

Министерство образования и науки Российской Федерации

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

В. Г. Кнорринг

**МЕТРОЛОГИЯ
И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ
ИЗМЕРЕНИЯ**

Учебное пособие



Санкт-Петербург

2017

Министерство образования и науки Российской Федерации
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

В. Г. Кнорринг

МЕТРОЛОГИЯ
И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ
ИЗМЕРЕНИЯ

Учебное пособие



Санкт-Петербург
2017

УДК 006.91:57(075.8)

ББК 30.10я7

К53

Р е ц е н з е н т ы:

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры
“Физика и оптотехника” Ижевского государственного технического
университета им. М. Т. Калашникова *С. И. Юран*

Доктор технических наук, заместитель директора по науке
НАО “ИНКАРТ” (Санкт-Петербург) *В. В. Пивоваров*

Кнорринг В. Г. Метрология и физико-технические измерения : учеб.
пособие. – СПб. : Изд-во Политехн.ун-та, 2017. – 120 с.

Учебное пособие предназначено для студентов – будущих исследователей в области биологии и медицины, обучающихся по программе бакалавриата в рамках образовательного направления “Техническая физика”. Оно содержит систематизированный обзор основных понятий теории измерений, важных для исследовательской деятельности, и призвано обеспечить исходные позиции для дальнейшего самостоятельного изучения исследователем необходимых ему разделов метрологии и теории измерений.

Пособие может представить интерес для специалистов, которые найдут в нем новый для себя взгляд на метрологию и теорию измерений.

Ил. 21.

Печатается по решению

Совета по издательской деятельности Ученого совета
Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

© Кнорринг В., Г., 2017

© Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого, 2017

ISBN 978-5-7422-5993-0

*Владимиру Олеговичу Самойлову
с глубоким уважением и благодарностью*

Введение

В течение ряда лет курс, читаемый студентам, будущим исследователям в области биологии и медицины, назывался: “Метрология, стандартизация, сертификация”. Новое название: “Метрология и физико-технические измерения” требовало существенного расширения содержания этого курса.

Такое расширение могло бы пройти безболезненно благодаря наличию учебного пособия [1] и дополнительно изданной лекции [2]. Эти работы были написаны специально для будущих исследователей с определённым “запасом” по отношению к программе исходного курса. Но исключение экзамена из учебного плана в корне изменило возможности преподавания.

При чтении прежнего курса “Метрология, стандартизация, сертификация” даже только за шестнадцать лекционных часов (по одной лекции на тему) удавалось давать ориентировку в обширном материале пособия [1] в расчёте на дальнейшую самостоятельную работу студента, особенно при подготовке к экзамену. При отсутствии экзамена это потеряло смысл. К тому же из-за уменьшения длительности последнего семестра бакалавриата лекционный курс стал ещё короче.

Короткий лекционный курс фактически стал как бы факультативным; пришлось его читать, рассчитывая на интерес думающей части слушателей. Его предметом стал обзор содержания науки об измерении (частично включающей в себя метрологию) без углубления в детали. Если в будущей работе молодой исследователь ощутит необходимость лучше познакомиться с какими-либо вопросами метрологии, он всегда сможет обратиться хотя бы к тем же работам [1] и [2].

Настоящее издание фиксирует, тоже с некоторым “запасом”, опыт чтения короткого обзорного (и в какой-то степени мировоззренческого) курса метрологии и теории измерений. Такого рода обзор студент не найдёт в существующей учебной и научной литературе.

1. Предмет курса

1.1. Метрология и наука об измерении

Термин *метрология* составлен из двух греческих корней. Первая его половина произведена от слова *метрон*, означающего *меру*; вторая – от слова *логос*, означающего *учение*. В целом получается *наука об измерении*.

Однако такая буквальная трактовка оказывается слишком широкой, и её всегда уточняют теми или иными дополнениями.

Так, в официальном документе – Рекомендациях по межгосударственной стандартизации [3] дано такое определение *метрологии*:

“Наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности”.

В свою очередь *единство измерений* определяется так:

“Состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах величин или в значениях по установленным шкалам измерений, а показатели точности измерений не выходят за установленные границы”.

Поскольку в измерениях нуждаются очень многие области человеческой деятельности, метрология легко вступает в контакт с рядом других дисциплин, и это отражается, в частности, в номенклатуре учебных изданий. Были случаи, когда студенты-исследователи пытались пользоваться учебниками метрологии, написанными для учащихся совсем другого профиля, – и удивлялись, почему у них ничего не получается.

Дадим примеры таких контактов метрологии.

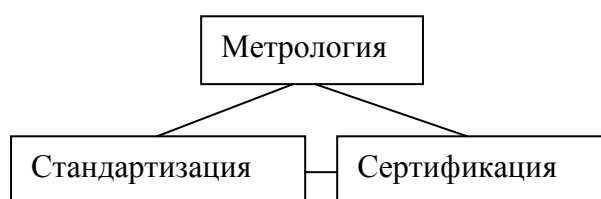


Рис. 1.1

На рис. 1.1 приведён “дисциплинарный треугольник”, соответствующий довольно распространённой сейчас трактовке метрологии как дисциплины *управленческого цикла*

(укрупнённая группа специальностей и направлений 27 – Управление в технических системах). Важнейшей вершиной треугольника является *сертификация* – она обеспечивает бизнесу сбыт продукции; метрология

и стандартизация играют вспомогательную роль. За последние годы издано огромное число учебных материалов с названиями “Метрология, стандартизация, сертификация”.

Другой часто встречающийся “дисциплинарный треугольник” показан на рис. 1.2. Он отвечает потребностям машиностроения.

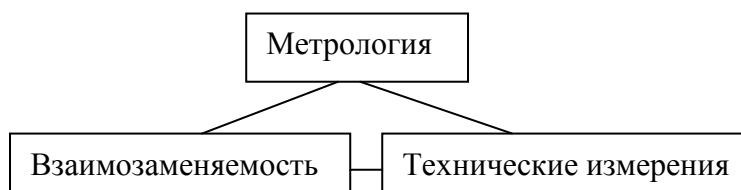


Рис. 1.2

Здесь основной вершиной является *взаимозаменяемость*. Метрология и технические измерения нужны для того, чтобы обеспечить взаимозаменяемость деталей или узлов изделий.

Крупный специалист по электрическим измерительным системам Михаил Петрович Цапенко, работавший в Новосибирске, любил рисовать “дисциплинарный треугольник” так, как показано на рис. 1.3. Здесь конечной целью являются *электрические измерения*, остальные вершины треугольника являются обеспечивающими.

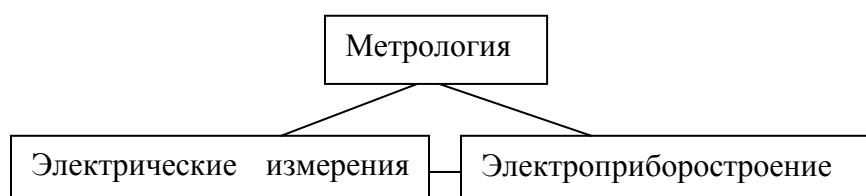


Рис. 1.3

Естественно, имеются учебники и учебные пособия, ориентированные на схемы рисунков 1.2 и 1.3.

Из двух последних рисунков видно, что метрология располагается как бы над измерениями, не совпадая с ними. Выше уже было сказано, что предметом метрологии является в основном обеспечение *единства измерений*, а в теории измерений есть области, выходящие за рамки этого предмета и не относящиеся к метрологии.

Но если метрология не охватывает полностью науку об измерениях, то, может быть, имеет место обратное соотношение, – измерительная наука целиком поглощает метрологию? И это тоже неверно, потому что существуют большие разделы метрологии, не относящиеся

к измерительной науке. Это, в частности, *законодательная метрология*. В РМГ 29–2013 [3] дано такое определение законодательной метрологии:

“Раздел метрологии, предметом которого является установление обязательных технических и юридических требований по применению единиц величин, эталонов, методов и средств измерений, направленных на обеспечение единства и требуемой точности измерений”.

К метрологии имеют отношение *федеральные законы* (их легко найти в Интернете):

184 ФЗ – О техническом регулировании,

102 ФЗ – Об обеспечении единства измерений,

а также большое число стандартов и других нормативных документов.

Имеется особая система стандартов, носящая название: Государственная система обеспечения единства измерений, – сокращённо ГСИ. Номера стандартов этой системы начинаются на 8., например:

ГОСТ 8.401–80. ГСИ. Классы точности средств измерений. Общие требования,

ГОСТ 8.417–2002. ГСИ. Единицы величин,

ГОСТ Р 8.563–2009. ГСИ. Методики (методы) измерений.

В этих обозначениях 80 (имеется в виду 1980), 2002, 2009 – годы разработки стандартов; ГОСТ Р означает стандарт, действующий в пределах Российской Федерации (не межгосударственный).

Номера метрологических стандартов могут и не начинаться на 8.; например, есть важный стандарт в шести частях:

ГОСТ Р ИСО 5725.1–2002... ГОСТ Р ИСО 5725.6–2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений.

Здесь ИСО означает прямое заимствование стандарта Международной организации по стандартизации (ISO – International Organization for Standardization).

Мы в этом издании не будем специально заниматься законодательной стороной метрологии. Попытаемся изложить *содержание измерительной науки* (включая относящиеся к ней разделы метрологии) в том виде, как оно представляется исходя из многолетнего опыта ка-

федры Измерительных информационных технологий Политехнического университета. Предварительно наметим структуру изложения, опираясь на анализ процесса измерения с системных позиций.

1.2. Измерение как система

Во многих случаях достаточно считать измерение несложной *операцией*: приложил линейку и снял отсчёт. Но развитое измерение при внимательном рассмотрении оказывается довольно сложной *системой*. Возможны различные подходы к описанию систем.

Чаще всего любую систему рассматривают как *совокупность элементов*, между которыми (а также между некоторыми элементами и внешней средой) имеются различные *связи*. Это структурное описание должно быть дополнено описанием *функций* элементов, отдельных подсистем и системы в целом.

Информационные системы (к ним принадлежит измерение) допускают также *уровневое описание*, поскольку информация в них всегда надстраивается над процессами, описываемыми на энергетических и вещественных уровнях.

Возможен ещё один способ описания сложных систем – с помощью своеобразных *проекций*. При этом система рассматривается как бы с разных сторон.

Поскольку этот способ необычен, проиллюстрируем его примером – ссылкой на статью [4], посвящённую анализу *научной теории как системы*. Правда, в [4] проекции названы подсистемами, но сделана оговорка, что они “в некоторых условиях выступают в качестве представителей теории в целом”, а это не свойственно подсистемам.

Таких *подсистем со свойствами проекций* в статье [4] перечислено четыре:

- “логико-лингвистическая”,
- “модельно-репрезентационная”,
- “прагматико-процедурная”,
- “проблемно-эвристическая”.

Таким образом, научная теория может быть рассмотрена либо со стороны её логической структуры и языкового оформления, либо со стороны отражения (моделирования) ею определённых объектов дейст-

вительности, либо со стороны используемых ею процедур, либо со стороны способов постановки и решения задач.

Применительно к измерению большинство авторов используют первый из трёх перечисленных выше подходов, причём в качестве *элементов системы* выступают последовательные этапы процесса измерения или операции, выполняемые в ходе этого процесса.

Иначе поступили авторы учебного пособия [5], где (на странице б) в качестве *основных элементов измерения* перечислены: измеряемые величины; условия измерений; единицы физических величин; средства измерений; методы измерений; наблюдатель или какие-либо технические устройства восприятия и использования значения измеряемой величины; результат измерения. Но связи между этими элементами в [5] не указаны в явном виде, так что вряд ли можно говорить в данном случае о системном подходе.

Автор настоящего издания разработал *уровневую U-образную* (объединяющую подготовку и выполнение измерения) модель развитого процесса измерения (рис. 1.4). Но основывать лекционный курс на уровневой модели оказалось неудобным.

Не станем сейчас комментировать рис. 1.4. В дальнейшем будут встречаться ссылки на него. В основу же изложения в настоящем издании положим третий из перечисленных подходов, – попробуем рассмотреть измерение *с разных сторон*.

Какие можно выделить стороны, своеобразные *проекции* процесса измерения, рассматриваемого как система?

С точки зрения теории информации (см., например, раздел 3-3 книги [6] или раздел 2-3 книги [7]) задача измерения – обеспечить переход от априорной модели исследуемого объекта к апостериорной модели с уменьшенным интервалом неопределённости. Соответственно первой стороной процесса измерения будем считать *описание объекта* (априорное и апостериорное).

Эта сторона примерно соответствует “модельно-репрезентационной” проекции научной теории, о которой говорилось выше.

Далее, во всех существующих определениях измерения подчёркивается его *экспериментальный характер* – нельзя ничего измерить, не взаимодействуя с исследуемым объектом. Второй стороной процесса измерения будем считать *взаимодействие с объектом*.

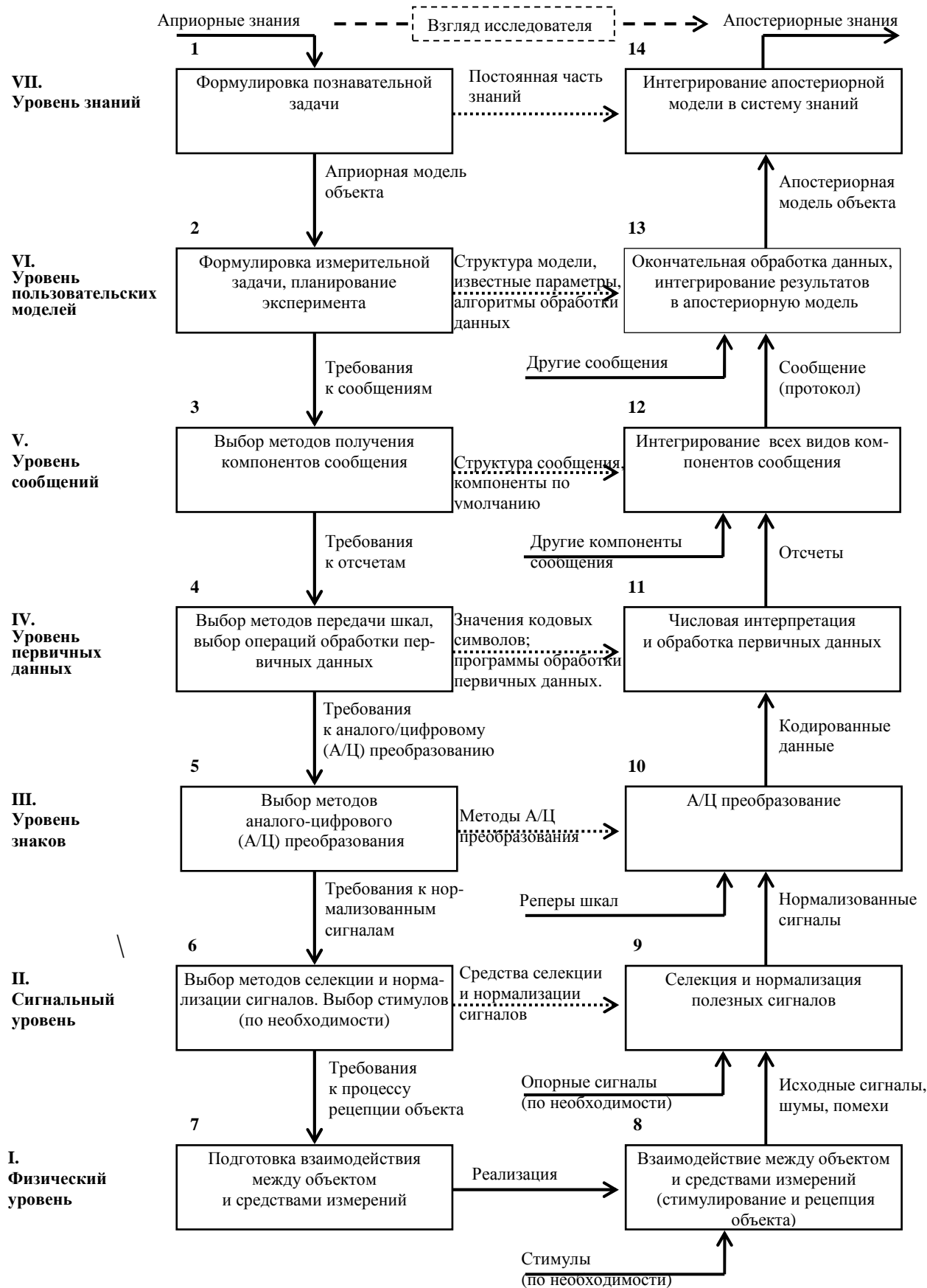


Рис. 1.4

Но очевидно, что одного взаимодействия мало – при измерении всегда должна происходить *передача информации*.

В той же книге [6] на странице 10 можно прочесть: “... любое измерительное устройство представляет собой канал приёма и преобразования информации о размере измеряемой величины...”.

Попробуем объединить эту идею передачи информации от объекта к потребителю информации со столь же очевидным фактом необходимости предварительной передачи информации от эталонов к используемым средствам измерения, и будем рассматривать в качестве третьей стороны *движение информации* при измерении.

Наконец, многие авторы подчёркивают, что сущностью измерения является *сравнение*. Например, в классическом труде Михаила Федосеевича Маликова [8] измерение определяется так:

“Измерением мы называем познавательный процесс, заключающийся в сравнении путём физического эксперимента данной величины с некоторым её значением, принятым за единицу сравнения”.

Несмотря на некоторые терминологические и смысловые неточности, это определение (1949 года!) до сих пор сохраняет своё значение. В качестве четвертой стороны процесса измерения как раз и предлагается рассматривать *сравнение*.

Итак, мы выделили четыре стороны измерения как сложной системы: описание объекта, взаимодействие с объектом, движение информации и сравнение. Эти четыре стороны будут поочередно обсуждены в следующих главах.

Но системы, как правило, существуют не сами по себе, а оказываются подсистемами систем более высокого уровня – как бы объемлющих систем. Попробуем перечислить некоторые (наверное, не все возможные) объемлющие системы для измерения:

- Исследование.
- Измерительный контроль, испытания.
- Распознавание.
- Диагностика.
- Управление.

“Выходы” измерения в эти объемлющие системы нужно будет не забыть при дальнейшем изложении.

2. Описание объекта как одна из сторон измерения

2.1. Структуры концептуальных моделей и параметризация

Объектом измерения может быть материальное тело, система тел, физическое поле или какой-либо процесс. Познание объекта заключается в формировании или уточнении его *концептуальной модели*, которая может только подразумеваться, может находиться в сознании человека или быть явно фиксированной в знаковом материале.

По-видимому, все человеческие знания можно рассматривать как совокупность концептуальных моделей. Можно высказать даже более смелое предположение: *человеческое сознание* есть модель обстановки, окружающей человека, а также его собственного состояния.

Концептуальная модель объекта при измерении, которую в дальнейшем будем называть просто моделью, представляет собой некоторую абстрактную структуру (*материальные модели* не будут нас интересовать), на которую могут быть “навешены” *параметры*.

В разных областях знаний используется огромное количество видов моделей, даже простое перечисление которых (не говоря уже об анализе системных связей между ними) представляет собой трудно выполнимую задачу. Приведём лишь несколько примеров.

Очень распространены *геометрические модели*. Необычным, но поучительным примером может служить схема опыта Эратосфена (III век до н. э.) по определению длины окружности Земли (рис. 2.1).

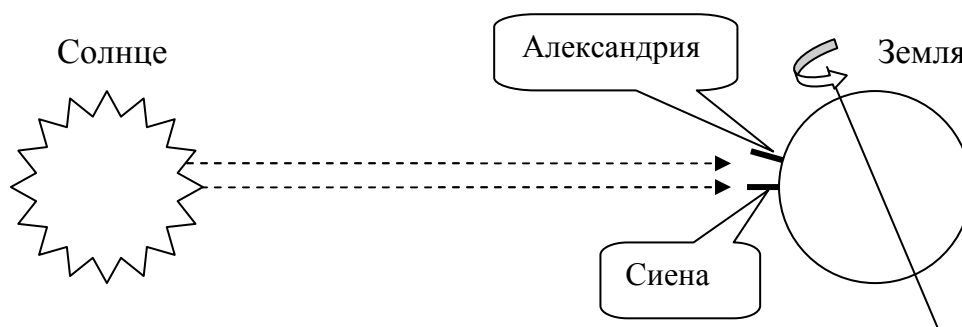


Рис. 2.1

Модель объекта в данном случае проста: Земля, как было известно Эратосфену, имеет шарообразную форму. Но ведь этого далеко не достаточно для понимания метода измерения! Собственно опыт был крайне прост: Эратосфен определил в египетской Александрии относи-

тельную длину самой короткой (в течение года) тени от вертикально поставленной палки – она составила около $1/50$ длины палки.

Что же надо было знать Эратосфену для нахождения по этим скудным данным длины окружности Земли? Очень многое:

- во-первых, что в другом египетском городе, Сиене, бывают дни, когда Солнце стоит прямо над головой, и тень от вертикальной палки исчезает (но никогда не переходит на другую сторону!);

- во-вторых, что Сиена расположена на одном меридиане с Александрией на известном расстоянии от неё;

- в-третьих, что Солнце находится так далеко от Земли, что его лучи можно считать параллельными.

Ясно, что при этих условиях относительная длина самой короткой тени в Александрии есть тангенс разности широт Александрии и Сиены. А от разности широт при известном расстоянии между городами (оно служило *мерой* – измерение длины без меры невозможно!) нетрудно было перейти к искомой длине окружности Земли.

Что поучительно в этом примере? То, что в ряде случаев для измерения недостаточно располагать моделью *самого объекта измерения*, а необходима модель объекта *вместе с частью обстановки*, в которую он помещён. Кроме того, видно, что априорная модель воплощает всю совокупность априорных знаний, необходимых для организации измерения.

Перейдём теперь к другим видам моделей.

На рис. 2.2 приведён фрагмент *принципиальной схемы* электрической цепи. Постоянными параметрами являются R и C ; переменными – $U_{\text{ВХ}}$ и $U_{\text{ВЫХ}}$. Цепи – это класс моделей, входящий в обширную систему

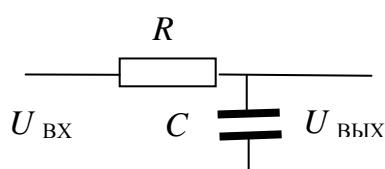


Рис. 2.2

моделей, разработанную в электротехнике.

Отметим, что принципиальные схемы могут трактоваться различным образом.

Если наш простейший фрагмент принципиальной схемы является частью *проекта* некоторого устройства, то элементы, обозначенные R и C , понимаются как символы *вещей* – покупных комплектующих изделий, а именно резистора и конденсатора. Но одновременно числовые значения R и C являются параметрами этих изделий.

Пусть в спецификации к схеме указано, например, $R = 10$ кОм, $C = 0,1$ мкФ. Это будут *номинальные значения* сопротивления и ёмкости; действительные значения могут отличаться от них в пределах указанных допусков. При необходимости параметры R и C конкретных элементов цепи могут быть измерены.

Но тот же рис. 2.2 может быть использован для *учебного расчёта*. Тогда R и C понимаются как точные абстрактные параметры. Например, может быть поставлена задача: найти выходное напряжение при скачкообразном изменении входного напряжения от нуля до, скажем, 5 В. Ответ известен: выходное напряжение будет приближаться к пяти вольтам по экспоненте с постоянной времени $RC = 1$ мс.

Тот же расчёт при *реальном проектировании* может быть усложнён учётом допусков на параметры. Может потребоваться также знание “паразитных” параметров – индуктивности проводников и резистора, ёмкостей между его выводами, а также между проводниками, потерь энергии в конденсаторе и т. д. Для этого принципиальной схемы уже недостаточно, должна быть составлена *схема замещения*, внешне похожая на принципиальную схему, но содержащая “паразитные” параметры. Эти последние уже никак не соответствуют вещам. Схема замещения тоже является моделью.

В качестве *моделей процессов* широко распространены *сигнальные функции*. Сигнал вообще можно определить как *физический процесс, несущий информацию*.

Всякий процесс характеризуется целым рядом параметров, изменяющихся во времени, – так, прохождение тока по проводу сопровождается изменением температуры провода и магнитного поля в окружающем пространстве. Обычно один (реже несколько) из изменяющихся параметров сигнала считается *информативным параметром*.

График зависимости информативного параметра от времени предлагается называть *сигнальной функцией*, чтобы не путать его с сигналом как физическим процессом. Отметим, что это название не общепринято.

На рис. 2.3 приведён фрагмент электрокардиограммы – *сигнальной функции*, описывающей вызванное работой сердца изменение напряжения между наложенными на кожу электродами. Это напряжение в данном случае является информативным параметром сигнала.

Для сжатого описания кардиограммы в ней выделяют ряд вторичных параметров; некоторые из них обозначены на рис. 2.3. Выбор вторичных параметров зачастую сопровождается отбрасыванием большого количества информации; так, сердечный ритм описывают последовательностью RR -интервалов, пренебрегая всеми остальными особенностями кардиограммы.

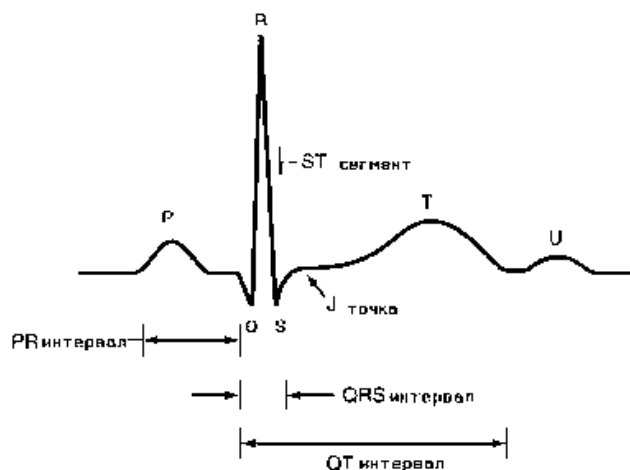


Рис. 2.3

Для работы с моделями в виде сигнальных функций разработано огромное число методов. Их совокупность образует *теорию сигналов*, изложенную во многих монографиях и учебниках.

