возврата в управляемое состояние, после чего естественно запустить цикл Шухарта – Деминга для поиска стабильного состояния. А когда это получится, дальнейшая настройка не имеет смысла, что прекрасно иллюстрируют эксперименты с воронкой, которые предлагает Деминг. Значит в стабильном состоянии любая попытка настройки только ухудшает точность результата, и даже может разрушить стабильность, не говоря уж о том, что при этом увеличиваются затраты, растут потери, снижается конкурентоспособность, а в нестабильном состоянии – она не имеет смысла. Все элементы измерительной системы, включая людей, должны находиться в статистически управляемом состоянии. Иначе измерение становится профанацией.

Проботбор и выборки по Демингу. Во многих случаях измерений нам недоступен весь объект измерения и можно воспользоваться только его частью, называемой выборочной пробой (образцом). Особенно это характерно для аналитической химии. Кроме того, измерения могут приводить к разрушению объекта или образца, тогда они называются разрушающими, как, например, при измерении прочности на разрыв стального стержня, или измерения могут быть не разрушающими, как, например, при измерении длины того же стержня. При разрушающем характере измерений выборочный процесс становится неизбежным.

Важно ещё различать измерения в потоке, например, производимой продукции по мере её производства, и однократные или единичные измерения. Первый случай гораздо более интересен, поэтому мы на нём остановимся. В этом случае мы рассматриваем систему, которая в свою очередь состоит из двух взаимодействующих систем: производственной системы, дающей продукцию и измерительной системы, вырабатывающей информацию, важную для принятия решений. Если мы будем измерять каждое произведённое изделие, то получится сплошной контроль. Классические представления говорят нам, что это по крайней мере экономически не целесообразно. Да и не оправдано, поскольку выборочных измерений вполне

достаточно. Но всё оказалось не так просто. Профессор Сигео Синго в Японии в 70-е годы прошлого века предложил подход, названный пока-ёкэ. Смысл этого японского термина можно передать на русском языке словами: «защита от непреднамеренных нарушений». Суть дела сводится к тому, что почти во всякий производственный процесс можно встроить внутреннюю систему измерений (обычно, косвенных), которые автоматически останавливают процесс при выявлении каких-либо нарушений. И работа не может продолжаться до устранения обнаруженных несоответствий. Практически это эквивалентно сплошному контролю, но без его чрезвычайных затрат. Синго предложил сотни инженерных решений, способных обеспечить реализацию этой идеи.

Более того, практически в то же время доктор Деминг в США развил представления о статистически управляемых системах, с которыми мы уже сталкивались выше. Применение этой концепции к теории выборочного метода привело к неожиданным результатам. Классическая теория развивалась на протяжении всего прошлого века и пришла к идее построения планов выборок в зависимости от приемлемого риска и приемлемых долей несоответствий в партии продукции. Додж и Ромиг в США построили таблицы планов выборок, реализованные в знаменитом американском военном стандарте MS105E, который был протипажирован в большинстве стран мира, в том числе и странах СНГ. Этот стандарт, как и вся классическая теория, не учитывал состояния системы, из которой предполагается взять выборку. Но, если система находится в статистически неуправляемом состоянии, то не имеет смысла вообще брать выборку, остаётся только сплошной контроль, на котором далеко не уедешь. Значит в неуправляемой системе надо начинать с возврата её в управляемое состояние. Алгоритм известен.

Рано или поздно настает момент, когда система достигает статистически управляемого состояния. И тут выясняется, что никакие выборки оказываются просто не нужными для получения информации о системе. Всё, что нужно, содержится в текущих оценках среднего процесса и выборочного разма-

ха, полученных на контрольной карте, свидетельствующей о том, что нет оснований считать процесс неуправляемым. Здесь можно наконец менеджменту заняться попытками радикального улучшения процесса, но любые настройки, наладки и проч., не требуются, что хорошо видно из экспериментов с воронкой. Так что вопрос об объёме выборки отпадает.

Но радоваться рано. Статистически управляемое состояние не вечно. И нам важно зафиксировать момент, когда возникнут первые признаки разладки системы. Единственное доступное средство мы уже обсуждали – это мониторинг системы. Конечно, снова нужен план выборки. Но он будет гораздо менее затратным, чем планы в традиционной схеме, поскольку у мониторинга иная цель, чем у выборочного контроля. Понятно, что при отборе образцов для измерений в ходе мониторинга важно, как обычно, использовать процедуру рандомизации. И конечно, к планам мониторинга, как и ко всему на свете, приложима идея непрерывного совершенствования, к которой мы ещё вернёмся.

Таким образом, для успеха измерений важно, чтобы производственная система и измерительная система одновременно находились в статистически управляемом состоянии.

Между получением образца и самим процессом измерения часто лежит ещё процесс подготовки образца к измерению. Так, если, например, мы хотим посмотреть под микроскопом структуру некоторого образца металла или сплава, то нам предстоит создать на образце горизонтальную поверхность, затем её шлифовать и полировать, а потом травить специальным раствором, чтобы выявить интересующую нас структуру и провести на ней соответствующие измерения. В аналитической химии встречаются весьма разнообразные процессы подготовки пробы к анализу, которые могут включать, например, измельчение, растворение, разделение, выпаривание, кристаллизацию и многие другие процессы. Их цель – обеспечение требуемой точности анализа. При этом, конечно, каждая операция в процессе пробоподготовки неизбежно вносит свой вклад с неопределённостью конечного результата. Для разработки

требуемого процесса пробоподготовки часто требуются методы планирования эксперимента и экономический анализ. Вот вам ещё один аргумент в пользу командной работы.

Стандартные образцы. Как ни крути, а результат, выданный измерительной системой, надо с чем-то сравнить [1]. Причём дважды. Сначала с неким эталоном или стандартным образцом, чтобы понять, например, какой концентрации интересующего нас химического элемента соответствует, скажем, высота пика на кривой, нарисованной измерительной системой. А затем нам предстоит сравнить полученную концентрацию с требованиями заказчика с техническими условиями на продукцию или с любым другим условием, важным для лица, которое будет принимать решение на основе, в частности, полученного нами значения концентрации. И при этом, конечно, не забыть об оценке элемента неопределённости, присущего данному результату.

Где же взять подходящий эталон? Оказывается, это длинный вопрос. Чтобы на него ответить, надо начать издалека. Есть на свете романтически настроенные люди, которые полагают, что если вы купили, например, в одной стране килограмм картошки, которую взвесили на весах с точностью до одного грамма, а потом привезли свою покупку в другую страну, то взвешивание её на других весах того же класса точности должно показать тот же вес, с той же неопределённостью. Велики ли шансы, что будет именно так, как описано? Думается, что шансы не велики. И если для картошки это не столь важно, то во многих случаях это имеет огромное значение. Поэтому метрология исповедует принцип «единства измерений». Результат измерения плюс его неопределённость не должны в статистическом смысле различаться, в какой бы точке земного шара они не были проведены. Тогда мы не будем волноваться по поводу нашей картошки.

Но как можно этого достичь? В настоящий момент в мире реализована следующая идея. Создана международная организация по метрологии, которая хранит образцы (эталон) всех основных мер, используемых людьми. Благодаря этому теперь достаточно сличить тот измерительный инстру-

мент, которым мы пользуемся с эталоном, и если различия статистически не значимы, то пользоваться нашим измерительным инструментом так, как будто мы работали с самим эталоном. Звучит красиво, но на практике не работает по многим причинам. Прежде всего, одним эталоном трудно обойтись, поэтому обычно создаются «вторичные» эталоны, обычно на уровне государств. Хранение и поддержание эталонов, дело настолько дорогое и ответственное, что кроме государства за него просто некому взяться, а без этого – не обойтись. Но и этого не достаточно, поскольку эталонов на все случаи жизни не напасёшься. Приходится производить ещё «стандартные образцы» или «меры», которые можно проследить до вторичных эталонов. Тут возникает важное для нас слово «прослеживаемость». Важно проследить путь от первичных эталонов, до непосредственных конкретных измерений. Не секрет, что каждый следующий шаг в цепочке прослеживаемости неизбежно ведёт к росту неопределённости конечного результата. Поэтому не удивительно, что к первичным эталонам предъявляются фантастические требования по точности, воспроизводимости и стабильности во времени.

Конечно, все люди в принципе должны понимать, как это устроено, но на практике мы обычно имеем дело со стандартными образцами или мерами, их мы и будем рассматривать в дальнейшем. Производство стандартных образцов, особенно в аналитической химии, – это отрасль производства, к которой так и надо подходить. Её особенность – высокие требования к характеристикам, которые не остаются постоянными во времени: жизнь постоянно их ужесточает. Она остро нуждается в современной системе менеджмента качества (речь идет о системе, а не о сертификате). В производстве стандартных образцов можно увидеть практически все проблемы, о которых мы говорили выше, плюс всё то, что характерно для производства. Пусть, например, мы производим некоторый сплав, концентрация лигирующей добавки в котором может меняться от 0 до 5%. После того, как мы провели очередную плавку, мы хотим знать, сколько же этой добавки на самом деле оказалось в сплаве в

результате данной плавки? Тогда нам предстоит заказать специализированной организации, или, на худой конец, сделать самим серию образцов нашего сплава с заранее заданными концентрациями этой добавки в интересующем нас диапазоне. Сколько и каких образцов надо изготовить – это задача планирования эксперимента, и дань традиции здесь часто приводит к потерям. Мы обсудим это подробнее, когда вскоре доберёмся до градуировок. Это не обязательно должны быть сплавы, аналогично можно говорить о любых материальных системах.