Ещё один класс моделей составляют часто используемые при биологических исследованиях (не только на животных, но даже и на отдельных клетках) *модели-сценарии*. Параметрами таких моделей являются интервалы времени между отдельными событиями сценария, – например, от подачи стимула до подхода животного к кормушке.

Несколько подробнее о биологических моделях написано в пособии [2] на страницах 9–13. Там, в частности, отмечено использование моделей, не несущих никаких числовых параметров, – это, например, рисунки, иллюстрирующие взаимодействие молекул. Такие модели служат для рассуждений качественного характера, а измерение должно давать количественные результаты.

Не следует думать, что каждый класс моделей связан с определённой областью реальности. Имеются классы моделей, применимые к объектам многих областей.

Так, теорию управления интересуют только динамические свойства объектов, – поведение этих объектов во времени при различных воздействиях на них. Динамические модели теории управления могут описывать объекты самой разной природы – механические, электрические, теплотехнические, биологические и т. д., – но они описывают их с одной определённой стороны.

В самых различных областях встречаются ситуации, когда интересующий исследователя атрибут объекта зависит от целого ряда *факторов*. Классический пример – зависимость урожая какой-либо сельскохозяйственной культуры от сорта семян, состава и обработки почвы, режимов полива и освещения и т. д. Такого рода зависимости описываются моделями в виде *поверхностей отклика* в многомерном пространстве факторов. Это ещё один класс моделей универсального характера, не зависящих от физической природы объекта.

Некоторые модели применимы не только к реальным объектам, но и к абстрактным, мысленным конструкциям, – получаются своеобразные *модели моделей*. В качестве примера приведём *обобщённый импульс*, рассмотренный, наряду с другими вопросами, в книге выдающегося метролога Виктора Яковлевича Розенберга [9].

Эта модель может описывать реальный импульс электрической, механической или иной природы, и вместе с тем она применима, скажем, к графику плотности вероятности, пику хроматограммы и другим подобным абстрактным объектам. И в реальном, и в абстрактном случаях исследователя часто интересуют два вторичных параметра обобщённого импульса: *параметр положения* (для его определения нужно уметь найти *центр* импульса) и *параметр протяжённости*, характеризующий *ширину* импульса.

Как реальный импульс, так и, например, график плотности вероятности обычно характеризуются неопределённостью начала и конца, поэтому искать центр и ширину обобщённого импульса можно *разными способами*, дающими в общем случае и разные результаты. Они и рассмотрены в книге [9]. Нахождение третьего параметра, особенно важного при анализе хроматограмм, – *площади* импульса, – не столь неоднозначно, как нахождение центра и ширины обобщённого импульса.

Теперь, наверное, о моделях объектов сказано достаточно, чтобы у читателя сложилось впечатление как о разнообразии самих моделей, так и о разнообразии связанных с ними вопросов.

Но, поскольку мы занимаемся измерительной наукой, нужно ещё обратить внимание на метрологический аспект концептуального моделирования. Ведь при рассмотрении любой из сторон измерения необходимо задумываться о том, каким образом эта сторона влияет на досто-

верность результата. Для концептуальных моделей такое влияние связано с *адекватностью моделей*.

Любую модель объекта можно уточнять, теоретически – беспредельно. Но где-то обязательно нужно остановиться. Модель адекватна поставленной исследовательской задаче, если её уточнение не улучшает (или несущественно улучшает) решения этой задачи, а огрубление – заметно препятствует решению.

Например, модель рисунка 2.2 становится неадекватной, если входное напряжение меняется с частотой порядка нескольких десятков мегагерц, или если нужно обеспечить закон изменения выходного напряжения с такой точностью, при которой начинает сказываться диэлектрическая абсорбция конденсатора (его свойство как бы впитывать заряд и при разряде медленно его отдавать).

Электроэнцефалограмма при решении многих задач может быть аппроксимирована моделью в виде реализации стационарного случайного процесса, но в ряде случаев эта модель становится неадекватной, и может потребоваться учёт нестационарности или даже наличия характерных всплесков.

Применение к электрокардиограммам модного метода анализа сигнальных функций с помощью вейвлет-разложения (о нём кратко сказано в главе 7 пособия [1]) вряд ли разумно: отдельные сегменты кардиограммы соответствуют различным процессам в объекте, а вейвлет-разложение этого не учитывает.

Наверное, ясно, что эффективная параметризация в большой степени зависит от постановки исследовательской задачи и является скорее искусством, чем деятельностью по заданным правилам.

2.2. Шкалы и величины

Параметры концептуальных моделей абстрактны, как и сами эти модели. Каким образом удаётся связать эти параметры с реальностью, которой принадлежит объект?

Это чрезвычайно важный вопрос. В Ленинградском политехническом институте (теперь – университете) работал выдающийся методист Константин Константинович Гомоюнов, который настаивал на том, что нужно резко разделять *мир вещей* и *мир идей* (иногда он говорил ещё

о мире знаков). Эта идея пронизывала все его публикации, – например, итоговую книгу [10].

Но ведь должны же быть некие *посредники* между миром вещей и миром идей, иначе познание было бы невозможно! Одним из видов таких посредников являются *шкалы измерений*

Современное определение шкалы (в том смысле этого термина, который ему придаётся в теории измерений) можно найти не в основном терминологическом документе метрологии [3] – там термин *шкала* есть, но его определение неудачно, – а в параллельно действующих рекомендациях [11]:

“Шкала (измерений): Отображение множества различных проявлений количественного или качественного свойства на принятое по соглашению упорядоченное множество чисел или другую систему логически связанных знаков (обозначений)”.

Более подробно метрологическая концепция шкал изложена в книге [12], написанной авторами рекомендаций [11]. Правда, не со всеми положениями этой книги можно согласиться.

Так же, как текст обычного (например, англо-русского) словаря содержит отображение некоторого множества слов одного языка в множество слов другого языка, так и шкалу можно представить себе в виде своеобразного словаря, позволяющего осуществить “перевод” с “языка” некоторой выделенной стороны реальности на язык абстрактных символов, чаще всего чисел.

Этот *пограничный* характер шкалы (а вместе с ней и всей измерительной науки!) несколько замаскирован в приведённом нами определении по рекомендациям [11] словом *свойство*. Но ведь свойства (мы будем предпочитать термин *атрибуты*) характеризуют реальные объекты, и нельзя говорить или думать о шкалах, не имея в виду эти объекты. Не являются исключениями и так называемые психологические и социологические измерения: для лица, выполняющего эти измерения, субъективные оценки испытуемых являются реальностью.

Основная идея теории шкал – соответствие некоторых операций и отношений в “мире чисел” операциям и отношениям в мире реальных объектов – была высказана ещё в конце XIX века Германом Людвигом Фердинандом Гельмгольцем, в большой статье [13].

Например, он отмечал, что при *объединении* электрических проводников путём их последовательного соединения *складываются* их сопротивления, но возможно и *объединение* путём параллельного соединения, и тогда *складываются* проводимости проводников. В обоих случаях объединению реальных объектов соответствует суммирование значений величин, которые характеризуют эти объекты. В подобных ситуациях можно говорить о *физической аддитивности* величин.

Физически аддитивны такие величины как масса, длина, длительность, скорость движения, электрический ток, напряжение и многие другие.

Говоря об *отношениях* в реальном мире и в “мире чисел”, следует учитывать языковую трудность: в нашем языке слово *отношение* в применении к числам неоднозначно. В одних случаях оно соответствует английскому *relation*, а в других – *ratio*.

Например, $3 > 2$ – это *relation* (в данном примере – бинарное отношение строгого порядка), а $3/2$ – *ratio*. К сожалению, в теории шкал иногда приходится использовать оба значения слова *отношение* даже в одном предложении. Мы при необходимости будем пояснять нужное значение английским эквивалентом.

В качестве отношения в реальном мире, которому ставится в соответствие отношение (*relation*) чисел, Гельмгольц рассматривал, в частности, *физическое равенство*. Например, освещённости двух граничащих между собой поверхностей равны, когда глаз не улавливает границы между ними.

Отметим различие свойств физического и математического равенств. Математическое равенство транзитивно, а физическое (по крайней мере, в макром мире) – нет. Например, равноплечие весы могут казаться находящимися в равновесии, когда на их чашки помещены тела a и b , могут сохранить равновесие при телах b и c , но выйти из равновесия, если положить на чашки a и c .

Физическая аддитивность величин полезна для построения их шкал, но можно назвать несколько других полезных свойств величин. В частности, *длина* не только физически аддитивна, но характеризуется ещё и возможностями *перенесения* в пространстве, *хранения*, а также удобством *сравнения* – для двух стержней, наложенных друг на друга, легко можно установить отношение порядка: a длиннее b . Благодаря

простоте сравнения возможно *копирование* длины. Физическое равенство есть предельный случай отношения порядка, когда нельзя сказать, какой из объектов длиннее другого.

Конечно, полезные свойства величин относятся не ко всем видам объектов (так, переносимы только твёрдые тела).

Масса тоже переносима, хранима, а также поддаётся косвенному сравнению (на равноплечих весах уравниваются не непосредственно массы, а моменты сил, действующих на объекты в общем для них гравитационном поле). С помощью сравнения массу можно копировать.

Длительность (например, какого-либо события) не копируется, не хранится и не переносится по оси времени. Эти недостатки компенсируются наличием в природе *циклических* (в идеале – периодических) процессов: каждый следующий цикл как бы копирует предыдущий и примыкает к нему, автоматически обеспечивая и перенос по оси времени, и аддитивность.

Как видно, сколько-нибудь детальный анализ свойств даже важнейших величин, допускающих так называемое *фундаментальное измерение*, не прост. Ещё большие трудности встречаются при анализе измерения величин, не обладающих физической аддитивностью или какими-либо другими необходимыми для фундаментальной измеримости свойствами.

Некоторые из них поддаются *производному измерению*, – их значения находятся по результатам измерений нескольких других величин. Такова физически неаддитивная *плотность*, измеряемая через массу и объём тела. Другой пример – физически аддитивная *скорость*, измеряемая через длину пути и длительность движения, или иначе – с привлечением закона электромагнитной индукции.

Наконец, есть величины, допускающие только *ассоциативное измерение*, основанное на предположении, что подлежащая измерению величина связана монотонной зависимостью с некоторой другой измеримой величиной. Классический пример – *твёрдость* (способность тела сопротивляться проникновению), измеряемая по размерам отпечатка от вдавливаемого шарика или пирамидки, по высоте отскока бойка, бросаемого на поверхность объекта, по декременту затухания колебаний маятника, опирающегося на поверхность объекта, и т. п.

В течение нескольких десятилетий после статьи Гельмгольца появился ряд статей и книг, посвящённых развитию его идей применительно к физическим измерениям. Тем не менее, многие проблемы теории измерений оставались нерешёнными.

В 1946 г. в теории измерений произошла своеобразная революция. Она пришла со стороны *психофизики* – научной деятельности, направленной на изучение зависимости силы ощущений от интенсивности физических стимулов. Эта деятельность требовала *измерения ощущений*, но традиционная наука, опираясь на представления о сущности измерения, подобные тем, которые были выше выражены в определении М.Ф. Маликова, отрицала измеримость ощущений.

Выдающийся психофизик Стэнли Смит Стивенс в короткой статье о шкалах измерений, опубликованной в журнале Nature, – с неё и началась теория шкал, у Гельмгольца были только предпосылки! – предложил принципиально новое определение измерения как *приписывания чисел объектам по определённым правилам*.

В зависимости от этих правил Стивенс выделил четыре *типа шкал*.

В *номинальных шкалах* (с двумя разновидностями – шкалами наименований и шкалами классификации) правило состоит в том, что один и тот же числовой или иной символ не должен приписываться двум различным объектам (в шкалах наименований) или двум различным классам (в шкалах классификации).

В *ординальных* или *порядковых шкалах* большее число должно приписываться объекту с более сильным проявлением рассматриваемого атрибута; других требований нет.

В *интервальных шкалах* или *шкалах интервалов* равенство или порядок разностей между приписываемыми двум объектам числами должны соответствовать равенству или порядку интервалов между рассматриваемыми атрибутами этих объектов.

В *пропорциональных шкалах* или *шкалах отношений* (будем считать эти два термина синонимами), кроме всего сказанного, отношение (*ratio*) приписываемых двум объектам чисел должно соответствовать отношению атрибутов этих объектов.

Впоследствии были добавлены *абсолютные шкалы*, о которых скажем позже.

С математической точки зрения удобно характеризовать типы шкал *группами* (в смысле математической теории групп) *допустимых преобразований числовой системы*. Очевидно, что при работе в номинальных шкалах обозначения объектов или классов произвольны; их можно как угодно менять местами – это *группа перестановок*. Для порядковых шкал допустима группа *положительных монотонных преобразований*, не изменяющая порядка чисел.

Интервальные шкалы характеризуются *группой линейных преобразований*. Эти преобразования можно уже выразить формулой: $x' = ax + b$. На языке измерений b – это сдвиг нулевого отсчёта, a – изменение масштаба (единицы величины).

Для пропорциональных шкал допустимо только изменение масштаба: $x' = ax$. Иначе говоря, у них должен быть *естественный нуль*. Наконец, абсолютные шкалы допускают только тождественное преобразование: $x' = x$. У них наряду с естественным нулём должна быть *естественная единица*.

Сопоставляя сказанное о шкалах со сказанным выше о величинах, можно видеть, что порядковые шкалы свойственны ассоциативным измерениям, а пропорциональные – фундаментальным и производным. Естественные единицы появляются в основном при измерениях *относительных величин*, таких как, например, коэффициент усиления в электронике. В интервальных шкалах измеряется, например, текущее время (его нулевой отсчёт произволен).

Что касается номинальных шкал, то вряд ли можно считать измерением присвоение обозначений объектам или классам (хотя некоторые авторы делают и это).

Теория шкал, начало которой было положено статьёй С.С. Стивенса, была затем развита, главным образом в математическом плане, в большом числе публикаций разных авторов. На каком-то этапе (сейчас трудно установить, когда именно) появился термин *репрезентационная теория*, т. е. теория представления (репрезентации) атрибутов реальных объектов числами или абстрактными знаками. Она, как и само понятие шкалы, *выходит за рамки измерений*. Обзор её различных направлений дан в несколько устаревшей статье [14] (там эта теория неточно названа репрезентационной теорией *измерений*).

2.3. Величины и параметры

При организации измерения параметрам, выделенным в модели объекта, должны быть поставлены в соответствие измеряемые величины. Эту операцию сейчас выполняют неявно, потому что сама связь между величинами и параметрами редко осознаётся.

Покажем эту связь на примере *длины* – величины, наиболее богатой связанными с ней параметрами.

Давно замечено, что длина в различных ситуациях выступает как бы под разными именами. Считалось (и сейчас считается), что этими именами обозначаются *однородные величины*, – этот термин вошёл даже в официальные терминологические документы.

С нашей точки зрения нет никаких “однородных величин”, а есть различные *параметры*, соответствующие *одной и той же величине*. Величина характеризуется только своей шкалой, а параметры привязаны к объектам определённых видов.

Возьмём простейшую геометрическую модель – параллелепипед. У него есть длина, ширина и высота. Все эти три параметра соответствуют одной величине – длине (таким образом, термин *длина* оказывается неоднозначным, он может обозначать и величину, и параметр). Перечислим некоторые другие параметры, соответствующие длине:

- толщина (для объектов в виде пластин или слоев);
- глубина (для глухих отверстий, сосудов, водоемов);
- уровень (для жидкостей или сыпучих тел в сосуде или водоеме);
- дальность (для снарядов, летательных аппаратов и т. д.);
- путь, перемещение (для движущихся объектов);
- пробег (для транспортных средств);
- расстояние (для двух объектов в системе);
- диаметр (для круглых тел);
- зазор (для близко расположенных тел).

Конечно, методы и средства измерений для перечисленных объектов, как правило, различны, но шкала длины у них одина.

Сказанное о длине справедливо также для длительности и многих других величин. Например, *предел прочности* какого-либо материала есть параметр, соответствующий *механическому напряжению* как физической величине.

Правда, различие между величиной и параметром стирается, если величина определена только для объектов или ситуаций какого-либо одного вида. Примером может быть *активность фермента*, определяемая по единственной реакции.

С некоторым запозданием отметим, что сейчас принято различать *математические величины*, определяемые на абстрактных моделях, *физические величины*, измеряемые объективными экспериментальными методами (не обязательно в пределах физики!) и *нефизические величины*, значения которых находят путём опроса людей и анализа документов. Шкалы строятся для физических и некоторых нефизических величин; математические величины сами являются числами.

Интересно также существование параметров, которые можно называть *полуфизическими*: это *субъективные модификации объективных физических величин*. Примерами могут быть *рабочее время*, *жилая площадь*, *коэффициент полезного действия* (полезность – понятие субъективное!) и многие другие.

2.4. Построение и хранение шкал

Шкалы многих величин, – таких как масса, длина, электрическое напряжение и т. п., построены давно, хранятся в метрологических учреждениях и постоянно совершенствуются. Ситуации, когда исследователь сам строит нужную ему шкалу (например, путём последовательного разведения стандартного раствора белка) тоже встречаются, но представляется более интересным выяснить по возможности в общем виде, что именно требуется для построения и хранения шкал различных типов. Ведь важнейшей задачей является обеспечение *общезначимости* шкал, без чего нельзя достичь единства измерений.

В основе любой общезначимой шкалы (кроме абсолютной) должны лежать те или иные *реперные объекты*, поддающиеся хранению.

Для построения *шкалы отношений* теоретически достаточно одного реперного объекта, определяющего единственную точку шкалы. В государственном масштабе такой реперный объект называется государственным первичным эталоном или национальным эталоном. Обычно говорят, что эталон “хранит единицу величины”, хотя хранимая им точка чаще всего не совпадает с единичной точкой шкалы.

Шкала фундаментально измеримой величины может быть вся построена *по одной точке*.

Например, человек, попавший на необитаемый остров и располагающий резистором 1 Ом, гальваническим элементом, гальванометром, неограниченным запасом провода для изготовления резисторов и многими инструментами, смог бы без особого труда, собрав четырёхплечий мост, изготовить сначала (методом замещения) второй резистор 1 Ом, а затем резисторы с любыми кратными и дольными значениями сопротивлений.

Шкала интервалов, вообще говоря, задаётся двумя точками. Здесь уместно вспомнить, что до разработки термодинамической температурной шкалы жидкостные термометры градуировались в основном именно по двум реперным точкам – так, шкала Цельсия основывалась на точках замерзания и кипения воды.

Но температура не аддитивна и не обладает другими полезными для построения шкалы свойствами, поэтому интерполировать между реперами и экстраполировать вне охватываемого ими интервала исходно приходилось методами ассоциативного измерения, располагая деления равномерно *по длине капилляра*.

В начале XIX века выяснилось, что показания термометров с разными жидкостями, градуированных по одним и тем же реперам, расходятся. Между прочим, это означает, что обычное для нашего времени мнение о том, что первые жидкостные термометры работали в *интервальных шкалах*, неверно – интервалы были неравными.

Возникшая проблема была решена только разработкой термодинамической шкалы Кельвина, уже не опиравшейся на закон расширения какого-либо конкретного вещества и имевшей естественный нуль. Для этой *шкалы отношений* потребовался один основной репер, в качестве которого была выбрана тройная точка воды (0,01 °C).

Формально единица температуры – кельвин – определяется как $1/273,16$ температуры тройной точки воды. Но, конечно, непосредственно реализовать это определение невозможно. Построение всей шкалы производится на основе физических законов с помощью сложных экспериментов.

При этом оказалось целесообразным введение целого ряда стандартизованных в международном масштабе реперных точек, соответст-

вующих фазовым переходам различных веществ. Средства интерполяции между этими реперами тоже стандартизованы, и всё это вместе образует *международную температурную шкалу*.

Первая её версия – МТШ-27 – появилась в 1927 г.; в настоящее время действует МТШ-90 [15]. Совершенствование международной температурной шкалы имеет основной целью лучшее приближение к теоретической термодинамической шкале.

На примере температурных шкал хорошо видно различие между идеальной *теоретической шкалой* и тем, что в документе [3] названо *принятой опорной шкалой*. Пример последней – МТШ-90.

Возвращаясь к интервальным шкалам, заметим, что шкалы Цельсия и Фаренгейта в результате их выравнивания по термодинамической шкале действительно стали интервальными.

Не может быть построена по двум точкам важнейшая интервальная шкала – *шкала времени*, но причина здесь в том, что моменты времени не поддаются хранению. Эту шкалу, с тех пор, как люди перестали отсчитывать время только по Солнцу, приходилось непрерывно *вести* с использованием высокостабильных колебательных систем – с XVII века это были маятниковые часы, с 1930-х годов кварцевые, в настоящее время атомные.

Интересно выяснить, как согласуется понятие шкалы времени с тем определением шкалы, которое было приведено выше в разделе 2.2. Напомним его формулировку:

“Отображение множества различных проявлений количественного или качественного свойства на принятое по соглашению упорядоченное множество чисел или другую систему логически связанных знаков (обозначений)”.

Как уже было сказано, недостатком этого определения является отрыв “проявлений свойства” от реального объекта (или класса объектов, эквивалентных по проявлениям свойства). Будем считать, что объект в определении шкалы подразумевается.

Рассмотрим в качестве примера шкалу времени, используемую в бытовых кварцевых часах. Непрерывно поддерживаемые колебания кварца обычно имеют частоту $2^{15} = 32768$ Гц. В конце каждого цикла колебаний (или в другой его точке, что непринципиально), формируется импульс, поступающий на электронный счётчик.

Сам цикл как отрезок физического процесса есть *объект*; его длительность – *проявление свойства*; формируемый импульс – *кодový знак*. Отображение, составляющее сущность приведённого выше определения шкалы, в данном случае заменяется *непосредственной связью* объектов с кодовыми знаками. Суммарной длительности какого-либо числа последовательных циклов соответствует такое же число кодовых знаков, каждый из которых имеет единичный вес.

На выходе 15-разрядного двоичного счётчика получается сигнал с частотой 1 Гц, который может использоваться для отсчёта секунд или для имитации “тиканья” часов. Дальнейшее можно не пояснять.

Такого рода шкалы (не обязательно интервальные!), состоящие из конкретных объектов, с которыми непосредственно связаны кодовые знаки, будем называть *материальными кодированными шкалами*.

Вернёмся теперь к вопросу построения и хранения шкал.

Относительно *шкал порядка* можно сказать следующее: если порядок устанавливать только путём непосредственного сравнения объектов (например, минерал *a* твёрже минерала *b*, если *a* наносит царапину на *b*), то для хранения всей шкалы потребовалось бы бесконечное множество реперов. При конечном множестве реперов, как в известной минералогической шкале Мооса, получается *шкала упорядоченных классов*, промежуточная между шкалой классификации и шкалой порядка.

Такие шкалы очень распространены; в частности, в шкале упорядоченных классов оцениваются знания учащихся. Поскольку здесь нет ни реперов, ни способов сравнения, шкала получается *нечёткой*. Впрочем, полной чёткостью обладают только теоретические шкалы.

Общезначимые и поддающиеся хранению шкалы порядка строятся методами ассоциативных измерений. Типичным примером являются применяемые в промышленности шкалы твёрдости по Бринеллю, Роквеллу и др. Перевод значений твёрдости из одной ассоциативной шкалы в другую может быть только приближенным.

Заканчивая разговор о шкалах, нужно сказать несколько слов о том переходном состоянии, в котором находится понятие шкалы в современной метрологии.

Дело в том, что классическая метрология формировалась на материале фундаментально измеримых величин и первоначально не

ощущала потребности в понятии шкалы, – ей было достаточно понятия *единицы величины*.

Напомним определение измерения по Михаилу Федосеевичу Маликову, которое было приведено в разделе 1.2:

“Измерением мы называем познавательный процесс, заключающийся в сравнении путём физического эксперимента данной величины с некоторым её значением, принятым за единицу сравнения”.

Каким образом можно *сравнить* некоторую реализацию величины, скажем, рост взрослого человека, с единицей этой величины, в данном примере с метром? Непосредственное сравнение позволяет только утверждать, что рост человека больше метра. Для того, чтобы уточнить это суждение, необходимо, пользуясь аддитивностью и другими свойствами длины, построить *участок её шкалы*, например, разметить двухметровый стержень на сантиметры.

Между прочим, ещё философ XV века Николай Кузанский писал:

“Все исследователи судят о неизвестном путем пропорционирующего сравнения с чем-то уже знакомым”.

Процедуры этого *пропорционирования*, вероятно, казались метрологам-теоретикам очевидными и не заслуживавшими внимания, а такие шкалы, как, например, шкала Бофорта для силы ветра, вообще находились вне поля зрения метрологов.

Разработка (в середине XIX века) термодинамической температурной шкалы могла бы показать, что понятие *единицы величины* вторично по отношению к понятию *шкалы*... Но только могла бы – она не изменила общей атмосферы в метрологии.

В фундаментальном терминологическом стандарте (сейчас не действующем) ГОСТ 16263–70 определение *величины* содержало требование, чтобы размер величины в одном объекте был в некоторое число раз больше или меньше, чем в другом. Тем самым фактически утверждалось, что величина может измеряться только в пропорциональных или абсолютных шкалах. Получалось, что, например, твёрдость не является величиной.

Термин *шкала* в этом стандарте был (существовали же температурные шкалы, шкалы твёрдости и другие!), но стоял далеко не на первом месте.

Общее понятие шкалы (в смысле репрезентационной теории) стало известно отечественным специалистам-измерителям в конце 1960-х годов из литературы по *психологическим измерениям*.