Градуировочные графики и «обратная» регрессия. Итак, нам нужны стандартные образцы, чтобы иметь возможность с их помощью построить «градуировочные графики», с помощью которых, в конечном счёте, измерительный сигнал переводится на «язык» предметной области. Измерительный сигнал может говорить на языке, например, «степени почернения фотопластинки» или «изменения цвета раствора», или «некоторой кривой, которую рисует компьютер, встроенный в измерительную систему», а мы хотим получить ответ на языке, например, концентраций некоторых компонентов. Естественным образом получается график в декартовых координат, где по горизонтальной оси откладываются значения, например, концентраций соответствующих стандартных образцов, которые заранее известны, а по вертикали откладываются эмпирические значения информационного сигнала. В результате на плоскости возникает график, позволяющий построить некоторую математическую модель, часто линейную. Для построения модели, как правило, используется метод наименьших квадратов. И в этом пока нет ничего плохого. Но дальше для оценок неопределённости используется классическая модель регрессионного анализа, и вот тут то и возникают две проблемы. Первая связана с так называемой «обратной регрессией». Дело в том, что при построении градуировочного графика на горизонтальной оси откладываются значения, известные нам с очень большой точностью, а на вертикальной – случайные величины, которые порождают неопределённость. Но когда мы начинаем пользоваться этим графиком,

смысл осей меняется. Теперь мы эмпирически определяем информационный сигнал, а считываем значение концентрации. И нас теперь интересует неопределённость относительно оси концентраций. На практике часто не понимают и не учитывают это различие. Понятно, что это ведёт к серьёзным ошибкам. Вторая проблема более фундаментальна. В модели классического регрессионного анализа кроме нереалистичного требования нормальности распределения измеряемой случайной величины, требуются ещё безошибочные знания о второй переменной, независимость, однородность дисперсии и ряд других, вовсе не реалистичных предположений. Несомненно, нужна глубокая ревизия сложившегося положения.

Стандартизация и непрерывное совершенствование. Если говорить о массовых измерениях, особенно в промышленности, или о единстве измерений, становится ясно, что нельзя обойтись без стандартизации всех аспектов измерительного процесса. И мы всегда стремимся чётко стандартизовать этот процесс. Это настолько очевидно, что даже не возникает никаких дискуссий. Однако, у этого есть и другая сторона. Любое измерение должно нести в себе не только результат и его неопределённость, важные для принятия решений, но и некоторую информацию, служащую для процесса рефлексии, для осмысливания текущей ситуации и обдумывания возможных путей её дальнейшего улучшения, ибо в конечном счёте именно непрерывное совершенствование оставляет надежду на сохранение организации в непрерывной конкурентной борьбе, да и прогресс вообще любит рядиться в одежды непрерывного совершенствования. Этим принципом руководствуются все современные концепции менеджмента. И здесь видится противоречие, которое нуждается в срочном обсуждении.

Оптимизация и планирование экспериментов. На предыдущих страницах не раз встречалась фраза о том, что та или иная задача – относится к области планирования экспериментов. Что же это значит? Когда люди сознательно и целенаправленно проводят некоторые эксперименты, за ними всегда стоит или стоят некоторые гипотезы. Благо-

даря этому у эксперимента всегда есть цель – отвергнуть или временно принять проверяемую гипотезу. Именно поэтому у эксперимента всегда есть конкретная цель. И об успехе или неудаче эксперимента можно судить по тому, насколько удалось достигнуть этой цели. Но достижение успеха возможно разными путями, например, при разном числе, проведенных опытов. Ясно, что достижение поставленной цели при наименьшем возможном числе опытов – это благо, если конечно соблюдены все дополнительные требования к точности, к возможным рискам и т. д. Планирование экспериментов – это наука о том, как достигать поставленной цели при минимальных возможных затратах, прежде всего, при наименьших числах опытов. Оно иногда используется в метрологических задачах, но почему-то очень однобоко. Как правило, это однофакторные и двухфакторные планы дисперсионного анализа. Этого совершенно не достаточно. Задача, например, разработки алгоритма анализа, несомненно, принадлежит к классу задач планирования эксперимента, но в литературе встречается очень мало примеров такого рода. И, как правило, это следствие отсутствия командного подхода к формулировке задачи, переоценка индивидуального опыта химика-аналитика. Это огромная область, сулящая резкий рост качества разработок и значительную экономию времени и других ресурсов. Тоже самое можно сказать и о разработке оборудования измерительных систем, и о многих других метрологических случаях.