Несколько позже понятие шкалы независимо от репрезентационной теории появилось в разных вариантах сразу у нескольких авторов, развивавших теорию аналого-цифрового преобразования, – в частности, во втором издании книги Эммануила Исааковича Гитиса “Преобразователи информации для электронных цифровых вычислительных устройств”.

Фактически здесь имелись в виду *материальные кодированные шкалы*, упомянутые нами выше. Однако понятие материальной кодированной шкалы, предложенное в статье [16], до сих пор не стало общепринятым и отсутствует в официальной метрологической терминологии.

В последних десятилетиях XX века специалисты-измерители (Людвик Финкелстайн в Лондоне, Сергей Васильевич Муравьев в Томске, Светлана Васильевна Прокопчина и автор настоящего издания в нашем городе) опубликовали ряд разрозненных работ, посвящённых шкалам в смысле репрезентационной теории.

В среде профессиональных метрологов, в подмосковном Зеленограде, образовалась небольшая группа, занявшаяся систематическим исследованием шкал, используемых в метрологии и измерительной технике. Александр Сергеевич Дойников защитил по этой тематике докторскую диссертацию. Именно эта группа разработала рекомендации [11] и издала справочник [12].

Однако в основной массе современных работ по метрологии понятие шкалы до сих пор ещё не заняло подобающего места. В терминологических рекомендациях [3], разработанных позже, чем [11], содержится, правда, термин *порядковая величина*, однако важнейшее определение *шкалы*, как уже было сказано, сформулировано неудовлетворительно. Ссылок на [11] в [3] нет.

Будущему исследователю при обращении к метрологической литературе придётся учитывать эту неустановившуюся ситуацию.

2.5. Представление результата измерения

Согласно одному из предлагавшихся определений, измерение есть *нахождение значения величины с помощью технических средств*. Значит ли это, что результатом измерения является значение величины? Нет, необходима ещё оценка достоверности полученного значения. Добавив её, получаем, например, результат (175 ± 1) см.

Теперь предположим, что такая запись обнаруживается, скажем, через неделю после измерения. Наверное, мы будем долго думать, что же она означает. Возможно, это рост, – но чей?

Если нужно, чтобы результат измерения сохранял значимость долгое время и мог быть использован различными людьми, он должен быть оформлен в виде протокола, содержащего необходимые сведения об объекте. В частности, должен быть указан параметр, подлежащий нахождению (сейчас мы говорим об измерении *одной* величины!), а также сведения о самой процедуре измерения.

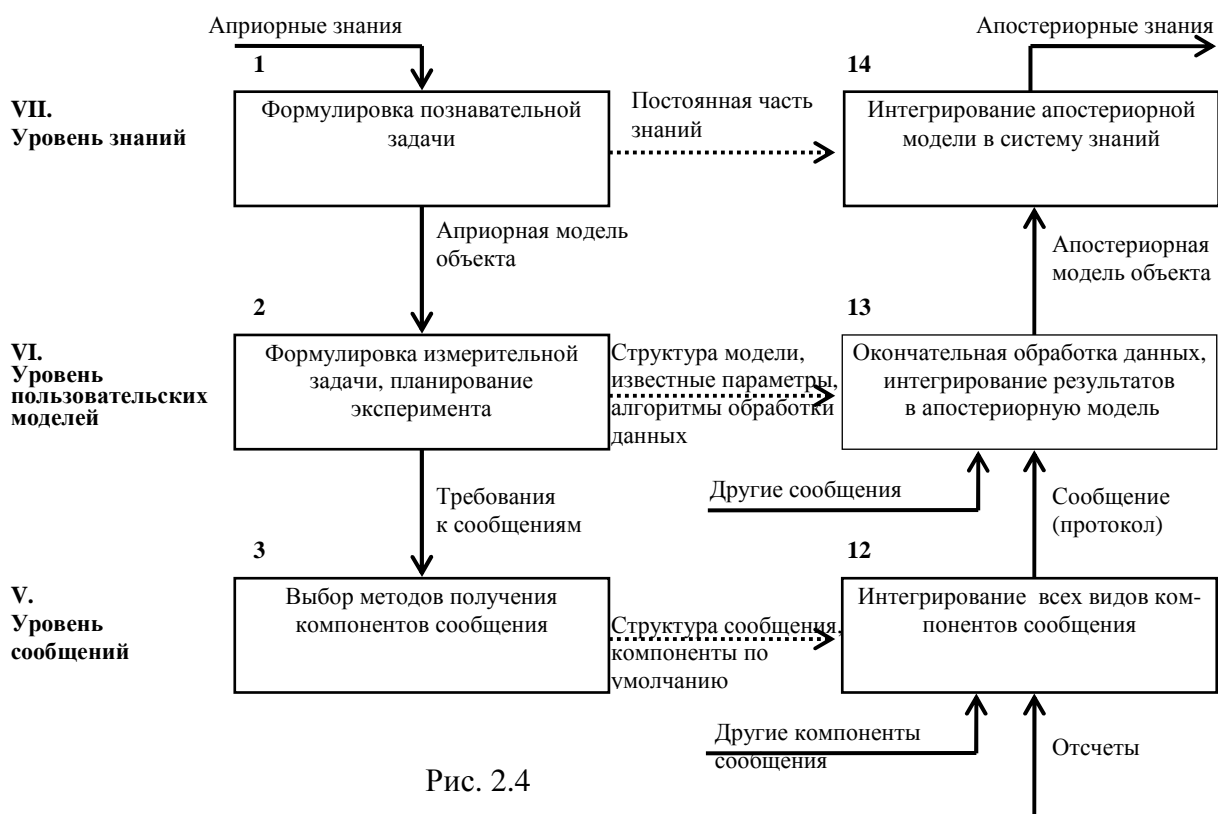


Рис. 2.4

Чтобы лучше понять ситуацию, которую мы сейчас рассматриваем, обратимся к рис. 2.4. Он представляет собой фрагмент рисунка 1.4, – три его верхних уровня. Но сейчас разговор идёт только об

уровне V, уровне сообщений. Он получает с нижележащего уровня отсчёты, т. е. значения измеряемой величины, и объединяет их с другими необходимыми компонентами. Часть этих компонентов (например, сведения о дате и условиях измерения) получается в эксперименте, а другая часть (например, имя объекта) известна априорно, “по умолчанию”. Из всего этого и формируется сообщение (протокол).

Понятно, что при очень простых измерениях протокол сводится к минимуму, а при сложных экспериментах, требующих измерения ряда величин, он может передаваться на следующий уровень в неявном виде. Если же в ответственном эксперименте измеряется единственная величина, уровни V и VI сливаются, и апостериорная модель объекта целиком входит в представление результата измерения.

Остановимся на вопросе получения и представления данных о *достоверности результата* (реально оценивается обратная характеристика – степень недостоверности). Начнём с принципиального парадокса: мы должны получить и представить сведения о *степени нашего незнания*. А как же мы можем *знать* степень незнания?

В классической метрологии этот парадокс проявляется в более конкретной форме. Недостоверность результата характеризуется его *погрешностью*, которая исходно определяется как разность между значением величины, полученным путём измерения, и *истинным значением* величины.

Но истинное значение неизвестно! Более того, по мнению автора настоящего издания, оно *не существует*: значение величины, характеризующей объект, при работе в пропорциональной шкале есть отношение (ratio) этой величины к единице, воспроизводимой эталоном, но ведь и объект, и эталон принадлежат реальному миру, в котором *всё нечётко*. Об этом ещё много лет назад писала Софья Александровна Яновская, выдающийся советский философ и логик (цитируем по посмертно изданному сборнику избранных работ [17], страница 233):

«В действительности суть дела состоит в том, что “идеально точные” величины являются лишь огрубленным, упрощенным приближением к тому, что нам нужно при их помощи отобразить, хорошим приближением, поскольку мы таким образом отвлекаемся от расплывчатости границ исследуемых объектов или явлений...».

Возможно, именно эта расплывчатость подразумевается в рекомендациях [3] под именем *диапазона истинных значений*. Так ли это – не берёмся утверждать: в [3] нет определения термина, противоречащего традиции, а сам он встречается только в примечаниях.

Классическая метрология выработала методы оценивания границ интервала, в котором может находиться погрешность. Но в начале 1990-х годов в метрологии произошла если не революция, то нечто вроде дворцового переворота. Группа зарубежных научных организаций разработала и опубликовала международный документ *Guide to the expression of uncertainty in measurement* (Руководство по выражению неопределённости в измерении).

В этом документе (будем для краткости называть его “Гайдом”) в качестве показателя недостоверности измерения предложено использовать не границы погрешности, а *неопределённость*. Последняя определяется как “параметр, связанный с результатом измерения, характеризующий рассеяние значений, которые могли бы быть обоснованно [reasonably – в буквальном переводе *разумным образом*] приписаны измеряемой величине”.

Парадокс не пропал, он проявляется в словах *обоснованно приписаны*, которые явно указывают на субъективность оценки. Кроме того, сосредоточение внимания на *рассеянии* не позволяет говорить о возможном *смещении* результатов измерения.

К понятиям погрешности и неопределённости мы вернёмся в другой части курса, ближе к его концу, а сейчас как бы авансом обсудим вопрос о *представлении* показателей недостоверности.

Для начала ещё раз подчеркнём, что погрешность и неопределённость – понятия разного уровня. Погрешность присуща каждому измерению в отдельности; мы её не знаем, и вынуждены оценивать *границы интервала*, в котором она может находиться. Неопределённость прямо является оценкой интервала, в пределах которого могут рассеиваться результаты измерения одной и той же величины.

Как погрешность, так и рассеивание результатов измерений принято описывать вероятностной моделью. Неправильно было бы говорить, что погрешность (или результат измерения) “*подчиняется* вероятностному закону”. Самое большее, что можно сказать, – это то, что экспериментальные данные *не противоречат* вероятностной модели.

Наиболее простой оценкой разброса результатов измерений является среднеквадратическое (root mean square, rms) отклонение от среднего арифметического. В терминах “Гайда” это u_c – *стандартная неопределённость* (standard uncertainty).

Но в большинстве случаев заметная доля результатов измерений может отклоняться от среднего больше, чем на u_c . И возникает естественное желание оценить именно границы рассеивания.

Обычная процедура такова: проверяется гипотеза о том, что наблюдаемый разброс данных *мог бы иметь место* при нормальном распределении их вероятностей. Далее это распределение принимается нормальным, и экспериментальное среднеквадратическое отклонение умножается на некоторый *коэффициент охвата* [3] (в вышедшем раньше пособии [1] coverage factor “Гайда” был переведён иначе, – как *коэффициент покрытия*). Коэффициент охвата находится по таблице в зависимости от объёма выборки и *вероятности охвата*, т. е. предполагаемой доли результатов, которая должна находиться внутри полученных границ, – обычно она принимается равной 0,9; 0,95 или 0,99.

Нормальное распределение предпочитается по двум причинам: во-первых, оно теоретически получается, если разброс результатов вызван многими примерно равноценными причинами (отклонение от нормальности может указывать на наличие резко выделяющейся помехи, которую следует найти и устранить); во-вторых, на нормальное распределение ориентировано большинство методов обработки данных.

В “Гайде” приведены следующие примеры представления неопределённости результата взвешивания:

$$“m = 100,02147 \text{ g}; \quad u_c = 0,35 \text{ mg}.$$

$$m = 100,02147(35) \text{ g}.$$

$$m = 100,02147(0,00035) \text{ g}.$$

$$m = (100,02147 \pm 0,00035) \text{ g}.$$

$m = (100,02147 \pm 0,00079) \text{ g}; \quad u_c = 0,35 \text{ mg}; \quad k = 2,26$, получен на основе t -распределения для $\nu = 9$ степеней свободы и определяет интервал, оцениваемый как имеющий доверительный уровень 95%”.

Как видно, в первых четырёх примерах указана только стандартная неопределённость. Между прочим, из четвёртого примера следует,

что в записи типа “ (175 ± 1) см” неопределённость ± 1 см должна пониматься как оценка *среднеквадратического отклонения* результатов. Действительным же значением роста вполне может быть как 173 см, так и 177 см. Во избежание недоразумений следует, не полагаясь на “Гайд”, дополнять такие записи хотя бы кратким комментарием.

Структура *подробного* комментария рекомендована пятым примером, в котором сообщается *расширенная неопределённость*. Из комментария видно, что в указанных границах предполагается нахождение 95% возможных результатов (очевидно, это и есть *вероятность охвата* по [3]).

Более традиционное представление *границ погрешностей* по существу отличается только терминологией (так, *доверительная вероятность* – это традиционный термин). Однако в рекомендациях [3] содержится специальная оговорка:

«Интервал охвата не следует отождествлять с “доверительным интервалом” во избежание путаницы с этим статистическим понятием».

Почему “не следует” – не объяснено; возможно, дело здесь в том, что, согласно “Гаиду”, только часть составляющих неопределённости (“типа А”) оценивается статистическими методами, а другая часть (“типа В”) – нестатистическими. По мнению автора настоящего издания, пятый пример, где в комментарии описаны типичные статистические операции, противоречит процитированной нами оговорке.

В заключение отметим, что оба способа представления неопределённости (или границ погрешности) имеют свои недостатки.

Если указана стандартная неопределённость (или среднеквадратическое отклонение), то она психологически воспринимается как граничное значение, и результат кажется более точным, чем он есть в действительности.

С расширенной неопределённостью или доверительным интервалом дело обстоит сложнее. То, что наблюдаемый разброс результатов *в общем* не противоречит нормальному (или, как оговорено в [3], какому-либо другому) распределению, совсем не гарантирует поведения погрешностей в области малых плотностей вероятности, – “на хвостах” распределения.

Поэтому вывод, скажем, о ширине доверительного интервала с доверительной вероятностью 99% по выборке объёмом даже несколько десятков измерений никак нельзя считать надёжным. На это ранее обращал внимание П.В. Новицкий.

Заметим кстати, что история науки сохранила сведения о многолетних измерениях разными исследователями одних и тех же величин – мировых констант, таких как, например, скорость света. Во многих случаях расхождение полученных результатов оказывалось больше, чем это следовало из приводимых исследователями оценок границ погрешностей. Это указывает на *тенденцию занижения* этих оценок – то ли по отмеченной выше причине, то ли из-за наличия источников погрешности, не замеченных экспериментаторами.

2.6. Интерпретация результата

Если поставленная перед исследователем задача ограничивается измерением одной заданной величины, то после представления результата в соответствии с предыдущим разделом эту задачу можно считать выполненной. Но, как было сказано выше в конце первой главы, измерение может выполняться как часть некоторой *объемлющей системы*.

На рисунках 1.4 и 2.4 это отражено наличием верхних уровней, вплоть до уровня знаний.

Напомним, что в качестве объемлющих систем для измерения нами были перечислены:

- Исследование.
- Измерительный контроль, испытания.
- Распознавание.
- Диагностика.
- Управление.

Переход на уровень одной из этих систем требует определённой *интерпретации* результата измерения (или ряда результатов измерений одной или разных величин). В большинстве случаев интерпретация заключается в формировании вывода *качественного характера*.

Попытаемся коротко обрисовать особенности интерпретации результатов измерений для перечисленных объемлющих систем.

При *исследовании* одна из возможных ситуаций состоит в том, что измерение выполняется для подтверждения или отбрасывания некоторой *гипотезы*.

Замечательный пример из истории науки – знаменитый эксперимент Майкельсона и Морли по измерению скорости света в направлении движения Земли и в поперечном направлении. Скорость света оказалась одинаковой во всех направлениях, и пришлось принять казавшуюся невероятной гипотезу о постоянстве скорости света независимо от движения его источника.

Проверка не столь глобальных гипотез встречалась, например, в студенческих экспериментах, описанных в пособии [2]. Так, один из студентов проверял гипотезу об успешности лечения пациентки, сравнивая электромиограммы, полученные с её здоровой и больной ног. Можно найти массу примеров использования измерений для проверки гипотез об эффективности того или иного препарата или о роли того или иного белка в организме.

Другая ситуация состоит в установлении вида некоторой *зависимости*. Здесь в качестве классического примера можно назвать эксперимент Георга Симона Ома по определению зависимости силы тока в электрической цепи от длины проводника, включённого в цепь. Результатом стала формула для тока: $I = a/(b + x)$, где a и b – константы для данной конкретной цепи, а x – длина вводимого в неё проводника (сечение проводника и свойства материала считались постоянными).

Пример с экспериментом Ома довольно прост; современные исследователи изучают очень сложные зависимости, – назовём хотя бы докторскую диссертацию Владимира Вячеславовича Пивоварова, в которой была построена *динамическая модель нервной регуляции кровообращения*.

Вообще говоря, при проверке гипотезы нужна *оценка достоверности*, как при контроле (который будет рассмотрен ниже), а при установлении вида зависимости – *оценка точности*. Так, нас в школе учили, что в законе электростатического взаимодействия Кулона расстояние между взаимодействующими зарядами возводится в квадрат. Однако Генри Кавендиш, который первым поставил серьёзный эксперимент для проверки этого закона, установил только то, что показатель степени *может находиться в пределах* от $2 - 1/50$ до $2 + 1/50$. После него опыт

неоднократно повторяли, каждый раз уменьшая оценку неопределённости, но, конечно, *до нуля её не снизили*. Заинтересовавшемся читателю рекомендуем статьи и книги С.Р. Филоновича.

Измерительный контроль или испытания в качестве окончательного результата имеют оценочное суждение об объекте: годен он или негоден. Поясним, что слово *измерительный* добавлено потому, что бывает *элементарный контроль*, – например, контроль деталей с помощью калибров, – не требующий измерений. Испытание отличается от контроля тем, что его объект подвергается различного рода воздействиям.

Обычно назначают некоторые *допуски* на параметры контролируемого изделия или на функционирование испытываемого устройства. При многопараметрическом контроле или испытании изделие считается годным, если результаты измерений указывают на то, что *каждый из параметров* не выходит за пределы соответствующего допуска. Заметим, что таким способом осуществляется переход от пропорциональных или ассоциативных шкал измеряемых величин к шкале классификации с двумя классами: годен – негоден.

Нужно заметить, что требование нахождения в допуске *каждого* из многих контролируемых параметров может оказаться слишком жёстким. Вполне возможна ситуация, когда выход за допуск одного или даже нескольких параметров компенсируется изменением других параметров. Это особенно справедливо для случаев, когда контролируемым объектом является организм человека (или животного), компенсаторные возможности которого очень богаты. Но расширение допусков в таких ситуациях возможно только после тщательных исследований.

Оценку достоверности результата контроля (или испытания) рассмотрим на упрощённом примере контроля по единственному параметру. Возможная недостоверность (вероятность ошибки) обуславливается погрешностью измерения этого параметра.

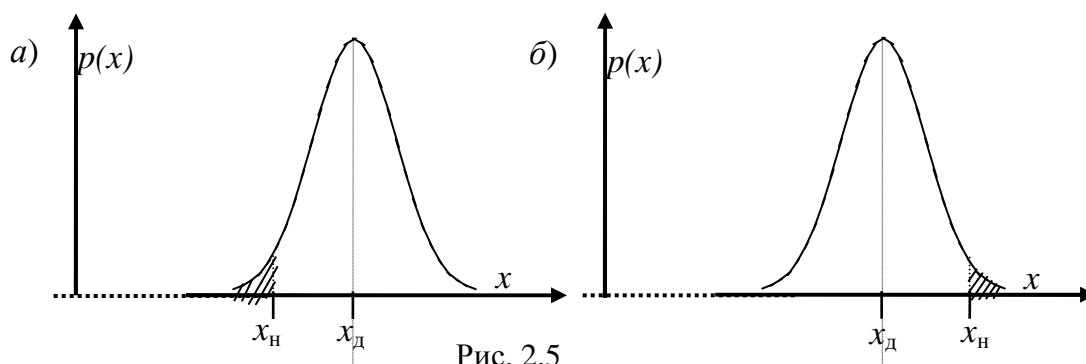
На рис. 2.5 (он заимствован из пособия [1]) $p(x)$ – плотность вероятности результата измерения; x_d – действительное значение измеряемого параметра; x_n – норма (предполагается, что объект годен, если измеряемый параметр превышает норму).

Заштрихованные на рисунке площади соответствуют вероятностям:

а) забраковать объект, который в действительности годен (ошибка первого рода);

б) пропустить негодный объект (ошибка второго рода).

Для дальнейших расчётов нужно знать вероятностное распределение измеряемого параметра в партии контролируемых изделий. Этим мы здесь заниматься не будем.



Распознавание как и контроль, сводит исходные данные к шкале классификации, но отличается бóльшим числом классов (например, распознаваться могут фонемы в речевом сигнале, буквы в печатном тексте и т. п.), а также бóльшим объёмом исходных измерительных данных и более сложными алгоритмами их обработки, от которых в основном и зависит достоверность распознавания.

Близка к распознаванию **идентификация** (не упоминавшаяся выше), но этот термин используется в нескольких различных значениях. В технике *управления* под идентификацией понимают нахождение характеристик динамического звена (см. ниже страницу 53). При этом различают *структурную идентификацию*, целью которой является нахождение вида дифференциального уравнения, описывающего поведение звена, и *параметрическую идентификацию*, имеющую целью нахождение параметров этого уравнения. И та, и другая разновидность основывается на обработке входного и выходного сигналов звена.

В технике *защиты объектов* идентифицируют человека, пытающегося проникнуть на объект, причём используют самые разнообразные признаки, поддающиеся измерению. Есть и другие значения термина *идентификация*, в том числе не связанные с измерениями.

Диагностика – термин, составленный из греческой приставки *диа-* (одно из значений которой совпадает со значением русской при-

ставки *раз-* или *рас-*), и корня *гносис*, означающего *познание*. В буквальном переводе получается снова *распознавание*. Но необходимость нового термина объясняется тем, что при диагностике распознаётся *состояние объекта*. Последний может быть живым организмом или техническим устройством.

Обычно при диагностике ставится задача не столько распознать общее состояние сложного объекта, сколько найти в его структуре элементы или блоки, функционирующие нежелательным образом. Для этой цели накоплен большой арсенал *диагностических признаков*, многие из которых выявляются путём измерений.

Например, у человека измеряются температура, артериальное давление, частота сердечных сокращений, а при более подробном исследовании – и многое другое. Полученные данные анализируются *совместно*. В технике одним из важных средств диагностики является измерение и анализ вибраций машин.

Наконец, в системах *управления* измерения используются для выявления состояния управляемого объекта (которое затем сравнивается с желаемым состоянием), а иногда также для оценивания внешних воздействий на объект, влияние которых должна компенсировать система управления. Обратим внимание на важность понятия *пространства состояний* объекта диагностики или управления.

Прежде чем закончить разговор об интерпретации данных, получаемых при измерениях, обратим внимание на то, что операции типа интерпретации выполняются *и в самом ходе измерения*. На рис. 1.4 это уровни IV и V правой, восходящей ветви. На уровне IV кодовые знаки, являющиеся результатом аналого-цифрового преобразования, интерпретируются как числа; на уровне V эти абстрактные числа интерпретируются как значения измеряемой величины. В обоих случаях интерпретация требует привлечения *сторонней информации*: нужно заранее получить характеристику аналого-цифрового преобразователя; нужно заранее знать, какая величина измеряется.

Затронутый сейчас вопрос представляется чрезвычайно важным с точки зрения теории познания. Дело в том, что измерительные операции уровней I, II и III при современном состоянии техники легко автоматизируются, а вышележащие уровни требуют участия человека с его богатым предшествовавшим опытом.

Проводя аналогию с обработкой сенсорной информации в человеческом организме, можно сказать, что уровни I, II и III являются “физиологическими”, а вышележащие уровни – “психологическими”.

Это в какой-то степени объясняет существующую до сих пор пропасть между нейрофизиологией и психологией: в нервной системе переход на психологические уровни требует привлечения *прошлого человеческого опыта*, т. е. выхода далеко за пределы нейрофизиологического канала *передачи информации*.

2.7. Замечания о состоянии измерительной науки

Мы рассмотрели пока только одну сторону измерения из намеченных четырёх, но уже сейчас можно высказать некоторые впечатления от рассмотренного.

Для начала составим перечень основных обсуждавшихся вопросов:

- Структуры концептуальных моделей объектов.
- Параметризация.
- Шкалы, величины и всё, что с ними связано.
- Представление результата измерения.
- Интерпретация результата (или результатов) измерений.

Попробуем теперь взглянуть как бы со стороны на состояние соответствующих разделов измерительной науки.

Понятие *модели* как некоторой мысленной или знаковой конструкции вообще появилось в науке сравнительно недавно; по-видимому, ему немногим больше пятидесяти лет (до этого под моделями имелись в виду главным образом материальные объекты). Сейчас оно довольно интенсивно используется, но трудно назвать серьёзную работу, где бы оно систематическим образом исследовалось.

В измерительную науку понятие концептуальной модели объекта проникло позже по сравнению со смежными областями, – ещё совсем недавно девиз специалиста-измерителя можно было формулировать так: “Укажите мне *величину*, и я её измерю!”.

Вместе с тем измерительная наука оказалась в выигрышном положении в смысле возможности общего подхода к моделям объектов: в других областях занимаются отдельными классами моделей (напри-

мер, в теории управления – динамическими моделями); но при измерениях приходится сталкиваться с моделями всех возможных классов.

Неудивительно, что именно своеобразно мыслящий метролог Виктор Яковлевич Розенберг (он работал там же, где А.С. Дойников с соавторами, в подмосковном ВНИИФТРИ) в своё время выдвинул идею *тезауруса моделей*, – в нынешней системе понятий это что-то вроде большой базы знаний. Но сам он почти ничего не сделал для реализации этой грандиозной идеи.

Одна из наиболее интересных книг о моделях [18] написана тоже метрологом, Ярославом Григорьевичем Неуйминым. По-видимому, эта книга была лишь “заготовкой” для более серьёзной работы, но смерть Ярослава Григорьевича не дала ему возможности развить выбранную тему.

Говоря о базах знаний, мы касаемся области, получившей название *искусственного интеллекта*. Возможно, именно это имел в виду В.Я. Розенберг, когда на одной из метрологических конференций заявил, что метрология и искусственный интеллект – одно и то же. Слушатели были в недоумении, но весьма вероятно, что при будущих попытках создать общую теорию концептуальных моделей в рамках измерительной науки (если они состоятся) многое придётся заимствовать из искусственного интеллекта. В частности, плодотворной представляется идея *фреймов* Марвина Минского [19], – эти структуры обладают большой степенью универсальности.

Параметризация выбранной модели объекта, как уже было сказано, в настоящее время является скорее искусством, чем наукой. Возможно ли создать её общую теорию – покажет будущее.

О состоянии учения о *шкалах измерений* тоже по существу было сказано, осталось лишь повторить основное и кратко подвести итог.

Исходная идея – соответствие между операциями и отношениями в реальном мире с одной стороны и операциями и отношениями в системе чисел с другой стороны – была высказана Гельмгольцем на материале *физических измерений* и на том же материале развита рядом других авторов.

Понятие *шкалы* было введено Стивенсом на материале *психофизики*, далее развито многими авторами в направлении строгой матема-

тизации и нашло широкое применение в практике *психологических* и *социологических* измерений.

Анализ принципов *аналого-цифрового преобразования* привёл, независимо от предшествовавших исследований, к несколько иному понятию шкалы.

Наконец, рост числа разнообразных шкал, используемых в *метрологии*, заставил некоторых метрологов обратиться к начальным понятиям теории шкал и определить их место в общей системе понятий метрологии.

Очевидно, работа по взаимной увязке традиционной метрологии и теории шкал (в её различных аспектах!) ещё далеко не закончена. Наверное, измерительной науке придётся в какой-то степени вернуться к точке зрения Гельмгольца и более подробно исследовать физическую сторону теории шкал.

Величина является одним из важнейших исходных понятий метрологии, да и всей современной науки. Измерительная наука накопила много сведений о различных измеряемых величинах, но эти сведения не систематизированы и не составляют того, что можно было бы назвать *теорией величин*. Более того, давно начались и до сих пор не утихают споры о том, что же мы называем величиной и какова её правильная дефиниция. Последний вопрос кратко рассмотрен в пособии для магистрантов [20], на страницах 385–398.

Несмотря на очевидную важность теории величин для измерительной науки, до сих пор не нашлось желающих построить такую теорию или хотя бы наметить её структуру. Опять приходится надеяться на будущее.

Представление результата измерения в значительной степени является вопросом практики; для ответственных измерений в различных областях выработаны формы протоколов. Только вопрос оценки и представления границ погрешности или неопределённости продолжает исследоваться снова и снова.

Насколько этот вопрос не прост, видно, например, по объёму посвящённой ему монографии [7]. А ведь со времени её издания многое добавилось!

Правда, исследователь, не являющийся специалистом-метрологом, может просто обратиться к стандартам, регламентирую-

щим процедуры обработки данных (а при ответственных измерениях он, наверное, *обязан* поступить именно так).

Приведём для справки названия двух документов:

ГОСТ Р 8.736–2011. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения.

Рекомендация по метрологии 50.2.038–2004. ГСИ. Измерения прямые однократные. Оценивание погрешностей и неопределённости измерений.

Интерпретация результата (или результатов) измерений мало интересует метрологов, которые считают измерение законченным, когда оценены границы его погрешности или неопределённость. Тем не менее, уже в классической метрологии было понятие *совместных измерений*, результаты которых позволяли описать некоторую *зависимость*.

Вопрос о том, какие разделы, относящиеся к интерпретации результатов, следует включить в измерительную науку, ещё требует обсуждения.

Например, *теория принятия решений*, которая используется при отнесении объекта (или его состояния) к одному из нескольких классов, по-видимому, должна рассматриваться как самостоятельная область знаний, не входящая в измерительную науку.

Наверное, к измерительной науке следует отнести все ситуации, когда экспериментатор сам формирует (априорно или апостериорно) концептуальную модель объекта. В связи с этим упомянем область знаний, которая не связана непосредственно с интерпретацией результатов измерений, но используется, когда модель объекта может быть представлена в виде *поверхности отклика в многомерном (в общем случае) пространстве факторов*.

При организации измерений в подобных случаях полезно привлечь *теорию планирования эксперимента*. Вот эту теорию, видимо, вполне можно считать частью измерительной науки. Литература по планированию эксперимента многочисленна; свой оригинальный подход здесь, как и в ряде других разделов измерительной науки, развил П.В. Новицкий.

Как видно из всего сказанного, целый ряд разделов измерительной науки нуждается в развитии. Некоторые разделы, хорошо разработанные инженерами и учёными, далёкими от метрологии (такие как репрезентационная теория), требуют адаптации к измерительной практике. Аналогичную картину мы будем наблюдать и далее, обратившись к другим сторонам измерения, рассматриваемого как система.

3. Взаимодействие с объектом при измерении

3.1. Рецепция

Термин *рецепция* отсутствует в официальной метрологической терминологии. И сколько-нибудь общая теория рецепции при макроскопических измерениях, по-видимому, не разработана (напротив, в ядерной физике вопросы рецепции подняты на философскую высоту!). Предлагается определить рецепцию как протекание некоторого *процесса, общего между объектом и воспринимающей системой*. Естественно, мы рассуждаем сейчас на уровне I по рис. 1.4.

Поскольку обобщающих работ по рецепции найти не удалось, попытаемся набросать классификацию способов рецепции, пользуясь отдельными примерами. В качестве первого классификационного признака выберем *происхождение общего процесса*.

Этот процесс может сам быть объектом. В качестве примеров назовём измерение электрического тока амперметром и измерение расхода воды механическим счётчиком

В других случаях объект является *источником* общего процесса, – примером может быть измерение температуры в промышленной печи оптическим пирометром. Почему в печи и пирометром, а не ртутным термометром у пациента? Конечно, пациент тоже является источником (процесса теплообмена), но в случае пирометра общий процесс – тепловое излучение – наблюдается более наглядно, как бы отдельно от источника и воспринимающей системы. Аналогично выполняется измерение механической деформации детали проволочным тензометром, – эта деформация через слой клея передаётся проволочной решётке, и её сопротивление изменяется.

Наконец, общий процесс может исходить от *внешнего* источника, Примеров можно найти очень много. В газоанализаторе на водород по

теплопроводности или в термоанемометре источником процесса теплообмена является нагретая металлическая нить; она же служит элементом воспринимающей системы, – изменяет сопротивление в зависимости от температуры. В ультразвуковом дефектоскопе источником общего процесса является излучатель ультразвука, обычно совмещённый с приёмником, а в ультразвуковом дальнометре излучатель и приёмник чаще бывают разделены. В качестве общего процесса могут использоваться излучения самого разного вида, от инфракрасного до рентгеновского.

Обратим внимание на примеры с проволочным тензOMETром, газоанализатором по теплопроводности и термоанемометром. Во всех этих случаях полезная информация оказывается заложенной в *параметр* (электрическое сопротивление проволоки), *не связанный с энергией*. Для получения активного сигнала необходима своего рода “вторичная рецепция” с помощью нового вспомогательного источника процесса. Можно предложить для таких операций термин *активизация информации*, поскольку она переводится из пассивной формы в активную.

Другим удобным классификационным признаком рецепции является *вид общего процесса*: механическое движение, электрический сигнал, световое или иное излучение и т. д.

Примеры приводить излишне: всё это уже встречалось выше. Однако можно заметить, что всё перечисленное относилось к *объективной рецепции*, реализуемой техническими средствами, а в некоторых, в частности, в медико-биологических экспериментах встречается и *субъективная рецепция* (когда объект, – например, светящиеся различными цветами участки препарата, – воспринимается непосредственно органами чувств исследователя).

Поскольку мы затронули медико-биологические эксперименты, уместно добавить, что по характеру объективной рецепции при работе с организмом в целом различают инвазивные и неинвазивные методы исследования.

Отдалёнными техническими аналогиями могут быть разрушающие и неразрушающие методы контроля, а также до сих пор являющиеся предметом обсуждения [21] контактные и бесконтактные методы измерения.

Характерными для химических и медико-биологических экспериментов являются способы объективной рецепции, основанные на *межмолекулярных взаимодействиях*. Например, при иммунофлюоресцентном анализе искомое вещество выявляют с помощью специфичных к нему антител; флюоресценция является средством активизации получающейся пассивной информации.

Отметим, что на межмолекулярных взаимодействиях основана работа обонятельных рецепторов человека и животных.

В последние десятилетия получили распространение миниатюрные датчики газоанализаторов, работа которых основана на *избирательной адсорбции* молекул газа на поверхности полупроводниковой плёнки (обычно при повышенной температуре). В зависимости от концентрации газа меняется сопротивление плёнки. В книге новосибирских авторов [22], на страницах 151–155 описан такой датчик на СО, содержащий плёнку двуокиси олова SnO₂ и резистивный нагреватель.

Из *метрологических аспектов* рецепции больше всего бросается в глаза воздействие воспринимающей системы на объект. Выдающийся метролог Геннадий Николаевич Солопченко, работавший на кафедре ИИТ Политехнического университета, любил говорить, что взаимодействие с объектом должно быть *деликатным*.

Воздействие на объект может быть *энергетическим* и *параметрическим*. Вольтметр, подключённый к маломощной электрической цепи, потребляет из неё энергию и показывает меньшее напряжение, чем было до его подключения, – это результат энергетического воздействия. Акселерометр, установленный на небольшой механической системе в эксперименте по определению её резонансных частот, увеличивает массу системы и тем самым снижает резонансные частоты, – это результат параметрического воздействия.

При исследованиях на человеческом организме следует учитывать воздействия *психологического происхождения*, тоже вызывающие погрешности, – например, вполне возможны изменения физиологических параметров пациента, вызванные страхом исследования.

Другой метрологической характеристикой рецепции является её *избирательность*. Процесс, общий для объекта и воспринимающей системы, может нести различную информацию; желательно, чтобы воспринимающая система реагировала только на определённые её со-

ставляющие. Это может быть не так: известно, например, что обонятельные рецепторы человека обладают невысокой избирательностью, а её улучшение достигается совместной обработкой сигналов многих рецепторных клеток в нервной системе, – своеобразной *интерпретацией* первичных данных (мы ощущаем, например, *запах розы*).

Как следует из материалов пособия [2], студенты, будучи не слишком опытными исследователями, очень часто упускают из виду требования к избирательности рецепции.

Конечно, сказанное в этом разделе не исчерпывает всех вопросов, связанных с рецепцией. Хотелось бы, чтобы в будущем кто-то взялся за построение её более полной теории.

3.2. Локализация

Результат измерения или другой познавательной процедуры всегда должен быть отнесён к определённой области в пространстве, во времени, в структуре объекта, в биологической популяции или серии технических изделий. Действия, направленные на такое отнесение, будем называть *локализацией*.

Локализация *в общем виде* никем не изучалась, хотя отдельные её проблемы, конечно, решались неоднократно.

Поскольку здесь можно только наметить контуры рассматриваемой стороны измерения, будем говорить о двух крайних случаях локализации (в любом из перечисленных множеств) – *точечной локализации*, при которой область отнесения должна быть как можно меньше, и *интегральной локализации*, при которой желательно охватить как можно более широкую область.

В метрологии термины *точечная локализация* и *интегральная локализация* до сих пор не использовались.

Реально при точечной локализации (в непрерывных множествах) область локализации имеет малые, но конечные размеры, а при интегральной локализации приходится считаться с ограниченностью области локализации. Конечные размеры области точечной локализации создают эффект сглаживающей фильтрации; ограниченность области интегральной локализации может быть причиной разброса получаемых данных.

Попробуем найти примеры локализации для каждого из перечисленных выше множеств.

Точечная локализация *в пространстве* желательна в экспериментах по снятию картины какого-либо поля, например, магнитного или температурного, или при исследовании профиля скоростей жидкости в реке или в трубопроводе. Любой используемый для этого датчик имеет конечные размеры и, следовательно, в какой-то степени усредняет информацию. В результате картина поля получается сглаженной.

Интегральная локализация в пространстве желательна, например, при оценивании шероховатости поверхности деталей в машиностроении. Для такого оценивания используются специальные приборы – профилометры, как бы ощупывающие поверхность. Поскольку трасса, проходимая щупом, всегда конечна, получаемые результаты характеризуются *статистическим разбросом*.

Из этого первого примера интегральной локализации можно сделать выводы, справедливые и для других случаев интегральной локализации.

Первый вывод, поражающий своей рискованностью, состоит в том, что *статистическая теория вообще есть теория интегральной локализации*. Действительно, статистическая теория призвана оценивать достоверность заключений о каких-либо атрибутах *генеральной совокупности* (зачастую только предполагаемой) по конечной *выборке* из неё. Для различных выборок получаются различные результаты – это и есть статистический разброс.

Второй, менее очевидный вывод связан с тем, что оцениваемый параметр (например, в профилометрии – среднеквадратическая высота неровностей относительно средней поверхности) может *изменяться* по мере перемещения в пространстве (или, в общем случае, по другому множеству локализации). В таких ситуациях неограниченное расширение области локализации оказывается нежелательным, и существует некоторый оптимальный размер этой области, при котором суммарная недостоверность, обусловленная статистическим разбросом и нестационарностью, достигнет минимума. Это требует расчёта.

Здесь уместно обратить внимание на то, что в этом издании совершенно нет расчётов (надо думать, что читатель и сам это уже заметил). Представляется, что при той ситуации, которая сложилась с лек-

ционным курсом, – весь материал должен уложиться в шесть, максимум семь лекций! – главная задача состоит в том, чтобы донести до слушателя основные идеи, относящиеся к измерительной науке, тем более что сама эта наука ещё не вполне сформирована. К тому же рассматриваемая область метрологии и физико-технических измерений весьма широка, и какие именно расчёты понадобятся в будущей деятельности исследователя – заранее сказать невозможно.

Возвращаясь к вопросам локализации, перейдём к временной области – к работе с сигналами и *сигнальными функциями* (см. выше страницу 13). Здесь, как и в пространстве, *строго точечная локализация* невозможна. Работа всякого измерительного устройства, например, аналого-цифрового преобразователя, характеризуется некоторой областью временной неопределённости. Её раньше называли *апертурным временем*; сейчас в отечественной метрологии принят термин *погрешность датирования*, она тоже, как и апертурное время, отсчитывается по оси времени.

В технике аналого-цифрового преобразования для уменьшения этой погрешности используют специальные средства – устройства выборки/хранения; но до конца она, конечно, не устраняется. Вместе с тем, получили распространение аналого-цифровые преобразователи, *усредняющие* преобразуемое напряжение за определённый интервал времени. Их появление было встречено в штыки специалистами по технике управления, но впоследствии их фильтрующие свойства оказались во многих случаях полезными для борьбы с помехами.

Интегральная локализация во времени используется, например, при нахождении действующего (среднеквадратического) или средневыпрямленного значения *переменного напряжения*. Статистического разброса можно избежать, усредняя результаты за один или несколько периодов сигнала, или за время, многократно превышающее период. Если же исследуются характеристики *случайного процесса*, то возникают те же проблемы, которые выше были обнаружены в пространственной области: слишком малый интервал усреднения оценок приводит к неприемлемому статистическому разбросу, слишком большой – чреват опасностью столкнуться с нестационарностью. Этим вопросам посвящено большое число литературных источников.

Перейдём далее к *локализации в структуре объекта*. Если этим объектом является техническое устройство, то говорить о точечной локализации, по-видимому, не приходится: структурная локализация нужна для диагностики, а диагностика выполняется с точностью до узла или детали. Интегральная локализация, при которой некоторое заключение (типа “прошёл испытание”) делается об устройстве в целом, тоже не требует особого рассмотрения.

Иначе обстоит дело, когда объектом является организм человека или животного. При проведении некоторых операций бывает необходимо точно позиционировать тот или иной инструмент именно по отношению к структуре органа. Очень высокие требования к локализации предъявляются при исследованиях с помощью микроэлектродов.

Особой областью в отношении локализации является томография (автор настоящего издания не готов обсуждать это подробнее). Наконец, трудной задачей является локализация источника некоторого процесса внутри организма по измерениям в разных точках поверхности кожи, – подобного рода проблемы возникают в кардиологии и энцефалографии (а также, между прочим, в геофизике при поиске полезных ископаемых).

Объектом, в структуре которого требуется выполнить локализацию, может быть также некоторый *процесс*. В этом случае структура объекта состоит из событий (если они различимы) или, в общем случае, из состояний. Например, выше (на странице 14) упоминалось о том, что сердечный ритм характеризуют последовательностью *RR*-интервалов. Но для этого нужно предварительно локализовать каждый *R*-зубец кардиограммы.

Приведём ещё характерный технический пример локализации в структуре процесса. Для уравнивания (“балансировки”) роторов вращающихся машин измеряют вибрацию, вызванную небалансом. Последний описывается моделью в виде некоторой избыточной массы, расположенной в исходно неизвестной точке на окружности ротора.

Ясно, что уравнивающий груз нужно поместить на роторе в противоположную точку, которую и требуется найти.

Опуская подробности, отметим только то, что в ходе балансировки приходится сопоставлять точки сигнальной функции, описывающей вибрацию, с соответствующими угловыми положениями ротора, т. е.

выполнять локализацию *на множестве этих угловых положений* (для чего требуется датчик угла, иногда называемый “датчиком фазы”).

Необходимость локализации на множестве угловых положений ротора возникает и при решении некоторых других задач исследования вращающихся машин.

Профессор Политехнического университета, специалист по центробежным компрессорам Рудольф Александрович Измайлов называл это работой в “физическом времени”, т. е. в условном времени, течение которого определяется скоростью вращения ротора.

Важным классом процессов являются процессы *анализа*, где локализация выполняется *в пространстве параметров*. При спектральном анализе сигналов важна локализация по частоте, при хроматографическом анализе – по молекулярной массе, и т. д. При таком подходе получается, что неопределённость результата измерения характеризует именно его локализацию на шкале измеряемой величины.

Теперь мы дошли до последних из перечисленных (в начале этого раздела) множеств, в которых может выполняться локализация, – биологической популяции или серии технических изделий. Поскольку эти множества дискретны, говорить о точечной локализации не имеет смысла. Интегральная локализация заключается в выработке некоторого суждения о популяции или серии изделий в целом, которая обычно выполняется по выборке ограниченного объёма. Здесь работают хорошо известные статистические методы.

Вопросы выделения в популяции каких-либо характерных групп индивидуумов (например, по признакам возраста, пола, профессии, имущественного положения и т. п.), поиска возможных кластеров без предварительной формулировки определяющего признака, а также выявления возможных нестационарностей при выпуске серии изделий, мы только упомянем, а обсуждать не будем.

В качестве итога отметим: локализация выглядит как ещё один раздел измерительной науки, для которого хотелось бы иметь общую теорию.

3.3. Стимуляция объекта

Будем называть *стимулом* любое воздействие на объект, необходимое для получения информации о его параметрах. Например, измерение электрического сопротивления какого-либо объекта невозможно без пропускания тока через него; измерение предела прочности материала невозможно без приложения к образцу, изготовленному из него, деформирующего усилия; измерение порога слышимости в аудиометрии невозможно без подачи в исследуемое ухо звукового сигнала.

В метрологии говорят об *активных* и *пассивных* величинах: “активная величина” – сила тока, напряжение, механическая сила или давление, температура и т. д. – связана с энергией и не требует стимуляции объекта при измерении; “пассивная величина” (примеры соответствующих параметров были приведены в предыдущем абзаце) не связана с энергией и требует обязательной стимуляции.

Такая терминология некорректна: любые величины только *характеризуют* соответствующие объекты и не могут ни активно действовать, ни пассивно подвергаться действиям. На это обращал внимание К.К. Гомоюнов [10]. Можно допустить использование некорректной терминологии, но только при условии, что должны быть сделаны необходимые оговорки.

Некоторые проблемы, с которыми приходится сталкиваться при организации стимуляции объектов, обсудим на материале приведённых выше примеров.

Начнём с измерения активного электрического сопротивления (термин *активное сопротивление* в данном случае означает отсутствие в объекте ёмкостных или индуктивных накопителей энергии, или игнорирование таких накопителей при измерении).

Электрический процесс в резисторе характеризуется током и напряжением. При измерении малых сопротивлений удобно задавать силу тока, а напряжение измерять; при измерении больших сопротивлений – наоборот (для простоты рассуждений не будем рассматривать мостовые методы измерения, а далее будем считать, что задаётся сила тока).

Самым первым вопросом общего характера является выбор *интенсивности стимула*. Этот выбор особенно важен в медицинских исследованиях, где, например, слишком интенсивное излучение может

повредить здоровью пациента. Но и в технике выбор интенсивности стимула нужно хорошо обосновывать.

Если при измерении сопротивления силу постоянного тока выбрать слишком малой, получившееся малое напряжение “утонет” в шумах и помехах; слишком большая сила тока приведёт к нагреву резистора или даже его повреждению. Это противоречие в какой-то степени разрешается, если стимул подавать в виде коротких импульсов, за время действия которых резистор не успеет нагреться.

При измерении малых сопротивлений заметную погрешность могут вносить термоэлектродвижущие силы, возникающие в цепи. Для борьбы с этой погрешностью выбирают стимул в виде последовательности разнополярных импульсов. Полезный сигнал получается тоже разнополярным, и постоянная термоэдс не меняет его размаха.

Особым случаем является измерение сопротивления электролитов. Для устранения влияния поляризации производят измерения на переменном токе.

Обсуждавшийся сейчас выбор *формы* стимула, как и выбор его *интенсивности*, является вопросом, общим для большинства ситуаций стимуляции. Третий из таких общих вопросов связан с необходимостью снижения *влияния параметров стимула* на результат измерения

Если измерять сопротивление, задавая силу тока и измеряя получающееся напряжение, то возможная относительная *нестабильность силы тока* приводит к такой же по размеру относительной погрешности окончательного результата.

Нестабильность стимула не сказывается на результате при измерениях с помощью *равновесных мостов*, но сейчас распространён более простой метод её исключения. Последовательно с резистором R_x , который является объектом измерения, включают резистор известного сопротивления R_0 и измеряют отношение двух получающихся напряжений U_{R_x}/U_{R_0} . При условии, что потребление тока измерительным устройством пренебрежимо мало, получается $U_{R_x}/U_{R_0} = R_x/R_0$, независимо от общей для них силы тока.

Распространённость этого метода связана с тем, что многие аналого-цифровые преобразователи позволяют непосредственно измерять отношение двух напряжений. В подобных случаях говорят о *логометрическом режиме* измерения (ratiometric mode).

Два других примера стимуляции, приведённые в начале этого раздела, – измерение предела прочности и определение порога слышимости – отличаются от только что рассмотренного первого примера тем, что в них интенсивность стимула должна обязательно изменяться.

При измерении предела прочности деформирующее усилие может только постепенно возрастать с такой скоростью, чтобы испытуемый образец успевал на него реагировать (ещё Ломоносову было известно, что при достижении предела прочности образец разрушается не мгновенно).

При определении порога слышимости допускается как увеличение интенсивности стимула (если порог ещё не достигнут), так и уменьшение этой интенсивности после перехода через порог. Поэтому возможны различные алгоритмы эксперимента, обеспечивающие уменьшение его длительности. Однако нужно учитывать, что в любой сенсорной системе интенсивность предыдущего стимула может влиять на восприятие последующего стимула.

Областью метрологии и измерительной науки, где стимуляция играет особо важную роль, является определение *динамических характеристик* технических или биологических объектов. О динамических измерениях вообще можно узнать из работ ленинградского метролога Валерия Анатольевича Грановского; динамическим измерениям посвящена глава 7 пособия [1].

В теории управления отдельные элементы или устройства, рассматриваемые с точки зрения их динамических характеристик, называются *динамическими звеньями* (этот термин мы уже использовали на странице 37).

Существуют различные классы динамических звеньев; здесь для простоты ограничимся рассмотрением класса линейных (т. е. описываемых линейными уравнениями) инерционных звеньев с постоянными параметрами. Полными динамическими характеристиками таких звеньев являются:

- дифференциальное уравнение,
- передаточная функция, записываемая на языке теории управления,
- комплексная частотная характеристика, записываемая на языке теории переменных токов,

- совокупность амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик,
- переходная характеристика (отклик звена на стимул ступенчатой формы и единичной амплитуды),
- импульсная характеристика или весовая функция (отклик звена на стимул в виде δ -функции – идеализированного бесконечно короткого импульса единичной площади).

Непосредственному экспериментальному определению поддаются последние три из перечисленных характеристик.

Для определения амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик используется стимул, описываемый гармонической сигнальной функцией. Частоту гармонического стимула изменяют с определённым шагом в необходимом диапазоне, и для каждой установленной частоты находят отношение амплитуды отклика звена к амплитуде стимула и фазовый сдвиг отклика по отношению к стимулу. Такой эксперимент может потребовать значительного времени.

При исследовании маломощных электрических звеньев, например, электронных усилителей, используются серийно выпускаемые генераторы, вольтметры и фазометры; существуют также анализаторы частотных характеристик, оформленные в виде единых конструкций. Исследование неэлектрических звеньев может потребовать разработки специальных стендов.

Переходную или импульсную характеристику можно определить путём однократной подачи соответствующего ступенчатого или импульсного стимула. Для этого тоже требуется специальная аппаратура; например, для формирования ступенчато изменяющегося давления используется эффект *ударной волны*, а соответствующая установка называется *ударной трубой*.

Конечно, ни идеальную ступеньку с бесконечно коротким фронтом, ни тем более δ -импульс нельзя реализовать точно. На практике приходится довольствоваться некоторыми приближениями к ним, по возможности оценивая связанную с этим погрешность.

В некоторых случаях для нахождения импульсной характеристики динамического звена целесообразно использовать стимул в виде *белого шума* (случайного сигнала с равномерной спектральной плотностью, опять-таки реализуемого с некоторым приближением). Считает-

ся, что использование случайного стимула наиболее близко подходит к реальному режиму функционирования динамического звена.