Математическая теория измерений. Шкалы. Волею судьбы у метрологии есть строгая математическая теория, которая помогает понимать и анализировать многие процессы, происходящие в метрологии. До недавнего времени метрология открешивалась от измерений, которые касались «не физических величин». Речь шла об экспертных суждениях и вообще о всяческой «субъективной» измерительной информации. Трудно понять, с чем это связано. Ведь ещё со времени знаменитой дискуссии Н. Бора и А. Эйнштейна было ясно, что ни при каких обстоятельствах даже для самых автоматизированных измерительных систем нельзя

изъять человека из процесса измерений. Но тогда «измерение физических величин» – это миф. Мы убеждены, что неметрические шкалы должны вернуться в лоно метрологии и занять в ней подобающее место.

Международные стандарты в области метрологии и в смежных областях, и их переводы. В международной метрологии создан впечатляющий комплекс нормативных документов, многие из которых уже переведены. В целом они свидетельствуют о выдающихся достижениях в области метрологии. Хотя, конечно, среди них встречаются и неточности, и прямые ошибки, и неудачно выраженные мысли. Но если мы обратимся к переводам этих документов, то будем поражены огромным числом прямых ошибок, неточностей, пропусков и другого брака. Думается, что существующая ситуация нетерпима. Она требует немедленного вмешательства. А её главная причина кроется в отсутствии командной работы. Перевод стандарта – сложная задача, которая под силу только дружной команде профессионалов в различных областях, рассматриваемых в соответствующем стандарте.

Проектирование, конструирование и совершенствование измерительных систем. Традиция рассматривает эту область отдельно от метрологии. Думается, что эту важнейшую область надо обязательно рассматривать вместе с метрологией. Хотя бы потому, что важно наладить связь между опытом людей, работающих на соответствующем оборудовании, и опытом тех, кто разрабатывает новые поколения этого оборудования. Само по себе – это обычная область человеческой деятельности, нуждающаяся в эффективном менеджменте и в эффективной системе менеджмента качества.

Компьютерные системы «Большие данные». Мир быстро меняется. Теперь компьютер как часть измерительной системы – не редкость. Вычислительные мощности быстро растут. Это не может не оказать сильного воздействия на многие аспекты метрологии. Мы на пороге новых возможностей. Важно быть к этому готовыми.

Заключение.

В этом тексте есть общие отсылки к некоторым источникам справочного характе-

ра, хотя мы готовы сделать их буквально под каждой фразой. И собираемся сделать это в будущем в других публикациях. Но пока их отсутствие – наш выбор. Кажется важным выделить и сделать удобными для обсуждения основные идеи без отвлечения на авторитеты. Метрология – на пути больших перемен. Эти

перемены витают в воздухе, прослеживаются при решении различных задач. И наша цель описать состояние, которое сейчас переживает метрология, обозначит ключевые точки и спорные моменты. А по сути – смоделировать первые шаги, которые позволят переменам в метрологии осуществиться.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Кумэ Х. Статистические методы повышения качества / Х. Кумэ. – М.: Финансы и статистика, 1990.
2. Международный Стандарт ISO/IEC 17025 // Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. Третья редакция 2017-11.
3. Системы менеджмента качества – Основные положения и словарь // Международный ISO Стандарт 9000. Четвертая редакция, 2015-09-15.

REFERENCES

1. Kumje, H. (1990). *Statisticheskie metody povyshenija kachestva [Statistical methods of quality improvement]*. Moscow: Finansy i statistika [in Russian].
2. Mezhdunarodnyj Standart ISO/IEC 17025 [International Standard ISO / IEC 17025]. *Obshhie trebovanija k kompetentnosti ispytatel'nyh i kalibrovocnyh laboratorij. Tret'ja redakcija 2017-11* [in Russian].
3. Sistemy menedzhmenta kachestva – Osnovnye polozhenija i slovar' [Quality management systems – Fundamentals and vocabulary]. *Mezhdunarodnyj ISO Standart 9000. Chetvertaja redakcija, 2015-09-15* [in Russian].

Адлер Юрий Павлович

Кандидат тех. наук, профессор
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
119049, г. Москва, Ленинский проспект, 4

Adler Jurij

PhD, Full Prof.
National Research Technological University
«MISIS»
4, Leninsky Ave., Moscow, 119049, Russia

Email: claireiv@rambler.ru

Цитування: Адлер Ю. П. Метрологія: где спотыкаемся? / Ю. П. Адлер // Аспекти публічного управління. – 2019. – Т. 7 – № 3. – С. 6-26.

Citation: Adler, J.P. (2019). Metrologija: gde spotykaemsja? [Metrology: where do we stumble?]. *Public administration aspects*, 7 (3), 6-26.

Стаття надійшла / Article arrived: 03.02.2019

Схвалено до друку / Accepted: 05.03.2019