Идеальный белый шум можно наглядно представить себе как последовательность бесконечного числа бесконечно коротких импульсов случайной амплитуды и случайной полярности. При воздействии на объект каждый импульс вызывает соответствующий бесконечно малый отклик, имеющий форму искомой импульсной характеристики.

Накладываясь друг на друга, эти отклики образуют выходной сигнал звена, имеющий вид случайного процесса. Для извлечения необходимой информации находят *взаимную корреляционную функцию* стимула и отклика – их усреднённое (по времени) произведение, вычисляемое для различных значений взаимного сдвига во времени. Эта взаимная корреляционная функция воспроизводит форму импульсной характеристики звена.

3.4. Создание условий для объекта

Ещё одним вопросом, относящимся к взаимодействию с объектом, является создание условий для его существования и функционирования (в пособии [2] использован не общепринятый и не слишком удачный термин *кондиционирование объекта*).

В классической метрологии говорят об *условиях измерений*, но относят их не к объекту, а к средствам измерений. Например, в рекомендациях [3] имеется термин *нормальные условия (измерений)* с таким определением:

“Условия измерений, предписанные для оценивания характеристик средства измерений или измерительной системы или для сравнения результатов измерений”.

Далее следует пояснение:

“Нормальные условия измерений характеризуются *нормальной областью значений влияющих величин*”.

Для метролога важно, чтобы *средства измерений* сохраняли нормированные для них характеристики; для исследователя не менее важно, чтобы *объект* существовал и мог действовать в предписанных для него условиях.

В различных экспериментах встречаются два противоположных подхода к созданию условий для объекта. В одних случаях требуется, чтобы объект находился в нормальных для себя условиях; в других случаях намеренно создаются намного более жёсткие условия.

Рассмотрим сначала первый подход на биологических и технических примерах, поскольку общей теории здесь тоже нет, – да и нужна ли она?

Хорошим биологическим примером создания нормальных условий могут быть методики культивирования клеточных культур, отработанные в цитологии. Для этих объектов обеспечиваются оптимальные температура и химический состав среды, что позволяет им долгое время существовать вне организма.

В технике трудно решаемой проблемой создания нормальных условий зачастую оказывается отвод энергии от объекта, который должен не только существовать, но и функционировать с полной отдачей.

Если, например, испытывается электродвигатель небольшой мощности, то для создания нормальной нагрузки на него вполне может использоваться несложный тормоз, и отвод тепла, выделяющегося в тормозе, не вызывает трудностей. А если испытывается турбогенератор мощностью 200 мегаватт или ещё большей? Пусть даже он работает не с полной нагрузкой, энергии такого порядка уже нельзя позволять рассеиваться бесполезно, да и некуда её рассеять. Её возвращают в двигатель, который вращает испытываемый генератор.

Интересно, что с подобной проблемой столкнулся в 80-х годах XIX века русский инженер Александр Парфеньевич Бородин, когда создавал в Киевских мастерских лабораторию для испытания паровозов, – возможно, первую в мире. Паровоз при испытаниях был неподвижен, и установлен так, что его колёса не взаимодействовали с рельсами. Как же можно было создать для него необходимую нагрузку? Бородин нашёл выход: через ременную передачу вращающееся колесо паровоза приводило в действие станки мастерской!

Дадим теперь примеры второго подхода. Создание жёстких, даже неприемлемых условий для живых организмов практикуется, например, в токсикологии, где концентрацию вредных веществ в среде обитания подопытных животных варьируют так, чтобы найти точку пятидесятипроцентной смертности. В достаточно жёсткие (но, конечно,

совместимые с жизнью) условия ставят людей при их подготовке к выполнению ответственных работ.

В технике заведомо жёсткие условия используются при испытаниях различных изделий, особенно при так называемых *ускоренных испытаниях*. В этой области, конечно, развиты теоретические соображения, к которым и следует обращаться при организации подобного эксперимента.

4. Движение информации при измерении

4.1. Два потока информации при измерении

О двух потоках информации при измерении было сказано выше на странице 10 так коротко, что читатель мог просто не обратить внимания на эту мысль. Поэтому повторим исходный пункт этого короткого рассуждения, а именно цитату, выражающую взгляд на измерение Петра Васильевича Новицкого в ранний период его деятельности:

“...Любое измерительное устройство представляет собой канал приёма и преобразования информации о размере измеряемой величины...”.

Термин *размер величины* мало используется за пределами метрологического сообщества, и его смысл следует обсудить. В давно отмечённом стандарте ГОСТ 16263–70 *размер физической величины* определялся так:

«Количественное содержание в данном объекте свойства, соответствующего понятию “физическая величина”»

В рекомендациях [3] слово *физическая* по каким-то причинам опущено, и определение *размера величины* дано в таком виде:

“Количественная определенность величины, присущая конкретному материальному объекту или явлению”.

В обоих определениях имеется в виду, что некоторая реализация величины может быть *по размеру* больше или меньше ещё до того, как мы её измерили и получили её *значение*, – т. е., при работе в пропорциональной или абсолютной шкале именованное отношение (*ratio*) её размера к размеру единицы величины.

Структура “канала приёма и преобразования информации о размере измеряемой величины” просматривается на правой, восходящей ветви нашего рисунка 1.4 в виде блоков на уровнях I – IV. На следующий уровень V передаются уже отсчёты, т. е. *значения* измеряемой величины.

Но если в канале передаётся информация о *размере* величины (а это именно так, потому что на ранних этапах измерение ещё не закончено), то откуда берётся её *значение*? Очевидно, каналу должна быть передана информация о *размере единицы величины*, или, если выразиться более правильно и более обобщённо, о необходимом *участке шкалы величины*. На рис. 1.4 это почти не отражено, упомянуты только “реперы шкал”.

Отметим своеобразную *пограничность* (см. выше страницу 17), или, если угодно, *двойственность* сочетания слов *размер единицы величины*. Действительно, *размер* относится к “миру вещей”, а *единица* ведь является числом и, значит, относится к “миру идей”.

Итак, информация при подготовке и выполнении измерения движется двумя потоками. Один поток, характеризующийся *двойственностью* (передаются и размеры, и соответствующие числа), направляется от эталонов в разные (в общем случае) места измерительного канала. Обычно эта передача заканчивается задолго до начала выполнения измерения. Второй поток направляется от объекта потребителю информации, и он, как правило, приобретает двойственность не сразу.

Реализация первого потока – задача метрологов; экспериментатор должен только своевременно к ним обратиться. Разработана большая совокупность *поверочных схем* для различных измеряемых величин. Далее на этих вопросах мы не будем останавливаться, приведём лишь определение *поверочной схемы* по рекомендациям [3]:

“Иерархическая структура, устанавливающая соподчинение эталонов, участвующих в передаче единицы или шкалы измерений от исходного эталона средствам измерений (с указанием методов и погрешностей при передаче), утверждаемая в установленном порядке в виде нормативного документа”.

Приборостроителей и экспериментаторов (а П.В. Новицкий выражал интересы и тех, и других) больше интересует организация второ-

го потока информации. Этим вторым потоком мы и будем заниматься далее в этой главе. Однако сначала сделаем одно замечание о первом потоке: он передаёт информацию не только *в пространстве* (от эталонов рабочим средствам измерений), но и *во времени*!

Задача передать информацию во времени возлагается уже не на метрологов, а на приборостроителей: изготовленные ими средства измерений должны *хранить* нужный участок шкалы от момента его передачи от эталона (в соответствии с поверочной схемой) до любого из моментов использования в эксперименте. Допускаемая длительность хранения задаётся как *межповерочный интервал*. После его истечения средство измерений не должно использоваться в ответственных экспериментах.

Способность средства измерений хранить переданную ему информацию – *метрологическая надёжность* – является его важнейшим свойством. Серьёзные исследования в этой области выполнил Анатолий Эммануилович Фридман. Богатый и оригинальный материал содержится в монографии [23].

4.2. Измерительный канал

Тот “канал приёма и преобразования информации”, о котором писал П.В. Новицкий, для краткости обычно называют *измерительным каналом*. Этот термин широко употребляется. Однако в официальном документе [3] он как самостоятельно определяемый термин отсутствует и встречается только в примечании: измерительная система “может содержать сотни измерительных каналов”. Вместо этого в [3] имеется термин *измерительная цепь*:

“Последовательность элементов средства измерений, которая образует единый путь сигнала от чувствительного элемента к выходному элементу, формирующему показание”.

В качестве примера дана “Электроакустическая измерительная цепь, содержащая микрофон, аттенюатор, фильтр, усилитель и вольтметр”. Но это в точности то, что на практике называют измерительным каналом!

Термин *измерительная цепь* с определением по [3] представляется неудачным потому, что в ряде классических работ по электроизме-

рительной технике под измерительной цепью понималось совсем другое, – считалось, что стрелочный прибор содержит *измерительную цепь* и *измерительный механизм*.

В учебном пособии [24] *измерительной цепью* названа электрическая цепь, в которую включается датчик, а отнюдь не весь измерительный канал, как в [3]. Поэтому советуем читателю в данной ситуации игнорировать [3] и, как поступают все специалисты, свободно пользоваться термином *измерительный канал*.

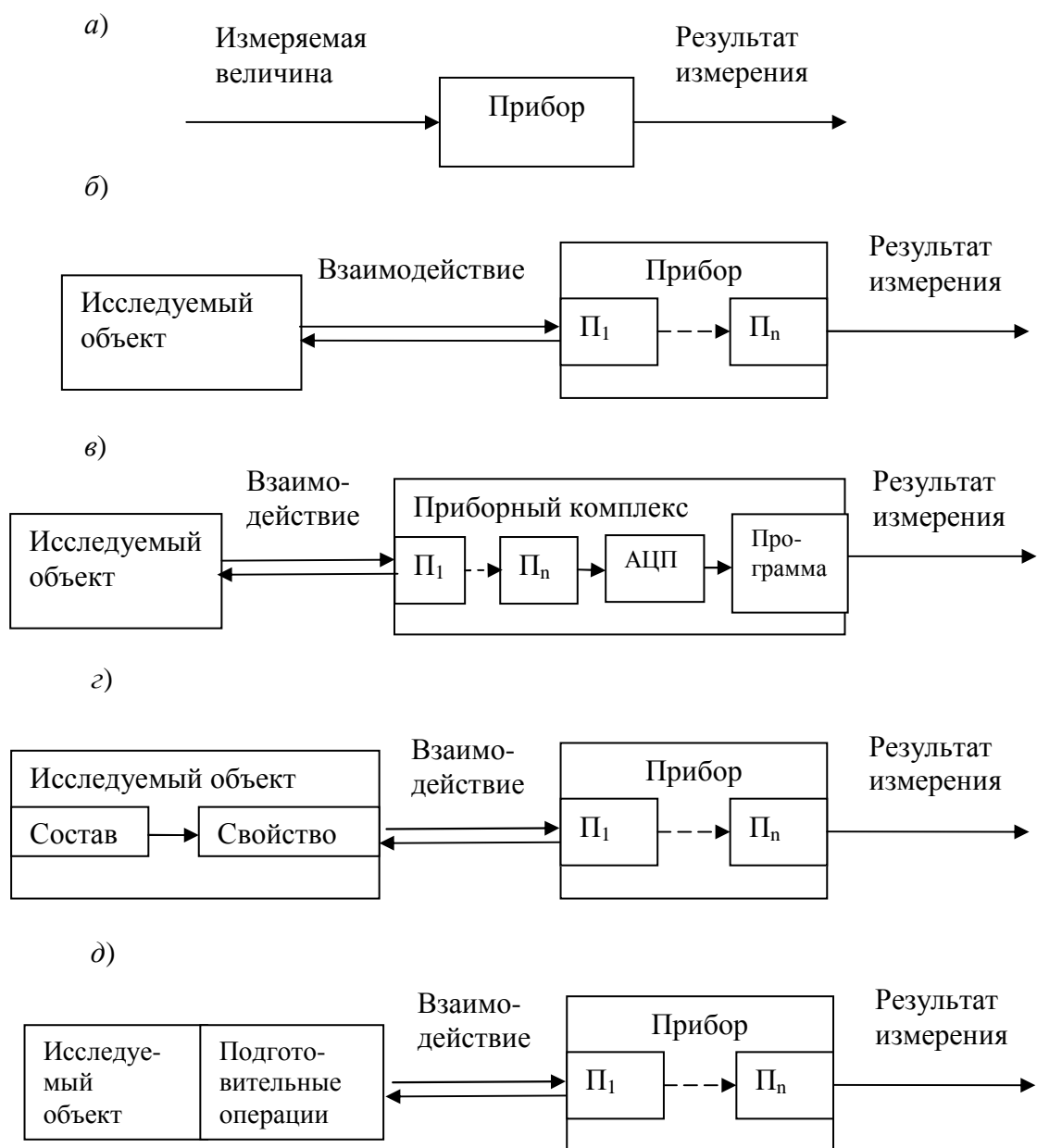


Рис. 4.1

Вместе с тем, нельзя не заметить, что использование термина *измерительный канал* связано с некоторыми неоднозначностями.

Для обсуждения этого вопроса воспользуемся историческим подходом. Попробуем очень кратко очертить процесс формирования понятия *измерительного канала* с помощью рисунка 4.1, заимствованного с небольшими изменениями из пособия [2].

Рис. 4.1, *а* иллюстрирует то представление об измерении, которое было распространено в первой половине XX века. Внимание к объекту, как правило, не привлекалось: считалось, что измеряется заданная *физическая величина*, и измеряется она с помощью *измерительного прибора*. Понятие измерительного канала было излишним.

В конце 1940-х годов развитие двух передовых тогда областей измерительной техники – телеизмерений (измерений на расстоянии) и электрических измерений неэлектрических величин – вызвало к жизни понятие *измерительного преобразователя*, первоначально имевшее смысл *структурного элемента* измерительного устройства.

Измерительным преобразователям (в этом смысле термина) посвящено, в частности, учебное пособие Елены Серафимовны Левшиной и Петра Васильевича Новицкого [24].

На рис. 4.1, *б* измерительные преобразователи $P_1 \dots P_n$ показаны находящимися внутри прибора. Однако некоторые из них стали выделяться в отдельные конструктивно обособленные блоки. Прежде всего это произошло с *датчиком*, который, естественно, устанавливался на самом объекте, а отнюдь не в корпусе прибора. Потом появились в виде самостоятельных блоков *нормирующие преобразователи*, и т. д.

В результате термин *измерительный преобразователь* стал использоваться в новом смысле, как конструктивно обособленный и аттестованный измерительный блок, который мог содержать несколько измерительных преобразователей в прежнем, структурном смысле термина. К сожалению, не получил распространения удобный термин *преобразовательный элемент*, предложенный в ГОСТ 16263–70 для передачи первоначального, структурного значения.

Двусмысленность термина *измерительный преобразователь* сохранилась до сих пор и даже оказалась официально закреплённой в рекомендациях [3].

На том же рис. 4.1, б (и на последующих структурах) отмечено *взаимодействие* между объектом и измерительным устройством, которое тоже стало привлекать внимание.

Далее структура рисунка 4.1, б стала расширяться как вправо, в сторону результата, так и влево, в сторону объекта. Этому посвящены рисунки 4.1, в, г, д, причём читатель должен понимать, что происходило и расширение *в обе стороны*, которое для экономии места не показано на рис. 4.1, – оно понадобится нам ниже (см. рис. 4.6).

Рисунок 4.1, в иллюстрирует сразу две последовательно проявившиеся тенденции развития измерительной аппаратуры: во-первых, переход от аналогового представления информации на выходе измерительного устройства к цифровому представлению и, во-вторых, появление программных средств обработки измерительной информации.

На этой стадии уже стало возможно говорить об *измерительном канале*, тем более что аналого-цифровые преобразователи (АЦП) и вычислительные устройства первоначально были очень дорогими, и их было разумно использовать для обслуживания, с помощью коммутаторов (впоследствии переименованных в *мультиплексоры*), нескольких каналов поочередно.

Расширение структуры рисунка 4.1, б в сторону объекта было связано главным образом с измерительными задачами, возникавшими в химии и биологии.

Если, скажем, традиционный лабораторный химический анализ основывался, как правило, на определённых реакциях, то для технических применений стали создаваться анализаторы, использующие зависимости вида *состав→свойство* (рис. 4.1, г).

Например, выше, на страницах 43–44, упоминался газоанализатор, использующий уникальное свойство водорода – высокую теплопроводность. Может возникнуть вопрос: рассматривать ли преобразование *состав→свойство* как равноправное с другими измерительными преобразованиями, включать ли его в измерительный канал? Ведь вряд ли можно говорить о нормировании метрологических характеристик этого преобразования?

Более серьёзные основания для расширенной трактовки понятия измерительного канала возникают при учёте операций *пробоотбора* и *пробоподготовки*, характерных для аналитической техники (рис. 4.1, д).

При биологических исследованиях пробоподготовка может быть более сложной, чем последующие, собственно аналитические операции. Что ещё важнее, она может сильно влиять на достоверность окончательных результатов.

Между прочим, в последнем случае неясно, что считать рецепцией: пробоотбор или взаимодействие технического средства с подготовленной пробой? Возможно, рецепция здесь происходит дважды.

Очевидно, понятие измерительного канала требует уточнения на материале современной практики, а не на упрощённых примерах типа “электроакустической измерительной цепи”.

Так или иначе, можно в обобщённом виде перечислить *функции* измерительного канала. По П.В. Новицкому, это *приём* (в нашей терминологии – рецепция) и *преобразование информации*. Наверное, есть смысл добавить к этому собственно *передачу информации*, а также *сравнение*.

Рецепция была кратко описана выше, в разделе 3.1; сравнению будет посвящена отдельная глава 5. Что же касается передачи и преобразования информации, то эти вопросы рассмотрим в следующих разделах. Кроме того, обсудим важнейший вопрос, относящийся к движению информации – *селекцию*, очистку информации от нежелательных составляющих.

4.3. Передача информации при измерении

В настоящем издании передачу информации предлагается трактовать более узко, чем в пособии [2], где в понятие передачи было включено преобразование. Здесь же мы рассмотрим только передачу в чистом виде, не сопровождающуюся изменением вида носителя информации или содержания информации. Тем не менее, позволим себе воспользоваться несколько изменённым текстом главы 3 пособия [2] и соответствующим рисунком (рис. 4.2 на следующей странице), не оформляя этих заимствований в виде цитат.

Передачу информации в измерительной технике обычно связывают с понятием *сигнала* и со структурным представлением средств измерений. Действительно, многие операции передачи выполняются на сигнальном уровне (по рис. 1.4).

Но, например, физиология учит, что информация может передаваться не только сигнальным *процессом*, как в аксонах нервных клеток, но и сигнальным *веществом*, – например, медиатором в синапсах. Вся пробоподготовка в химии и биологии представляет собой передачу информации веществом.

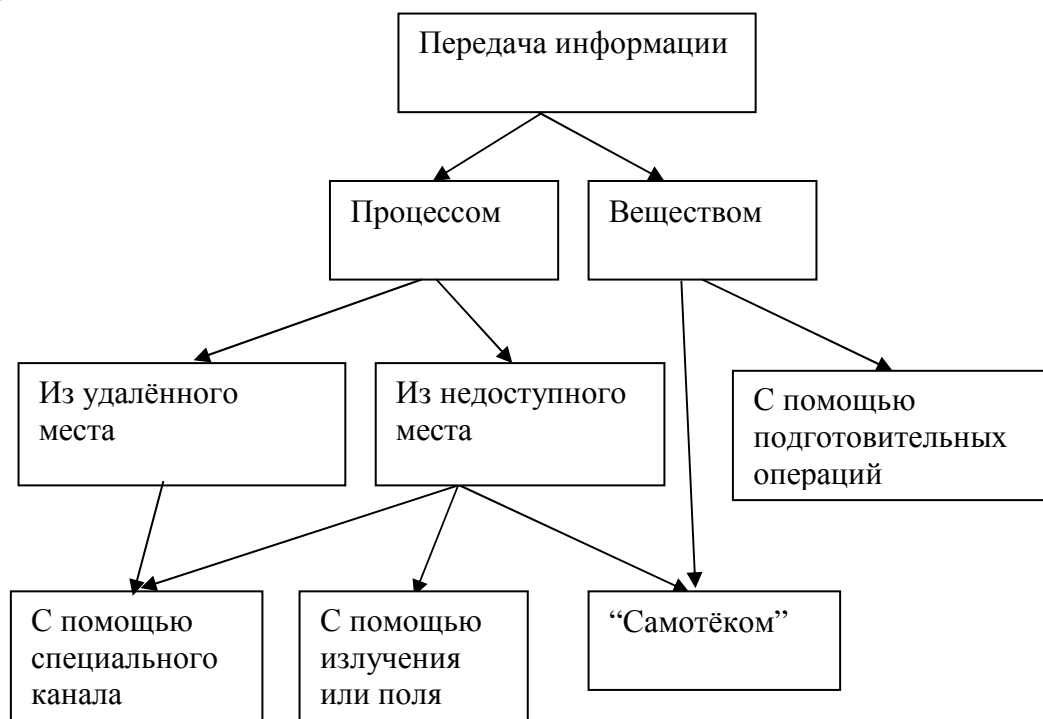


Рис. 4.2

Функция передачи информации наиболее заметна в тех случаях, когда нужно передавать измерительную информацию либо *на значительное расстояние*, либо *из недоступного места*.

В первом случае говорят о *телеизмерении* или *телеметрии*. У всех на слуху космическая телеметрия; с помощью телеметрии получают информацию от метеорологических зондов. Существует спортивная телеметрия (передача информации с действующего спортсмена). На принципах телеметрии основана так называемая телемедицина.

Для второго случая единого термина нет, некоторые технические задачи решаются методами *интроскопии*. По своему смыслу термин хорош, но его реальное применение ограничено.

В медицине специальные каналы передачи информации изнутри организма реализуются с помощью “радиопиллюль” и зондов с оптической передачей информации.

Передача информации из недоступного места может происходить и без организации специального канала – с помощью стимула в виде проникающего излучения или поля той или иной природы. Примерами могут служить рентгеновские и ультразвуковые исследования, магнитно-резонансная или иная томография и т. п.

Наконец, информация из недоступного места может передаваться “самотёком” – либо сигналом, который создаётся самим объектом, как это происходит при кардиографии, энцефалографии, миографии и т. п., либо веществом, которое производит сам объект, как при анализе различных выделений.

Метрологическая сторона функции передачи информации в любом из её вариантов очевидна: при передаче информация всегда в той или иной степени искажается. Например, если информативным параметром электрического сигнала является напряжение, то при передаче этого сигнала по проводу напряжение уменьшается из-за падения на проводе. При информативном параметре в виде силы тока влияют (обычно меньше) утечки.

Подобного рода искажения можно было бы корректировать, если бы их размеры были известны, но обычно такой информации нет. Но возникают и искажения другого рода, информацию о которых *можно получить*, – это своего рода расплывание сигнала при его передаче (а также и при преобразовании), обусловленное свойствами канала.

Впервые задачу коррекции таких искажений поставил в 1871 г. Джон Уильям Стретт, лорд Рэлей, применительно к спектральному анализу. Он назвал её задачей *редукции к идеальному прибору*. В настоящее время имеется большое число публикаций, посвящённых задачам такого типа (их называют обратными задачами). Геннадий Николаевич Солопченко, активно занимавшийся обратной фильтрацией, даже считал эти задачи *характеризационными* для теории измерений.

Не только сам сигнал искажается при передаче; к нему ещё добавляются помехи. Сейчас в технических системах предпочитают возможно раньше переходить к цифровому сигналу, при котором возможны сбои, но отсутствует постепенное накопление погрешностей.

При передаче информации веществом последнее может теряться, вступать в нежелательные реакции или просто загрязняться, что также приводит к искажению информации.

4.4. Преобразование информации при измерении

Преобразование информации в измерительном канале может использоваться для решения различных задач.

В одних случаях оказывается необходимым изменить физическую природу носителя информации, чтобы облегчить (или вообще сделать возможными) *передачу* сигнала и необходимое при измерении *сравнение*. Это обычно называют *преобразованием рода величины*.

В других случаях носитель информации не меняется, но меняется информативный параметр (как, например, при модуляции, когда представление информации мгновенными размерами изменяющегося напряжения заменяется представлением её изменяющейся амплитудой или частотой переменного напряжения).

В третьих случаях не меняется ни носитель, ни информативный параметр, но меняется содержание информации. Например, датчик формирует выходное напряжение, пропорциональное мгновенному виброускорению, а в измерительном канале сначала получается напряжение, пропорциональное мгновенной виброскорости, а затем напряжение, соответствующее *среднеквадратической* виброскорости, поскольку именно этот параметр сейчас принято нормировать.

Наконец, возможно просто усиление или ослабление сигнала без изменения других его характеристик.

Наиболее специфично для измерений изменение природы носителя информации, которое мы поставили на первое место в перечне. Три другие задачи (решаемые преимущественно средствами электроники) свойственны не только измерительной технике, но также технике связи и другим смежным областям информационной техники.

Измерения отличаются от этих областей в основном метрологическими требованиями к точности и стабильности соответствующих устройств. Тем не менее, можно говорить о специфичности *измерительной электроники* [25]. Эта своеобразная область продолжает развиваться и, очевидно, требует дальнейших исследований.

Внимательный читатель может заметить, что в приведённом выше перечне не был упомянут очень важный класс *преобразований формы представления информации* – аналого-цифровое и цифроаналоговое преобразования. Они, конечно, тоже используются не только для изме-

рений, но также для связи, управления, звукозаписи и звуковоспроизведения, и т. д. Но именно в измерительной технике они играют настолько особую роль, что ставить их в один ряд с другими видами преобразований было бы неправильно.

Дело в том, что любой преобразователь рода величины, информативного параметра сигнала или содержания информации всегда является только одним из элементов или узлов измерительного канала и не выполняет законченного измерения. Но метрологически аттестованный АЦП *сам по себе выполняет измерение*, формируя в знаковом виде результат, нуждающийся только в интерпретации. В любом АЦП происходит сравнение, являющееся одной из существенных сторон измерения. Что касается цифроаналогового преобразования, то оно может пониматься как формирование шкалы величины, что также существенно с позиций измерительной науки.

Исходя из сказанного, мы далее в этом разделе коротко рассмотрим преобразование рода величины, а аналого-цифровое преобразование отнесём к следующей главе, посвящённой сравнению.

Наиболее простой случай преобразования имеет место при ситуации, когда некоторый объект характеризуется двумя разными величинами, и, задав одну из них, можно получить другую в качестве выходной величины. Процесс в резисторе характеризуется силой тока и напряжением; задав ток, получаем пропорциональное ему напряжение, и наоборот. Отклонение рычага характеризуется углом поворота и перемещением его конца; задав это перемещение, получаем угол, и наоборот. Такое преобразование можно назвать *переименованием величины* (конечно, этот термин не общепринят).

Действие делителя напряжения на двух резисторах можно понимать как два последовательных переименования.

Но далеко не всегда дело обстоит так просто. Работа большинства преобразователей рода величины основывается на тех или иных *физических эффектах*. Этих эффектов очень много; существует даже несколько каталогов эффектов, которые предназначались их составителями для помощи проектировщикам измерительных каналов (принесли ли эти каталоги пользу – трудно сказать).

Физические эффекты и основанные на них преобразователи делятся на *обратимые* и *необратимые*.

Здесь уместно напомнить, что сам термин *преобразователь* применительно к информационной технике, по-видимому, был впервые использован замечательным советским учёным, Александром Александровичем Харкевичем в его книге 1948 года, так и озаглавленной: *Теория преобразователей*.

Исходную точку зрения на преобразователи Александр Александрович выразил следующими словами:

“Можно без преувеличения сказать, что преобразование энергии является основой техники. Но речь идёт при этом не только об энергетике... Преобразование энергии лежит в основе действия разнообразнейших приборов, применяемых в таких областях, как электрометрия, автоматика и телемеханика, электросвязь, электроакустика, виброметрия и многие другие отрасли современной техники”.

Преобразование энергии из механической её формы в электрическую и обратно выполняется преобразователями, относящимися к классу *обратимых*. Только к ним и относилась теория А.А. Харкевича, ориентированная на *электроакустику*.

Применительно к *измерениям* теорию обратимых преобразователей изложил ленинградский политехник Лев Александрович Островский в первой в стране книге по общей теории электроизмерительных устройств [26].

Классическим примером обратимого преобразователя является устройство, содержащее катушку, которая находится в кольцевом зазоре постоянного магнита и может перемещаться вдоль своей оси, совершая возвратно-поступательные движения. При движении катушки со скоростью v в магнитном поле с индукцией B в ней возникает электродвижущая сила $e = Blv$, где l – длина провода катушки. Наоборот, при пропускании тока i катушка развивает силу $F = Bli$, которая может быть использована тем или иным способом. В каждый момент времени $ei = Fv$, т. е. мгновенная электрическая мощность равна механической мощности.

По такой схеме выполнялись распространённые в прошлом индукционные датчики виброметров (отсюда *виброметрия* в тексте А.А. Харкевича), отображавшие механическое колебательное движение электрическим сигналом. Но по такой же схеме выполняются в элект-

троакустике громкоговорители, а в измерительной технике вибростенды, служащие для испытаний различных изделий на виброустойчивость и для калибровки вибродатчиков. Они, наоборот, преобразуют электрический сигнал в механические колебания. Это “наоборот” и означает обратимость преобразования.

Обратимым является также пьезоэлектрический эффект: силовое воздействие на пьезокристалл, снабжённый проводящими обкладками, вызывает появление на них электрического заряда, а электрическое напряжение приложенное к обкладкам, вызывает деформацию кристалла. Эти явления используются в датчиках акселерометров, излучателях и приёмниках ультразвука, высокостабильных генераторах высокой частоты, где пьезокристалл заменяет колебательный контур.

Обратимый преобразователь ведёт себя как своеобразный трансформатор со сторонами различной физической природы. Легко строится его схема замещения с электрической стороны, учитывающая приведённые параметры механической стороны. В этом одна из привлекательных черт общей теории обратимых преобразователей.

Необратимые преобразования (например, преобразование, выполняемое упоминавшимся выше на странице 43 проволочным тензOMETром) не описываются какой-либо общей теорией. Можно даже задать вопрос: в обратимом преобразователе преобразуется энергия (или, говоря языком философии, форма движения), а что же преобразуется в проволочном тензOMETре?

Часто говорят, что входная величина преобразователя (в данном примере деформация) преобразуется в выходную величину (в данном примере изменение сопротивления). Но, строго говоря, невозможно *преобразовать одну величину в другую!* Величина есть средство описания объектов, а не какая-то сущность, над которой можно выполнять операции [10].

Более правильным представляется такое выражение: множество размеров входной величины *отображается* во множество размеров выходной величины. Наверное, ещё правильнее говорить о том, что *участок шкалы* входной величины отображается в соответствующий участок шкалы выходной величины.

Ведь, наряду с отображением *размеров* существенным является отображение *числовых систем* шкал: именно это отображение называ-

ется *характеристикой преобразования*. Характеристика преобразования должна быть известной и стабильной – в этом главное отличие *измерительных* преобразователей от устройств, используемых в других областях.

Выше было сказано, что необратимые преобразования не описываются общей теорией. Однако у *преобразователей* могут быть общие свойства (например, динамические). В учебном пособии [24] они по возможности выделены и рассмотрены. Мы в нашем кратком обзоре не будем пересказывать содержание этого пособия, а ограничимся несколькими характерными примерами преобразований.

Возможны преобразования, основанные на исходном определении измеряемой величины. Их даже вряд ли уместно называть эффектами.

Так, *динамическая вязкость* как физическая величина характеризует внутреннее трение в жидкости. Поэтому ряд методов её измерения основывается на том сопротивлении, которое испытывает пластина, движущаяся в жидкости так, что направление движения лежит в её плоскости, или вращающийся в жидкости цилиндр.

Вязкость может быть отображена, например, декрементом затухания механической колебательной системы, содержащей погружённую в жидкость пластину, или вращающим моментом, необходимым для вращения погружённого в жидкость цилиндра с определённой скоростью.

Целый ряд механических величин – сила, давление, крутящий момент – может отображаться деформацией соответствующего упругого элемента (балки, мембраны, участка вала).

Отметим отличие закона Гука, который связывает силовое воздействие с деформацией, от закона электромагнитной индукции, упоминавшегося выше в связи с обратимыми преобразованиями. Закон электромагнитной индукции является точным, а закон Гука – приближенным, поскольку он описывает свойство твёрдого тела, зависящее от многих факторов. Достаточно указать на так называемое упругое последствие: деформированное тело после снятия нагрузки не сразу возвращается в исходное состояние.

Большинство необратимых преобразований, используемых для измерений, хотя и описываются соответствующими физическими тео-

риями, но для целей практики рассматриваются феноменологически – характеристики соответствующих преобразователей определяют экспериментально (и в важнейших случаях стандартизируют). Детальный физический анализ бывает нужен метрологам для обнаружения причин нестабильности преобразователей.

К наиболее важным эффектам, используемым для измерений, относятся термоэлектрический и терморезистивный.

Термоэлектрический эффект, открытый Томасом Иоганном Зеебеком в 1821 г., состоит в появлении электродвижущей силы (порядка единиц и десятков милливольт) в электрической цепи, содержащей контакты разнородных металлов, если температуры этих контактов различаются.

В настоящее время используются стандартизованные термопары нескольких различных типов, их характеристики приведены в документе:

ГОСТ Р 8.585–2001. ГСИ. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования.

Этот стандарт, объёмом более ста страниц, содержит таблицы зависимостей термоэдс от разностей температур (с интервалом один градус), коэффициенты аппроксимирующих полиномов для расчёта термоэдс по заданной температуре и температуры по заданной термоэдс, а также допускаемые отклонения от номинальных характеристик.

Известны два эффекта, обратных к эффекту Зеебека: эффект Пельтье и эффект Томсона (это не даёт основания рассматривать термопару как обратимый преобразователь!).

В измерительной технике находит применение эффект Пельтье: дополнительное (по отношению к джоулеву теплу) выделение или поглощение тепла в контакте разнородных металлов в зависимости от направления пропускаемого через них тока. Но он чаще используется не для преобразования информации, а как средство управления температурой какого-либо элемента устройства.

Терморезистивный эффект – увеличение электрического сопротивления металлической проволоки при её нагреве – был обнаружен в начале XIX века, намного раньше, чем вошло в обиход само понятие сопротивления.

В настоящее время широко используются платиновые и медные термометры сопротивления. Чаще всего их номинальное сопротивление при 0 °С составляет 50 или 100 Ом (бывают и другие номиналы); изменение сопротивления примерно равно 0,4% на градус. Зависимость сопротивления платинового терморезистора от температуры принято описывать полиномом третьей степени; характеристика медного терморезистора считается линейной.

Если приведённых примеров недостаточно для того, чтобы получить представление о разнообразии эффектов, лежащих в основе измерительных преобразований, читатель может обратиться к учебному пособию [24] или к более современному, но менее основательному пособию [22].

В последнем имеется глава, посвящённая *биодатчикам* (другой термин – *биосенсоры*). В качестве чувствительных элементов этих устройств используются биологические ткани или культуры бактерий. Представляется, что граница между биологическими и небιологическими датчиками не является резкой: датчик влажности с плодом горьха, меняющим объём от влажности, описан в [22] как биодатчик, но классический волосной гигрометр как будто не принято считать биологическим прибором.

В пособии [22] некоторый интерес представляет также попытка дать в виде приложения краткий перечень физических эффектов, используемых в датчиках.

4.5. Селекция

Если задача передачи и преобразования информации в измерительном канале состоит в том, чтобы донести до потребителя необходимую информацию, то задача селекции – очистить то, что передаётся, отсеять постороннюю информацию (в том числе вносимую узлами самого канала).

Селекция выполняется на всех этапах процесса измерения, начиная от его подготовки (левая, нисходящая ветвь рисунка 1.4) и кончая обработкой данных на уровне VI его восходящей ветви.

Недостаточная очистка информации проявляется в результате измерения в виде погрешностей, о которых далее и будет идти речь.

4.5.1. Источники неопределённостей и погрешностей

В этом подразделе предлагается заняться выявлением и описанием источников, причин появления неопределённостей и погрешностей, т. е. того, от чего должна быть очищена информация. Из дальнейшего будет видно, что в некоторых случаях уместно говорить именно о неопределённости, а в других – о погрешности, причём погрешности будут встречаться чаще.

Один из наиболее старых классификационных признаков погрешностей – деление их на *систематические* и *случайные*. Этот признак основан на поведении погрешности в ряду многократных измерений какой-либо постоянной величины.

Если при последовательных измерениях *составляющая погрешности, вносимая некоторым источником*, остаётся одной и той же – она называется систематической (далее для краткости вместо правильного выражения, только что выделенного курсивом, будем часто писать просто *погрешность*). Если погрешность от измерения к измерению меняется непредсказуемым образом, – она называется случайной.

Промежуточный случай имеет место, когда погрешность в ряду измерений изменяется закономерно. Если она изменяется монотонно, что бывает довольно часто, её называют *прогрессирующей*.

Особо рассматривают отдельные большие (по сравнению с разбросом случайной погрешности) отклонения – *промахи* или *сбои*.

Другой классификационный признак составляющих погрешности связан с их происхождением. В пособии [1], на странице 87, об этом написано так:

“...Эти составляющие делят на *инструментальные* (или аппаратные), *методические* и *личные*. Несколько упрощая этот вопрос, можно сказать, что за инструментальные составляющие отвечает изготовитель аппаратуры, за методические – организатор эксперимента (или составитель методики выполнения измерений – МВИ), а за личные – персонал, проводящий эксперимент”.

Некоторые авторы в понятие методической погрешности вкладывают иной смысл: методической они называют составляющую погрешности *измерительной аппаратуры*, которая не может быть уменьшена улучшением качества её деталей и узлов. Мы не будем соглашаться с

этой точкой зрения: для *потребителя аппаратуры* все составляющие её погрешности являются инструментальными.

У нас сейчас есть возможность подробнее рассмотреть источники неопределённостей и погрешностей, потому что многое уже было сказано в предыдущих разделах. В них уже обсуждался ряд таких источников; есть смысл что-то из сказанного кратко повторить, а что-то ещё добавить.

Уже при *описании объекта* – на этапах выбора априорной модели и её параметризации – неизбежна неопределённость. Выше, на странице 30, мы цитировали философское высказывание Софьи Александровны Яновской о “расплывчатости границ исследуемых объектов или явлений”. Вклад этой *расплывчатости объекта* в общую неопределённость результата измерения зачастую незаметен, но во многих случаях он оказывается существенным.

В качестве примера рассмотрим измерение амплитуды и ширины импульса, примерная форма которого показана на рис. 4.3 (график заимствован из пособия [1], но он мог бы быть фрагментом записи, скажем, биологического вызванного потенциала).

Амплитуда импульса должна отсчитываться от пьедестала до максимума, но пьедестал-то после окончания импульса не тот, что был до его начала! Приходится *договариваться* о способе отсчёта амплитуды (например, попытавшись интерполировать пьедестал).

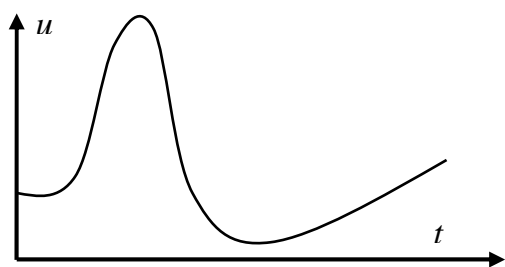


Рис. 4.3

Ширина импульса может оцениваться различными методами [9]; положим, что выбран простейший метод оценки по характерным точкам на переднем и заднем фронтах. Но в зависимости от выбора этих точек будут получаться совершенно различные результаты! Опять приходится *договариваться*, например, оценивать ширину на уровне половины амплитуды, – но ведь амплитуда сама неопределённа!

Ещё более яркий пример измерительной задачи, где расплывчатость объекта очень велика, – измерение высоты нижней границы облачности, жизненно важное для авиации. Здесь объект расплывчат и по вертикали, и по горизонталям.

Составляющую неопределённости, обусловленную расплывчатостью объекта, можно сопоставить с термином *дефинициальная неопределённость*, который впервые появился в рекомендациях [3]:

“Составляющая неопределённости измерений, являющаяся результатом ограниченной детализации в определении измеряемой величины”.

В развиваемой нами системе понятий: речь должна идти о детализации не *измеряемой величины*, а *параметра модели* исследуемого объекта. В приведённых выше примерах три *величины* – напряжение, длительность и длина – однозначно определяются соответствующими шкалами. Неопределённость возникает только при назначении *параметров* – амплитуды и ширины импульса, высоты облачности.

Впрочем, разговор об *ограниченной детализации* в [3] связан, скорее всего, не столько с расплывчатостью объекта, сколько с возможной неадекватностью выбираемой модели.

Здесь излюбленный пример – деталь в виде цилиндрического валика. При правильной форме цилиндра безразлично, в каком сечении и между какими противоположными точками сечения измерять его диаметр. Но сечения реального валика могут быть, например, эллиптическими, и тогда измерения “диаметра” между разными точками будут давать различные результаты. Учёт отклонений от идеальной формы – это, видимо, и есть та *детализация*, с которой связана *дефинициальная неопределённость* по [3].

Ну и как же быть в примере с валиком? Тщательно описать его реальную форму? Совсем не обязательно. Всё зависит от *цели измерения*. Если, например, требуется обеспечить свободное вращение валика в некотором отверстии, то важным будет только максимальное расстояние между противоположными точками сечения. Этот параметр (а отнюдь не напрашивающийся “средний диаметр”) и нужно будет измерять, а его точное имя включить в протокол измерения. Бесконечное же уточнение “детализации” и невозможно [27], и не нужно.

Расплывчатость объекта и неадекватность его модели – понятия в какой-то степени близкие, но всё же различные. Понятие расплывчатости концентрирует внимание на объекте, а понятие неадекватности – на экспериментаторе, выбирающем модель объекта.

Прежде чем оставить рассматриваемую тему, напомним о существовании специфического класса измерительных задач, где расплывчатость объекта давно учитывалась.

Позволим себе снова процитировать пособие [1]:

“Особый случай неопределенности объекта имеет место тогда, когда конкретный экземпляр объекта или некоторая *выборка* из совокупности объектов рассматривается как представитель *типа объектов* и по результатам измерения на этом экземпляре или выборке приходится судить о свойствах всего типа. В этом случае роль объекта, имеющего неопределенность, играет весь этот тип или, как говорят статистики, *генеральная совокупность*, а сама неопределенность обуславливается неизбежным *статистическим разбросом* свойств экземпляров, образующих выборку”.

Следующей по порядку темой нашего рассмотрения должна быть *рецепция*. В разделе 3.1 говорилось, что она характеризуется энергетическим и параметрическим воздействиями на объект, а также, возможно, недостаточной избирательностью.

Воздействия на объект являются причинами *систематических погрешностей* (в данном случае понятие неопределённости не подходит). Часто оказывается возможным внести в результат измерения полученные расчётным путём *поправки* на эти погрешности. Для этого нужна информация об определённых атрибутах объекта – не тех, которые подлежали измерению.

Излюбленным примером здесь является измерение напряжения стрелочным вольтметром в маломощной цепи (этот пример уже приводился выше на странице 45). Для вычисления поправки нужно знать выходное сопротивление $R_{\text{вых}}$ исследуемой цепи, каким его “видит” вольтметр, а также сопротивление самого вольтметра $R_{\text{в}}$.

Несложный расчёт поправки приведён в пособии [1] на страницах 98–99; чтобы не повторяться, дадим другой вариант расчёта. Ведь на лабораторных стрелочных вольтметрах обычно указывается не сопротивление $R_{\text{в}}$, а ток полного отклонения $I_{\text{п}}$, например, 3 мА. Если вольтметр показал напряжение $U_{\text{в}}$, а его предел измерения равен $U_{\text{п}}$, то, значит, он потребил из исследуемой цепи ток $I_{\text{п}} \cdot U_{\text{в}} / U_{\text{п}}$, и этот ток вызвал уменьшение действительного напряжения в цепи на $R_{\text{вых}} \cdot I_{\text{п}} \cdot U_{\text{в}} / U_{\text{п}}$.

Это и есть поправка, которую нужно прибавить к U_v , чтобы найти действительное напряжение.

Назовём ещё пример ситуации, когда при точных измерениях вносится расчётная поправка на систематическую погрешность. Пример этот хорошо известен, только его трактовка с позиций *избирательности* может показаться непривычной.

Чашки, на которых лежат взвешиваемое тело и гири при взвешивании на равноплечих весах, воспринимают силы, вызванные в основном гравитационным полем Земли. Но есть и небольшие силы противоположного направления – архимедовы силы, поскольку взвешиваемое тело и гири как бы плавают в воздухе. Эти силы не вносили бы погрешность, если бы плотность взвешиваемого тела совпадала с плотностью гирь, но обычно эти плотности не равны. Для расчёта поправки (приводить его не будем) необходимо знать ещё плотность воздуха.

Распространённый приём борьбы с погрешностями, вызванными недостаточной *избирательностью* рецепции, состоит в использовании так называемых дифференциальных датчиков. Последние конструируются так, что полезная информация воспринимается двумя элементами датчика с противоположными знаками, а мешающая – с одинаковыми. Сигналы двух элементов вычитаются, и мешающая информация устраняется.

На рис. 4.4 изображён неравновесный мост, в котором либо два смежных плеча, либо все четыре плеча образованы проволочными тензометрическими преобразователями (см. страницу 43). Мост питается от источника напряжения $U_{\text{пит}}$, а $U_{\text{вых}}$ – напряжение его выходного сигнала.

Пусть этот мост используется в торсиометре – приборе для измерения крутящего момента на некотором валу. Обычно в этом случае рабочими являются все четыре плеча моста, причём тензопреобразователи наклеиваются на вал так, чтобы R_1 и R_4 испытывали деформацию растяжения, а R_2 и R_3 – сжатия (для этого они располагаются под углами 45° к продольному направлению).

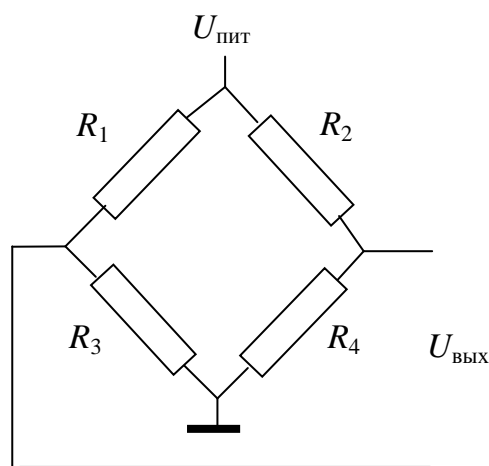


Рис. 4.4

Относительное изменение сопротивления от деформации составляет $k \cdot \varepsilon$, где ε – относительная деформация, а k – коэффициент тензочувствительности (для проволочных преобразователей он примерно равен 2). Но сопротивление зависит также от температуры t , его относительное изменение можно выразить как $\alpha \cdot \Delta t$, где α – температурный коэффициент сопротивления проволоки.

Влияние изменений температуры на все четыре плеча одинаково. Для малых изменений сопротивлений (на практике они обычно лежат в пределах 0,2%) приближенно получается:

$$R_1 = R_4 = R_0 \cdot (1 + k \cdot \varepsilon + \alpha \cdot \Delta t); \quad R_2 = R_3 = R_0 \cdot (1 - k \cdot \varepsilon + \alpha \cdot \Delta t),$$

где R_0 – исходное сопротивление. Выходное напряжение моста в первом приближении зависит только от деформации.

Итак, на примерах показаны способы борьбы с различными составляющими погрешности рецепции,

Но до сих пор рассматривалась только “правильная” рецепция, умалчивалось о том, что во многих случаях воспринимается *вообще не тот атрибут объекта*, который интересует потребителя. На это любил указывать П.В. Новицкий.

Пружинные весы градуируются в единицах *массы* m , а фактически воспринимают *вес* объекта $F = m \cdot g$, где g – ускорение свободного падения в пункте, где используются весы. При их перемещении, например, на другую широту возникнет систематическая мультипликативная (пропорциональная измеряемой величине) погрешность.

Не следует думать, что пружинные весы – это примитивное устройство, используемое лишь домохозяйками и рыбаками. Существуют весы с упругими элементами, деформация которых воспринимается тензометрическими, ёмкостными или другими преобразователями, обладающие довольно высокой точностью и имеющие современный цифровой отсчёт.

Для устранения погрешности от изменения g в них может быть предусмотрен режим *калибровки*: на грузоприёмное устройство помещается гиря известной массы, и коэффициент преобразования измерительного канала вручную или автоматически регулируется так, чтобы получился правильный отсчёт.

Заметим: здесь термин *калибровка* использован в его традиционном значении, в котором его привыкли употреблять практики. В метро-

логическом стандарте ГОСТ 16263–70 (как уже говорилось, давно не действующем) он означал другое – своего рода выравнивание набора мер, например, гирь, с помощью совокупных измерений. В последнем по времени документе [3] термину *калибровка* придано третье значение: он почти (но не совсем) синонимичен термину *поверка*.

Другой пример восприятия “не того” атрибута объекта – измерение количества некоторой жидкости по её *объёму* (или даже её *уровню* в хранилище) при градуировке средства измерений в единицах *массы*. Здесь причинами систематической погрешности могут быть изменение состава жидкости и её температуры. Возможно автоматическое внесение поправки на изменение температуры с помощью вспомогательного канала измерения этой *влияющей величины* (последний термин некорректен, – величина не может *влиять*, – но широко распространён; в [3] имеется его определение).

Ещё один пример (принадлежащий П.В. Новицкому): температура раскалённого металлического слитка измеряется на его поверхности, в то время как важно знать температуру внутри слитка. Здесь уже приборная коррекция невозможна, и приходится довольствоваться теоретическими соображениями.

Возможно, последний пример правильнее было бы отнести не к рецепции, а к локализации. На нём мы кончим обсуждение составляющих недостоверности, вносимых рецепцией.

Следующим вопросом как раз и является *локализация*, точечная и интегральная. Связанные с ней погрешности обсудим только на простейшем случае точечной локализации во времени, где множество локализации одномерно и непрерывно, причём ограничимся электрическими средствами локализации. Более сложные ситуации не настолько исследованы, чтобы рассматривать их здесь с общих позиций.

Точечная локализация во времени может представлять собой датирование моментов *измерения* изменяющегося информативного параметра сигнала или датирование моментов прихода какого-либо *постороннего события*.

В первом случае обычная ситуация такова: некоторый АЦП запускается периодически с известной частотой, и последовательность его выходных отсчётов используется как дискретное отображение непрерывной сигнальной функции [28].

Возможность такого отображения без потери информации утверждается *теоремой Котельникова* (в западной литературе – теорема Найквиста или иногда теорема Шеннона): сигнал с *ограниченным по частоте спектром* может быть точно восстановлен по последовательности дискретных отсчётов, если эти отсчёты следуют равномерно с частотой, *более чем вдвое* превышающей граничную частоту спектра сигнала.

Сигнал с ограниченным спектром должен иметь бесконечную длительность, поэтому в реальных условиях утверждение теоремы Котельникова приходится рассматривать как приближенное. Тем не менее, при использовании АЦП, запускаемого с частотой f_d (частотой дискретизации), в сигнале должны быть сохранены только составляющие с частотами, заведомо *меньшими частоты Найквиста* $f_n = f_d/2$.

Если дискретизировать сигнал, в котором содержатся составляющие более высоких частот (рис. 4.5, а) то возникает так называемое *наложение спектров* (английский термин – aliasing). Оно является причиной неустранимой погрешности при восстановлении непрерывного сигнала по дискретным отсчётам. Для подавления высокочастотных составляющих используются фильтры нижних частот, которые на техническом жаргоне называются *антиэлайзинговыми*. Наряду с полезным эффектом антиэлайзинговой фильтрации, возникает и вредный эффект в виде искажения сигнала, пропущенного через фильтр.

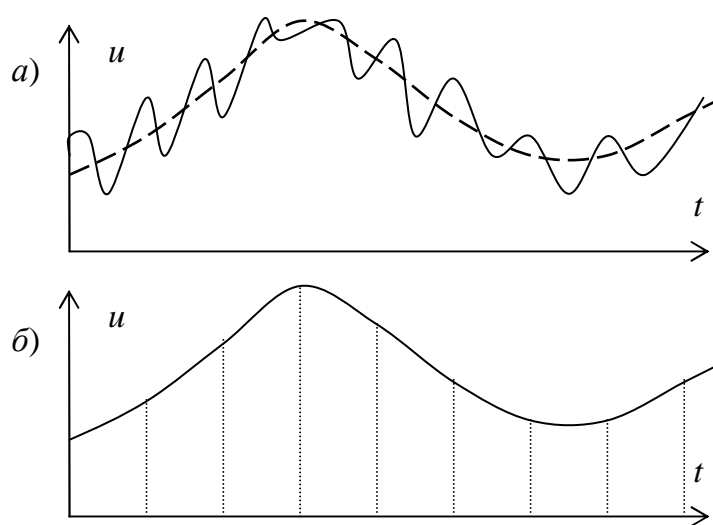


Рис. 4.5

Сигнал, сглаженный антиэлайзинговым фильтром, уже можно дискретизировать – преобразовывать в последовательность отсчётов. Они показаны вертикальными отрезками на рисунке 4.5, б. Моменты запуска АЦП образуют шкалу времени для датирования отсчётов.

Отсчёты на рисунке 4.5 показаны мгновенными, но реальные АЦП работают конечное время, и результат преобразования соответствует не моменту запуска, а некоторому другому моменту в пределах времени преобразования [29]. Выше, на странице 48, уже говорилось, что интервал возможных “реальных моментов измерения” раньше назывался апертурным временем, а сейчас в нашей стране введён термин *погрешность датирования*. Она определяется как интервал от момента запуска АЦП до “реального момента измерения”.

Систематическая составляющая погрешности датирования (aperture delay) смещает во времени, но не искажает сигнальную функцию. Поэтому более опасной считается случайная составляющая (aperture jitter). Эта “апертурная дрожь” у современных устройств выборки/хранения, запоминаящих преобразуемое напряжение на время преобразования АЦП, лежит в диапазоне *пикосекунд*.

Другие проблемы могут возникнуть при использовании АЦП, усредняющих напряжение за определённое время (АЦП двухтактного интегрирования). “Моментом измерения” в этом случае следует считать середину интервала усреднения. Менее понятно, какой момент измерения следует приписать аналого-цифровым преобразователям, имеющим в своём составе фильтры нижних частот (АЦП с $\Sigma\Delta$ -модуляторами).

Второй случай – датирование электрическими средствами моментов прихода какого-либо постороннего события – требует прежде всего представления этого события электрическим сигналом (если событие короткое, то сигнал представляет собой импульс). Неопределённости возникают при формировании этого импульса, а также при выявлении той точки импульса, которая принимается за момент прихода события. Заметим, что в книгах, написанных специалистами по цифровой технике, неопределённости этого рода обычно игнорируются, импульс считается идеальным!

Само датирование может заключаться, например, в запоминании факта прихода события до ближайшего импульса выбранной шкалы времени и последующей регистрации состояния счётчика импульсов

этой шкалы. Такая процедура позволяет избежать случайного попадания момента регистрации на переходный процесс в счётчике, вызванный приходом очередного импульса.

О погрешностях, связанных со *стимуляцией*, было сказано в разделе 3.3. Коротко напомним: слишком сильный стимул изменяет или повреждает объект, слишком слабый – вызывает соответственно слабый отклик; нестабильность стимула может вызвать соответствующую нестабильность отклика (средства борьбы с этим – методы полного уравнивания или логотрический режим); в случаях, когда важна форма стимула, возникает погрешность от искажения этой формы (в некоторой степени её можно корректировать).

Нужно добавить ещё, что в ряде случаев стимул оказывается источником помехи. К этому мы вернёмся ниже, когда будем обсуждать помехи в измерительном канале.

Условия, создаваемые для объекта, также могут вызвать погрешность из-за своей нестабильности. В некоторых случаях эту нестабильность удаётся выявить и отчасти устранить, проводя эксперимент “в прямом и обратном порядке”. Георг Ом, которого мы упоминали на странице 35, поочерёдно подключал к своей установке провода разной длины – сначала от коротких к длинным, а затем от длинных к коротким. Такой же приём полезен для выявления влияния стимула на объект. Например, вольтамперную характеристику какого-либо элемента желательно снимать дважды, сначала увеличивая напряжение до максимума, а затем уменьшая его.

При *ускоренных испытаниях* возникает неопределённость, связанная с необходимостью принятия теоретической модели воздействия различных факторов на объект (трудно добиться полного соответствия между моделью и поведением реального объекта).

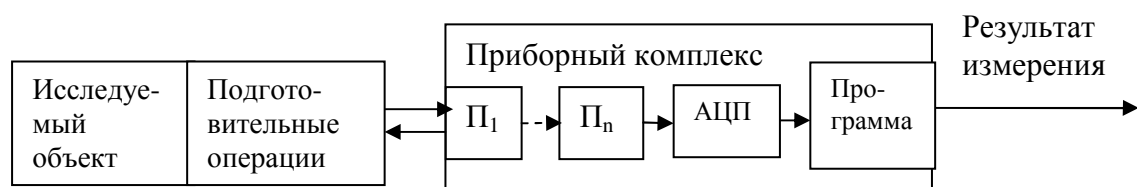


Рис. 4.6

Погрешности и неопределённости, связанные с *передачей и преобразованием информации*, рассмотрим, имея в виду общую структуру

измерительного канала, показанную на рис. 4.6 (она в свою очередь опирается на рис. 4.1). Ввиду разнообразия средств передачи и преобразования, здесь неизбежна некоторая поверхностность рассуждений.

При *подготовительных операциях* информация передаётся веществом. Вещество, как уже говорилось, может теряться, загрязняться, вступать в нежелательные реакции и т. д.

Возникает вопрос: как убедиться в том, что искажения при передаче находятся в заданных пределах?

Если бы речь шла о передаче электрического сигнала, никакой проблемы не возникло бы. Совсем нетрудно подать на вход канала образцовый сигнал с заданными параметрами и сравнить результат измерения этих параметров с тем, что задавалось.

Немного сложнее обстоит дело при измерении какого-либо параметра вещества – плотности, вязкости и т. п. Нужно только иметь соответствующий стандартный образец.

Если выполняется анализ состава, скажем, газа, – тоже не возникает особых проблем. Не так уж сложно приготовить образцовую смесь заданного состава.

Но при биологических исследованиях зачастую приходится извлекать вещество из тканей, нарушая их структуру. Есть ли в таких ситуациях возможность использовать что-то вроде стандартного образца? Или приходится полагаться на отработанную методику подготовки пробы? Автор настоящего издания, не будучи биологом, не знает ответов на эти вопросы.

Здесь хочется отвлечься и высказать следующее предположение: профессиональные метрологи, если и не всегда выражаются открыто, но в душе, вероятно, убеждены, что экспериментаторы-биологи не доросли до того уровня, на котором находится физическая метрология. Этот уровень, действительно, очень высок. Но ведь сложность биологических объектов – совсем иная, чем сложность объектов техники, физики или химии! И, возможно, именно метрологи не доросли до понимания всех особенностей биологического эксперимента. Сейчас создается впечатление, что они считают свой долг выполненным, когда им удаётся метрологически обеспечить *медицинскую аппаратуру*. Но хотелось бы видеть более тесное взаимодействие метрологов с биологами, которое было бы полезно обеим сторонам.

Когда информация доведена до начала цепочки измерительных преобразователей (то, что в этой цепочке могут быть разветвления и обратные связи, сейчас несущественно), задача поиска источников погрешностей или неопределённостей упрощается.

Эти источники могут либо находиться *в самой аппаратуре*, либо быть *внешними* по отношению к ней.

Здесь необходимо подчеркнуть обстоятельство, недостаточное осознание которого легко может привести к путанице: один и тот же термин *погрешность* фактически применяется в двух различных значениях.

До сих пор мы везде (за исключением страницы 78, где обсуждались пружинные весы) использовали одно из этих значений: *погрешность результата измерения* как разность между значением величины, полученным при измерении, и предполагаемым истинным значением величины. Это есть именованное число, которое остаётся неизвестным, но принимается лежащим в некотором интервале, поддающемся оценке. Можно для более наглядного выражения качества результата измерения отнести этот интервал к самому результату; получится безразмерная относительная оценка.

Другое значение того же термина – *погрешность средства измерений* (будем для определённости говорить о *приборе*). Это есть разность между показаниями прибора и *действительными значениями* измеряемой величины, которые могут быть заданы при поверке с помощью калибратора или более точного прибора.

Термин *действительное значение* используется здесь, чтобы показать, что речь идёт не о неизвестном (или несуществующем) истинном значении величины, но о значении, имеющем по крайней мере в три – пять раз меньшую неопределённость, чем показания поверяемого прибора.

Погрешность прибора может быть определена при поверке в каждой требуемой точке его диапазона, и, таким образом, выражается не числом, а *функцией* измеряемой величины. Кроме того, погрешность прибора может зависеть от условий среды, а также от особенностей входного сигнала. Например, вольтметр переменного тока обычно градуируется в единицах действующего (среднеквадратического) значения напряжения. Но в ряде случаев эта градуировка справедлива только при

синусоидальном входном сигнале, а при другой форме сигнала возникает погрешность.

Погрешность прибора, работающего в оговоренных нормальных условиях, называют *основной* (intrinsic error), а составляющие погрешности, возникающие при отклонениях от нормальных условий – *дополнительными погрешностями* [3].

Ещё в первых десятилетиях XX века немецкий инженер Георг Кейнат предложил характеризовать прибор *классом точности* – выраженной в процентах и округлённой до одного из чисел некоторого стандартного ряда *приведённой погрешностью*, максимальной по диапазону. (Приведённой называется абсолютная погрешность, отнесённая к некоторому нормирующему значению, обычно – пределу измерения). Например, погрешность миллиамперметра класса 0,5 с пределом измерения 150 мА не должна во всём диапазоне превышать 0,75 мА.

Для сложных и дорогих приборов оценка точности одним числом чрезмерно груба. Для её уточнения выделяют в функции, описывающей зависимость погрешности от измеряемой величины, *аддитивную составляющую*, ограниченную постоянным по диапазону значением, и *мультипликативную составляющую*, пропорциональную измеряемой величине (другие встречающиеся в литературе термины: погрешность нуля и погрешность чувствительности).

Этот способ нормирования, наряду с прежними, более простыми, регламентирован стандартом ГОСТ 8.401–80, на который мы ссылались выше на странице 6. Приведём скопированную из этого стандарта двучленную формулу для предела допускаемой *относительной* основной погрешности прибора δ :

$$\delta = \frac{\Delta}{x} = \pm \left[c + d \left(\left| \frac{X_k}{x} \right| - 1 \right) \right],$$

где Δ – предел допускаемой абсолютной погрешности, x – значение измеряемой величины, X_k – предел измерения (при несимметричном относительно нуля диапазоне – больший по модулю из пределов), c и d – положительные числа, выбираемые из установленного стандартом ряда.

Легко видеть, что при $x = X_k$ допускаемая относительная (совпадающая в этой точке с приведённой!) погрешность равна c (как и прежде, её выражают в процентах).

Из структуры формулы следует, что допускаемая *абсолютная* погрешность при $x = X_k$ максимальна, поэтому c – это то же, что раньше считалось классом точности. Приравняв $x = 0$, можно убедиться в том, что d есть предел *приведённой аддитивной составляющей* допускаемой погрешности; значит, *мультипликативную составляющую* можно выразить как $c - d$.

При нормировании погрешности двучленной формулой на прибор наносят обозначение класса точности в виде дроби c/d . Например, обозначение 0,05/0,02 следует понимать так: максимальная допускаемая погрешность (в конце диапазона) составляет 0,05%; из этого значения 0,02% – это приведённая аддитивная составляющая погрешности.

Если такое обозначение нанесено на цифровом вольтметре для предела 10 В (для каждого из нескольких пределов может быть указан свой класс!), а прибор показывает 2,000 В, то допускаемая погрешность этого показания составит $2 \cdot 0,03\% + 10 \cdot 0,02\% = 0,0026$ вольт.

В отличие от приборов, показания которых воспринимаются человеком, измерительные преобразователи зачастую используются в *динамическом режиме*, при котором входной сигнал может быстро изменяться. При этом возникает новая составляющая погрешности, так и называемая *динамической*. Её можно оценить, зная свойства сигнала и характеристики преобразователя как динамического звена (см. страницы 53–54).

Если преобразователь не является линейным динамическим звеном, нормируют частные динамические характеристики, например, время установления выходного сигнала при скачкообразном входном сигнале.

Динамические погрешности можно частично корректировать методами обратной фильтрации, упоминавшейся выше на странице 65. Это сложный вопрос, который невозможно изложить коротко.

Накануне горбачёвской “перестройки” в СССР была сделана попытка обеспечить более подробное нормирование метрологических характеристик средств измерений. Она была ориентирована на оценку вносимых средствами измерений составляющих погрешности (в част-

ности, случайной составляющей) при использовании этих средств в измерительных системах. Появился *ГОСТ 8.009–84. ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений*.

ГОСТ 8.009–84 (его основные идеи кратко изложены в пятой главе пособия [1]) остался своего рода памятником истории, поскольку советское Министерство приборостроения, средств автоматизации и систем управления (Минприбор) через несколько лет прекратило свою деятельность, а следование стандартам стало добровольным.

Внешние по отношению к измерительной аппаратуре источники погрешностей и неопределённостей – это влияющие факторы и помехи. Возможное действие влияющих факторов (изменения температуры, влажности, давления воздуха, магнитного поля и т. д) учитывается при нормировании метрологических характеристик средств измерений указанием дополнительных погрешностей или, по ГОСТ 8.009–84, *функций влияния*. Знание последних позволило бы частично корректировать влияние внешних факторов с помощью вспомогательных измерений; традиционное знание только оценок дополнительных погрешностей не даёт такой возможности.

Помехи в измерительных каналах могут быть разной природы. Например, при точном взвешивании помехой является вибрация стола, на котором установлены весы. В связи с развитием электрической цифровой и системной измерительной техники, с её высокой чувствительностью и сложностью, особую остроту приобрёл вопрос подавления электрических помех, действующих на входах узлов измерительного канала.

На следующей странице помещён рис. 4.7, заимствованный из пособия [1] Он иллюстрирует одну из ситуаций появления электрических помех. Здесь предполагается, что необходимо измерить напряжение сигнала U_S , возникающее между двумя электродами, наложенными на кожу пациента.

Переменное электрическое поле E от каких-либо находящихся поблизости токоведущих частей оборудования наводит помеху в виде переменного напряжения (относительно корпуса прибора, не показанного на рисунке) *на оба электрода*. Эта синфазная помеха раньше называлась *помехой общего вида* (common mode interference); сейчас официальный термин – *продольная помеха*.

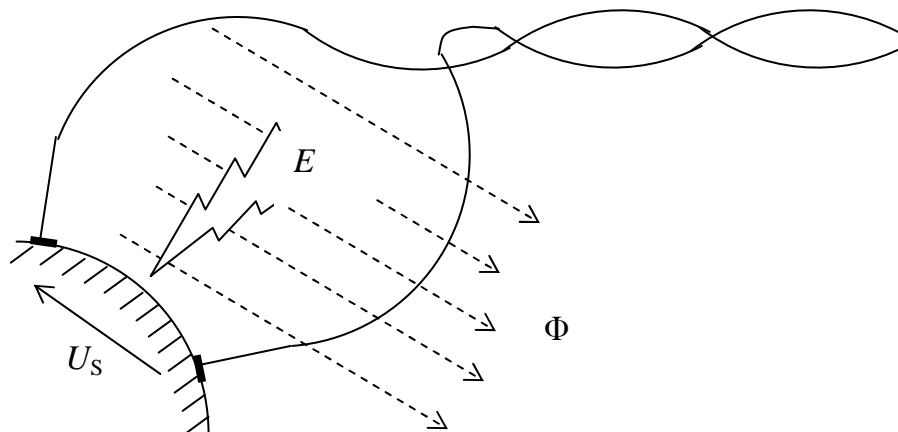


Рис. 4.7

Если в помещении есть провода, по которым течёт переменный ток, то в нём создаётся переменное магнитное поле Φ . В контуре, образованном проводниками, которые идут от электродов, оно наводит переменную электродвижущую силу. Такая помеха действует в контуре последовательно с полезным сигналом. Её было бы уместно назвать дифференциальной, но до недавнего времени использовали тоже кальку с английского: *помеха нормального вида* (normal mode interference), а сейчас официальный термин – *поперечная помеха*.

Продольная, синфазная помеха действует одинаково на два входных зажима прибора или два контакта преобразователя, и не должна влиять на результат измерения при тщательном симметрировании подводящих линий и входных цепей прибора. Но такое симметрирование выполнить трудно, а к тому же большая синфазная помеха выводит входные цепи из нормального режима и может даже повредить их.

Более эффективное средство борьбы с ней – *гальваническое разделение* (или, что то же, гальваническая развязка), т. е. разрыв контуров, в которых действует продольная помеха, при сохранении передачи полезного сигнала.

В современных цифровых лабораторных вольтметрах гальваническое разделение реализуется *внутри прибора*: небольшой входной блок изолируется от остальной части прибора и общается с ней только через оптроны или трансформаторы с малой проходной ёмкостью. Это на техническом жаргоне именуется *плавающим входом*.

Экран входного блока выводят на отдельный входной зажим. Правильное подключение источника сигнала к такому прибору иллюстрирует рис. 4.8, тоже заимствованный из пособия [1]. На этом рисунке прибор имеет, кроме сигнальных зажимов H (high) и L (low), ещё зажим экрана S (shield) и винт заземления (обычно располагаемый на задней стенке). Соединение между экраном и источником сигнала есть частный случай так называемой *эквипотенциальной защиты*.

Гальваническое разделение эффективно снижает погрешности от продольных помех, имеющих вид как переменных “наводок”, так и постоянных разностей потенциалов между источником сигнала и входом измерительного канала.

Для *поперечной* помехи, напротив, вид играет решающую роль, так как по способу включения в цепь эта помеха не отличается от полезного сигнала. Поэтому первый вопрос, который нужно задать себе при решении задачи борьбы с поперечной помехой: какими признаками она отличается (или *может быть сделана отличающейся*) от сигнала?

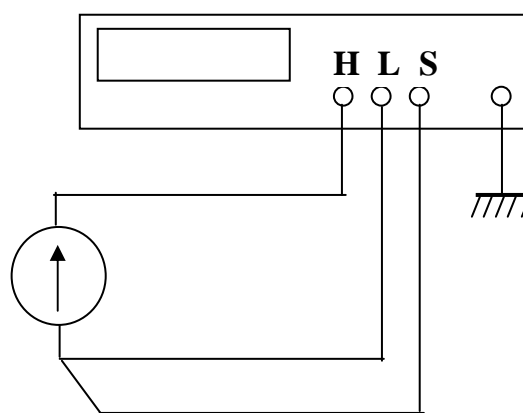


Рис. 4.8

Слова, заключённые в скобках в предыдущей фразе, фактически относятся не столько к помехе, над которой мы обычно не властны, сколько к полезному сигналу.

Выше, на странице 52, приводился пример борьбы с влиянием постоянной термоэлектродвижущей силы в контактах, которая искажает малое постоянное измеряемое напряжение. Если есть возможность сделать измеряемое напряжение переменным, – нужно ею воспользоваться (как это и было показано в упомянутом примере).

Чаще всего используется различие между поперечной помехой и полезным сигналом *по частотному спектру* [28]. Высокочастотные помехи, например, от излучений радиостанций, подавляются фильтрами нижних частот; помехи сетевой частоты могут “вырезаться” *фильтрами-пробками*, например, двойными Т-образными RC-мостами. Эффективно подавляют сетевые помехи аналого-цифровые преобразователи двухтактного интегрирования, усредняющие сигнал за один или

несколько периодов сетевого напряжения. Но нужно помнить, что любой фильтр, подавляющий помеху, одновременно в той или иной степени искажает полезный сигнал.

Могут быть и другие различия между сигналом и помехой. В качестве примера рассмотрим один из методов объективной аудиометрии – исследование слуховых вызванных потенциалов. В ухо пациента подаётся стимул в виде короткого щелчка, и на поверхности кожи головы регистрируется последовательность импульсов, обусловленных работой различных отделов слухового анализатора. Помехой в этом случае является напряжение обычной энцефалограммы, значительно превышающее слабый вызванный потенциал.

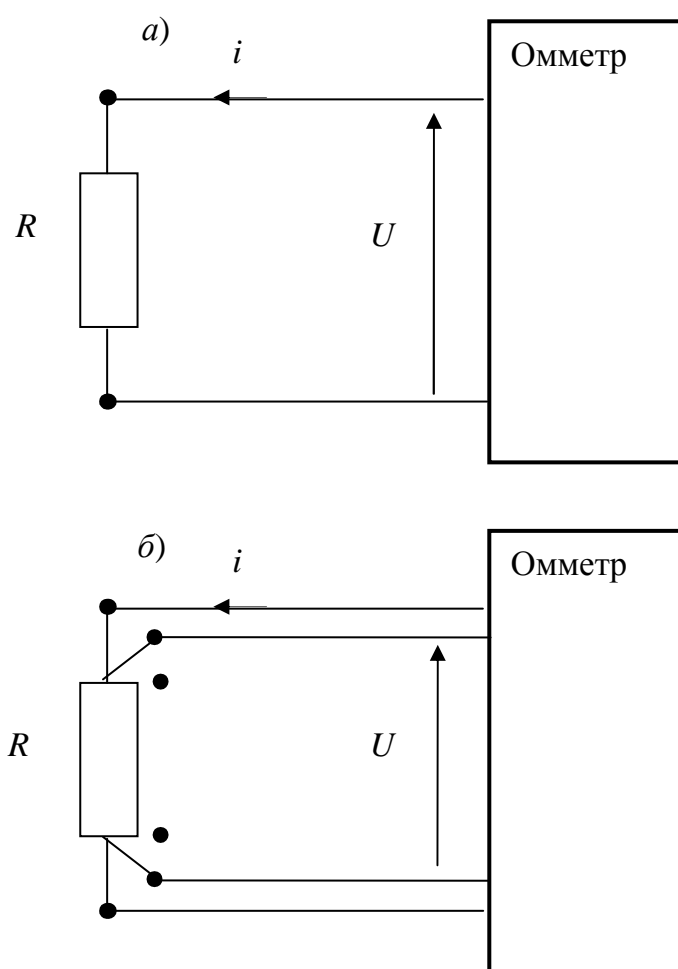


Рис. 4.9

Но полезный сигнал *детерминирован* и его копия может быть вызвана повторной подачей стимула, а энцефалограмма выглядит как реализация *случайного процесса*. Многократно, несколько тысяч раз, повторяя стимул, можно с помощью синхронного накопления уверенно выделить сигнал: ведь он накапливается по линейному закону, а независимые реализации случайной помехи – как квадратный корень из числа повторений.

Конечно, для борьбы с помехами широко используются экранирование; правильное заземление;

пространственное разделение “силовых” и сигнальных цепей и тому подобные общие методы. К сожалению, эта важнейшая тематика недостаточно отражена в технической литературе.

Прежде чем закончить разговор о помехах, нужно вспомнить об особом виде помех – о помехах, создаваемых стимулом, если есть пути его *воздействия на отклик помимо исследуемого объекта*. Исключение этих путей предлагается назвать *разделением стимула и отклика*.

Классическим примером может служить измерение малых сопротивлений омметром, основанным на методе амперметра и вольтметра. При *двухпроводном* присоединении исследуемого резистора к прибору (рис. 4.9, а) последний измеряет суммарное падение напряжения на резисторе и подводящих проводах, а также контактах. Сопротивление этих проводов и контактов представляет собой погрешность.

Воздействие через подводящие провода исключается при *четырёхпроводном* присоединении (рис. 4.9, б), когда одна пара проводов является “токовой”, а другая “потенциальной”. Сопротивления токовой цепи исключаются из контура измерения напряжения, а влияние сопротивлений проводов и контактов потенциальной цепи пренебрежимо мало при большом входном сопротивлении измерителя напряжения

Не следует думать, что четырёхпроводное соединение можно реализовать только в случае, когда исследуемый резистор имеет четыре зажима. Такие резисторы (образцовые, используемые в метрологических работах) действительно существуют. Но, например, при измерении сопротивления миниатюрного резистора с проволочными выводами, используемого в электронных устройствах, можно и токовые, и потенциальные цепи омметра подключить к резистору с помощью “крокодилов”, как условно показано на рис. 4.10, – ведь сопротивления контактов несущественны, если только прицеплять “потенциальный” крокодил прямо к выводу резистора, а не к “токовому” крокодилу.

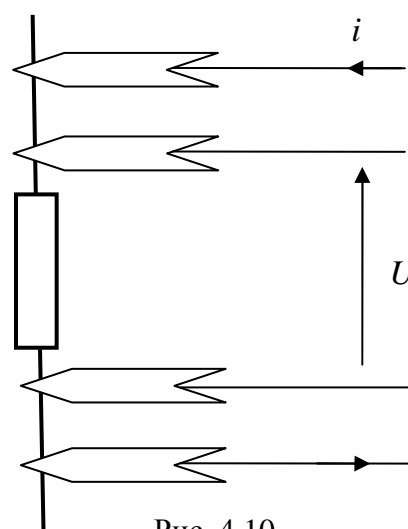


Рис. 4.10

На разделении токовых и потенциальных цепей основана также работа двойного моста Томсона (в одинарном мосте Уитстона используется двухпроводное включение резистора).

При измерении магнитных характеристик материалов на исследуемый образец наносятся две обмотки: намагничивающая и измери-

тельная. При этом стимул (намагничивающий ток) и отклик (индуцированное напряжение) разделены. Можно было бы использовать одну обмотку, но тогда падение напряжения на её сопротивлении явилось бы помехой. Аналогично, при измерении акустического сопротивления наружного слухового прохода лучше использовать отдельные излучатель и приёмник, а не один обратимый преобразователь.

В упомянутом выше методе объективной аудиометрии, основанном на регистрации слуховых вызванных потенциалов, электрический сигнал, преобразуемый в звуковой стимул, своим электромагнитным полем наводит помеху в цепях отклика.

Но если стимул имеет форму короткого импульса, он разделён *во времени* с основной частью отклика: наводимая помеха должна затухнуть по возможности быстро, так, чтобы она накладывалась только на начальную часть отклика.

Как видно, принцип разделения стимула и отклика приводит к довольно разнообразным решениям. Остаётся только удивляться, почему он не рассмотрен с общих позиций в технической литературе.

Заключительной стадией работы типового измерительного канала является *обработка первичных данных*. Когда-то она выполнялась вручную, в лучшем случае с использованием простейших средств механизации вычислений, и могла сопровождаться грубыми субъективными ошибками, – например, перестановкой цифр в числе или заменой цифры на другую, похожую на неё.

Современные программные средства обработки данных создают свои проблемы. Программы “непрозрачны” (как, впрочем, и современные приборы); не всегда ясно, что именно они делают с данными и какие результаты выдают; не может ли быть таких сочетаний обрабатываемых данных, при которых погрешности обработки достигают недопустимых значений. Особенно опасны элементы “интеллектуализации”: если программа берётся, например, устранять отсчёты, которые ей кажутся выпадающими, она может воспрепятствовать обнаружению экспериментатором некоего нового явления.

Ещё несколько десятилетий назад была поставлена проблема метрологической аттестации алгоритмов и программ обработки данных. По этой тематике защищены диссертации, выпущены нормативные документы, однако работу нельзя считать законченной.

Наиболее плодотворной представляется идея включать в состав программ такие подпрограммы, которые автоматически выдавали бы при каждом конкретном запуске оценку погрешности, включающую в себя трансформированные погрешности входных данных и погрешности, возникшие при самой обработке.

4.5.2. Способы борьбы с погрешностями

В предыдущем подразделе основной акцент делался на происхождении различных составляющих погрешности. Способы борьбы с ними упоминались как бы вскользь. Теперь предлагается сосредоточить внимание именно на этих способах, добавив к тому, что было выше сказано о них, ряд сведений, обычных для учебников метрологии. Конечно, описать все без исключения способы невозможно.

Перечислим по отдельности общие способы борьбы, способы борьбы с систематическими погрешностями и способы борьбы со случайными погрешностями.

Общие способы борьбы с погрешностями в основном заключаются в блокировке путей воздействия факторов, которые могут вызвать систематические или случайные погрешности.

Если на результат измерения может повлиять нестабильность температуры, чувствительные к ней узлы термостатируют. Этого усложнения аппаратуры стараются избегать, но хочется вспомнить, что все теплокровные животные являются “ходячими термостатами”, а природа мало что делает напрасно.

Если электрическое измерительное устройство (или его часть) чувствительно к нестабильности напряжения питания, это напряжение стабилизируют.

В некоторых случаях опасным оказывается воздействие магнитного поля Земли, и приходится прибегать к его компенсации с помощью специальных катушек, например, колец Гельмгольца.

От воздействия электрических полей защищаются экранированием. Если источник сигнала удалён от входа измерительного канала, экран подводящих проводов соединяют с шиной заземления (или с общей шиной, на техническом жаргоне тоже называемой “землёй”) *только в одной точке*, чтобы по экрану не протекал ток.

При сильном сигнале можно использовать общую шину как обратный сигнальный провод, но в общей шине протекают и другие токи, создающие помехи. Поэтому, если сигнал слабый, обратный провод прокладывается отдельно от общей шины. При этом вход канала называется дифференциальным (differential) в отличие от “однопроводного” – single ended.

Но слабый сигнал (единицы милливольт или доли милливольт) лучше вообще не передавать на расстояние даже порядка одного – двух метров, если можно усилить его непосредственно вблизи источника с помощью выносного *предусилителя*.

Следует избегать образования контуров, воспринимающих электромагнитные помехи. На рис. 4.7 такой контур, пронизываемый магнитным полем, был изображён для наглядности, а правильнее было бы провода от контактов провести до сближения между собой как можно ближе к коже (а после сближения они скручиваются).

Как уже говорилось, от продольных помех, в частности, разностей потенциалов между источником сигнала и измерительным каналом, хорошо защищает гальваническое разделение, – например, “плавающий вход” первого узла канала. Иногда средствами электроники выравнивают эти потенциалы. Гальваническое разделение полезно также в цепях связи измерительной аппаратуры с регистраторами или компьютерами. Если источник сигнала должен иметь электрический контакт с пациентом, предъявляются особо серьёзные требования к надёжности гальванического разделения с точки зрения безопасности пациента. Здесь нужно обращаться к соответствующим стандартам.

От механической помехи, проявляющейся в виде вибрации лабораторных столов (например, от транспорта, проезжающего по улице), защищаются, в частности, с помощью виброизоляции.

Переходя к *способам борьбы с систематическими погрешностями*, начнём с того, что выявление их источников есть своего рода искусство, так как по виду получаемых данных невозможно установить присутствия этих погрешностей.

Можно выделить три группы этих способов (рис. 4.11).

Расчётная коррекция возможна, когда имеется информация о механизме воздействия влияющих факторов на результат измерения, а также о параметрах самих этих влияющих факторов. Информация о

факторах может быть априорной (как сведения о токе потребления вольтметра в примере на странице 76), или полученной с помощью вспомогательных измерений (если выполняется, например, температурная коррекция).

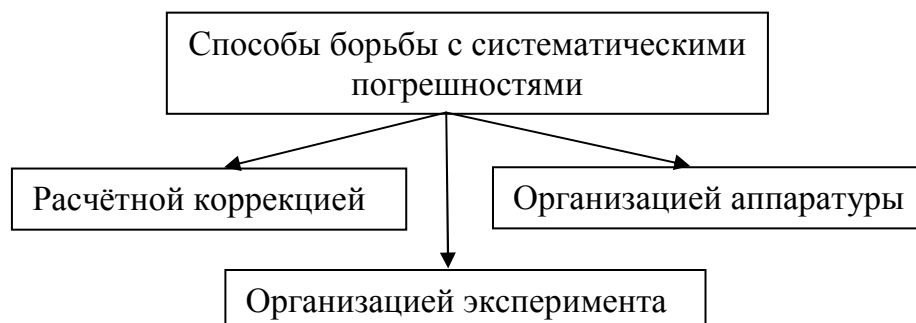


Рис. 4.11

В учебниках метрологии обычно описывается ряд методов *организации измерительного эксперимента*, позволяющих уменьшить определённые виды систематических погрешностей.

Метод замещения требует наличия регулируемой меры (или набора мер) и позволяет получить правильный результат при наличии у средства измерений систематических аддитивной, мультипликативной и даже нелинейной составляющих погрешности.

Пусть, например, имеются рычажные (коромысловые) весы с неизвестным неравенством длин плеч и неизвестным смещением положения равновесия. Положим взвешиваемое тело на одну из чашек, а на другую насыплем песок или дробь до достижения некоторого состояния, которое примем за равновесие.

Теперь снимем взвешиваемое тело и заместим его гирями так, чтобы весы пришли в то же состояние предполагаемого равновесия. Очевидно, масса гирь будет равна массе взвешиваемого тела независимо от неравенства плеч и смещения положения равновесия весов. Заметим, однако, что случайная погрешность взвешивания войдёт в результат дважды.

Метод замещения применим не только к взвешиванию. Пусть имеется омметр с неизвестными, но систематическими погрешностями. Присоединим к нему измеряемый резистор и запишем полученный отсчёт. Теперь заместим измеряемый резистор точным магазином сопротивлений и, изменяя его сопротивление, добьёмся того же отсчёта.

Правильный результат измерения прочитаем на магазине сопротивлений. Систематические погрешности омметра будут исключены.

Однако его случайная погрешность снова из-за двух измерений войдёт в результат дважды. Становится понятной рекомендация стандарта ГОСТ 8.009–84 о раздельном нормировании систематической и случайной составляющих погрешности. Можно сожалеть о том, что приборостроители эту рекомендацию игнорируют.

Метод противопоставления имеет более ограниченную область применения. Он ориентирован на приборы сравнения, в частности, на те же рычажные весы, и устраняет только мультипликативную погрешность. В случае весов она вызывается неравенством длин плеч коромысла: $l_1 \neq l_2$. Взвешивание выполняется дважды; при втором взвешивании измеряемое тело массой m_x и гири меняются местами.

Из уравнений равновесия

$$m_x \cdot l_1 = m_{01} \cdot l_2 ;$$

$$m_x \cdot l_2 = m_{02} \cdot l_1 ;$$

где m_{01} и m_{02} – массы гирь при первом и втором взвешивании, видно, что можно исключить длины плеч, перемножив левые и правые части уравнений:

$$m_x^2 = m_{01} \cdot m_{02}.$$

Метод калибровки применим, если средство измерений имеет систематические аддитивную и мультипликативную составляющие погрешности, но линейную характеристику и не слишком большие случайные погрешности. Он требует всего двух мер или даже одной, если есть возможность задать нулевой размер измеряемой величины.

С помощью мер по двум точкам находятся параметры реальной линейной характеристики средства измерений, и это позволяет расчётным путём корректировать отсчёт измеряемой величины. Расчёты становятся ненужными, если есть возможность *регулировать* сначала нуль, а затем (подсоединив меру) чувствительность, т. е. наклон характеристики средства измерений.

При выполнении серии измерений калибровка может производиться один раз в начале работы. Конечно, желательно проверить, сохранилась ли она по окончании серии измерений.

Если характеристика средства измерений нелинейна, то, вообще говоря, возможна калибровка с помощью большего числа мер.

Метод компенсации погрешности по знаку применяется для борьбы с аддитивными погрешностями, вызванными внешними факторами. Например, если есть подозрение, что на какой-то узел аппаратуры влияет земное магнитное поле, измерение выполняют дважды, повернув этот узел на 180° перед вторым измерением.

Другой пример – переключение полярности малого измеряемого напряжения для устранения влияния термоэлектродвижущей силы в цепи. Об этом уже говорилось выше на странице 52.

Не всегда можно изменить знак помехи или полезного сигнала, но есть и другие возможности. Когда Гельмгольц впервые измерял время прохождения сигнала по нервному волокну, за начало измеряемого интервала принимался момент подачи электрического импульса на нерв, а за его конец – момент сокращения иннервированной мышцы. Основными причинами систематической погрешности были задержки в мышце и в устройстве обнаружения её сокращения. Гельмгольц исключил эти факторы, выполнив измерение дважды, с подачей импульса в разные точки нервного волокна. *Разность результатов* соответствовала времени прохождения нервного сигнала между этими точками.

Этот приём Гельмгольца очень отдалённо напоминает то, что впоследствии, в 1970-х годах, Э.М. Бромберг и К.Л. Куликовский называли тестовыми методами повышения точности измерений.

Близок к компенсации по знаку способ борьбы с погрешностью стрелочного прибора, проявляющейся в виде вариации показаний – гистерезиса, обусловленного трением в опорах. Для исключения вариации измерение выполняют дважды, так, чтобы при одном измерении стрелка подходила к установившемуся положению снизу, а при другом – сверху.

Обычно в учебниках рассматривают также *метод симметричных наблюдений*, который позволяет при наличии прогрессирующей погрешности привести ряд отсчётов к одному (среднему) моменту времени, но он редко бывает нужен.

А вот идея *рандомизации* – превращения систематической погрешности в случайную – применяется очень широко и в разных ситуациях. Приведём только один пример, относящийся, правда, уже не столько к организации эксперимента, сколько к организации аппаратуры.

Выше на странице 90 упоминался метод синхронного накопления для выделения в биологическом эксперименте слабого вызванного потенциала из многократно превышающей его случайной помехи. Поскольку для уверенного накопления нужно суммировать большое число откликов (например, 2000), желательно во избежание утомления пациента подавать стимул как можно чаще. Но тогда “хвост” предыдущего отклика накладывается на начало последующего отклика, искажая его форму.

Чтобы избежать систематического искажения, *интервалы между стимулами делают случайными*. Сдвиг между помехой от “хвоста” предыдущего отклика и началом последующего отклика тоже становится случайным, и эта помеха устраняется синхронным накоплением как случайная.

Заметим, что в этом случае нарушается сложившееся в радиотехнике представление о том, что синхронное накопление применимо для выделения *периодического* сигнала. Дело не в периодичности, а в *детерминированности* сигнала.

Вообще при борьбе с систематическими погрешностями путём *организации аппаратуры* применимы многие способы, найденные метрологами ранее как расчётные или требующие определённой организации эксперимента.

Так, на страницах 94–95 упоминалась расчётная коррекция погрешностей, вызванных влиянием внешних факторов, с использованием вспомогательных измерений. Часто требуется температурная коррекция. В измерительной аппаратуре прошлого её реализовали аналоговыми средствами, с помощью тех или иных термочувствительных элементов. В современных измерительных устройствах, содержащих микропроцессоры, расчётная коррекция выполняется в явном виде, с использованием вспомогательного канала измерения температуры.

Сейчас даже в отдельно взятой микросхеме, предназначенной для работы в измерительном канале, можно встретить и элементы канала вспомогательного измерения, и программы калибровки нуля и чувствительности (как самой микросхемы, так и предшествующих ей элементов канала), и периодическое переключение полярности сигнала с целью исключения дрейфа (выше это называлось компенсацией погрешности по знаку). В приборах широко применяется логометрический ре-

жим работы отдельных узлов, разделение стимула и отклика, частотная коррекция динамических погрешностей.

Всё это важно знать приборостроителю, но экспериментатор получает аппаратуру в готовом виде и может только радоваться её точности, имея лишь общее представление о том, какими средствами эта точность достигается.

Борьбу со случайными составляющими погрешности следует рассматривать отдельно для статического измерения (измерения постоянной величины) и динамического измерения, при котором измеряемая величина может быстро изменяться.

При статическом измерении, если позволяет время и “терпеливость” объекта, для уменьшения влияния случайных составляющих погрешности, а также и для оценки остаточной неопределённости результата, выполняют многократные измерения и производят статистическую обработку первичных данных. Этот раздел метрологии хорошо развит, математизирован, отражён в учебной литературе и обеспечен нормативными документами, к которым и отсылаем читателя. Напомним только два из них, на которые мы ссылались выше:

ГОСТ Р ИСО 5725.1–2002... ГОСТ Р ИСО 5725.6–2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений.

ГОСТ Р 8.736–2011. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения.

Если измеряемая величина изменяется во времени, статистическая обработка многократных измерений переходит в *нерекурсивную цифровую фильтрацию* [28]. Напомним, что нерекурсивным цифровым фильтром, или фильтром с конечной импульсной характеристикой – сокращённо КИХ-фильтром – называется фильтр, не использующий выходных данных предыдущих операций в составе своих входных данных.

Например, пусть после перехода в динамический режим продолжится вычисление среднего арифметического значения заданного числа отсчётов (чтобы не прореживать данные, можно делать это скользящим способом). Получится цифровой фильтр с прямоугольной импульсной (или весовой) функцией. Предложено большое число весовых функций

других форм, имеющих, в отличие от прямоугольной функции, плавные спады. Это улучшает частотную характеристику фильтра.

Ещё раз напомним о том, что любой фильтр, подавляя нежелательные составляющие сигнала (в частном случае, случайные погрешности, которые выглядят как высокочастотные составляющие сигнала) вместе с тем искажает полезные составляющие.

Не обязательно подавлять случайные погрешности путём вычисления *линейной комбинации отсчётов* (к чему сводится обычная цифровая фильтрация). Если при динамических измерениях возможны выбросы, вызванные сбоями аппаратуры, может быть полезной *медианная фильтрация*, при которой каждый следующий выходной отсчёт находится как медиана заданного числа предыдущих входных отсчётов. Если возможны пропуски данных, можно использовать интерполяцию по сохранившимся данным, и т. д. – современные вычислительные средства позволяют в реальном времени выполнять различную обработку первичных отсчётов.

Нужно помнить ещё и о том, что, если результаты обработки не должны *использоваться* в реальном времени, возможна обработка массива зарегистрированных данных. Фильтрация зарегистрированных данных (*апостериорная фильтрация*) даёт возможность обращаться как бы к будущим отсчётам и тем самым преодолевать некоторые ограничения, связанные с физической реализуемостью фильтров, работающих в реальном времени.

4.5.3. Анализ веществ и сигналов

Особым случаем селекции можно считать *анализ*, при котором объект (вещество или сигнал) рассматривается как некоторая смесь компонентов, подлежащих идентификации и/или выделению. О нём скажем только несколько слов.

Методы анализа *веществ* в химии и биологии выходят далеко за пределы задач нашего курса. Упомянем лишь один класс методов, не основанных на химических реакциях и не сводящихся к разделению компонентов – спектральный анализ. Анализ веществ по *спектрам излучения*, открытый в 1859 г. Бунзеном и Кирхгофом, широко применяется, например, в металловедении. Анализ по *спектрам поглощения* ис-

пользуется, например, для определения состава газов в экологических исследованиях.

Известен и ряд методов разделения компонентов смеси. Среди них особенно распространена реализуемая в различных вариантах *хроматография*, которую открыл в начале XX века русский учёный Михаил Семенович Цвет.

Анализ *сигналов* (ему посвящён раздел 7.8 пособия [1]) тоже может выполняться как с разделением компонентов, так и без их разделения. Пример разделения – спектральный анализ шума с помощью набора третьоктавных фильтров. На выходе каждого фильтра появляется часть сигнала, спектр которой лежит в полосе его пропускания. В данном случае разделение является заведомо нечётким – соседние выделяемые компоненты перекрываются.

Другой пример разделения компонентов – анализ энцефалограммы человека с помощью выделения в ней ряда ритмов, различающихся по частотному диапазону. Принято обозначать эти ритмы греческими буквами δ , θ , α , β . Распределение мощностей различных ритмов по поверхности черепа даёт наглядное общее представление о состоянии мозга.

Но бывает достаточно только указать на наличие и интенсивность компонентов сигнала, не выделяя сами эти компоненты. Так, сейчас гармонический анализ сигналов с помощью резонаторов, прекрасно описанный упомянутым нами выше А.А. Харкевичем в его классической книге *Спектры и анализ*, вытесняется преобразованием Фурье, выполняемым над массивом цифровых отсчётов сигнала. Обычно при этом применяется алгоритм быстрого преобразования Фурье – БПФ. Результатом преобразования является массив отсчётов спектра.

Отметим в связи с этим общую тенденцию в технике обработки сигналов: замену физических операций, выполняемых над сигналом, вычислительными операциями, выполняемыми над его цифровыми отсчётами. Такая замена имеет и достоинства, и недостатки, которые, по-видимому, ещё недостаточно исследованы в общем виде.

Наряду с разложением сигнала по *гармоническим* базовым функциям (его глубокая физическая основа раскрыта, в частности, А.А. Харкевичем), сейчас известны другие виды разложения. Особое место среди них занимает вейвлет-анализ (от английского wavelet – ма-

ленькая волна), отличающийся использованием базовых функций, определяемых на конечных интервалах времени. Результат вейвлет-анализа в какой-то степени отражает одновременно и частотную, и временную структуру сигнала.

Какие разделы теорий анализа веществ и сигналов следует отнести к измерительной науке – сейчас трудно сказать.

5. Сравнение при измерении

5.1. Элементарное сравнение

Несмотря на огромную принципиальную важность сравнения в теории измерений, общей теории сравнения, по-видимому, не создано. Почему?

Вероятной причиной является “величиноцентричность” классической метрологии, которую мы выше не называли в явном виде, но фактически неоднократно упоминали. Во многих работах можно прочитать, что сравнение заключается просто в вычитании величин, – а если так, то какая ещё нужна теория?

При “объектном” подходе, который мы старались проводить выше, нежелательно говорить, например, о “суммировании величин” – правильным выражением должно быть *объединение объектов, при котором значения величин суммируются*. Правда, поскольку такие выражения громоздки, практически удобно говорить неправильно, но эту

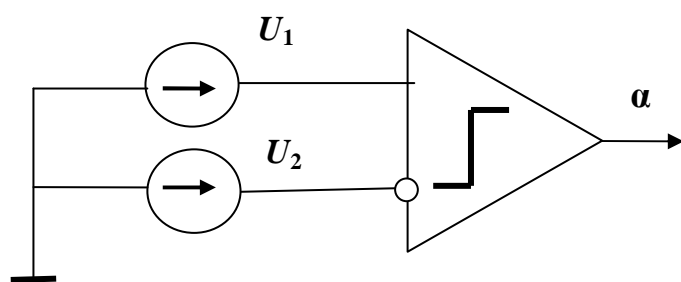


Рис. 5.1

неправильность следует постоянно осознавать и хотя бы изредка оговаривать!

То же самое и с “вычитанием величин” – фактически операция выполняется над *объектами*.

Один из наглядных примеров – электронное сравнивающее устройство, сейчас переименованное в *компаратор* (рис. 5.1).

Компаратор формирует выходной сигнал α , *интерпретируемый* как логический нуль (обычно при выходном напряжении, близком к нулю) или логическая единица (при выходном напряжении, превы-

шающем определённый уровень), в зависимости от “знака разности напряжений”: $U_1 - U_2$. Но эта разность получается потому, что *объекты*, – источники напряжений, – включены в контуре встречно.

Точно так же обстоит дело при “сравнении длин” (строгое выражение – сравнение двух стержней в отношении длины). Мы совмещаем между собой, скажем, левые концы стержней так же, как на рис. 5.1 совмещены левые выводы источников, и смотрим, как расходятся в пространстве их правые концы.

Но сравнение такого рода возможно, когда атрибут, характеризующий объект, имеет *естественный нуль*. А что, если он измеряется не в шкале отношений, а в шкале интервалов (тогда его не называют величиной)?

Выше, на странице 25, в качестве примера шкалы интервалов приводилась шкала времени, точки которой называются *моментами времени*. Но в шкалах интервалов измеряются также атрибуты, описывающие положение тел в пространстве. Точки этих шкал характеризуются линейными или угловыми *координатами*.

В классической метрологии давно замечено, что, наряду с *методом уравнивания*, когда выявляется и сводится к нулю “разность величин”, возможен *метод совпадения*. Он-то как раз и применим к атрибутам, измеряемым в шкалах интервалов.

Простейший пример – использование нониуса в штангенциркуле: при этом выявляется совпадение (вернее, зрительное соприкосновение) двух штрихов, т. е. “физическое равенство” их координат. А как происходит *датирование* какого-либо события, например, начала аварии в технической системе? По совпадению этого события с одним из событий, образующих шкалу времени.

Для того чтобы понятие сравнения было применимо как к уравниванию, так и к совпадению, предлагается определить *элементарное сравнение* как *выявление любого бинарного отношения между объектами*. При использовании штангенциркуля отношение близости в пространстве (формально это *толерантность*, т. е. рефлексивное, симметричное, но не транзитивное бинарное отношение) выявляется визуально; в технических системах то или иное отношение должно выявляться устройством, формирующим *характеристический знак отношения* (термин не общепринят!).

Такого рода знаком является выходной сигнал компаратора по рисунку 5.1. Для определённости будем считать, что внутри компаратора имеется стробируемый триггер с двумя устойчивыми состояниями (это часто бывает в действительности), так что выходные сигналы, промежуточные между нулём и единицей, никогда не формируются, и вместе с тем отсутствует гистерезис.

Выявляемое компаратором бинарное отношение похоже на строгий порядок с небольшим отличием: строгий порядок антирефлексивен, асимметричен и транзитивен, а в случае компаратора имеет место *неопределённая рефлексивность*: при подаче на оба входа сигнала от одного и того же источника на выходе может быть как ноль, так и единица (компаратор предполагается идеальным, не имеющим дрейфа).

Во времени единственным отношением, поддающимся непосредственному выявлению, является *одновременность событий*; выявление отношения *порядка* во времени (раньше↔позже) требует дополнительного привлечения операции *запоминания*: событие *a* происходит раньше, чем *b*, если *b* одновременно с памятью об *a*.

Техническое средство, формирующее характеристический знак отношения одновременности событий, представленных электрическими импульсами – это элемент И (раньше его называли “схемой совпадения” – это дальше от логики и ближе к физике).

В пространственной области твёрдые тела буквально совпадать не могут, и выявляется их прикосновение или близость. Например, на ранних этапах развития цифровой измерительной техники применялись преобразователи угол→код с кодированными дисками, размеченными на проводящие и непроводящие участки; на неподвижных упругих щётках, касавшихся диска, напряжение появлялось при их прикосновении к проводящему участку.

В преобразователях более высокого качества диски имеют прозрачные и непрозрачные участки, а их восприятие осуществляется оптическими средствами.

Исчерпываются ли принципы сравнения “вычитанием величин” и совпадением? Оказывается, нет: для сравнения могут использоваться скачкообразные *переходы количества в качество* (реализуемые в природе, а не в философских рассуждениях!).

Два таких примера уже встречались в этом издании. В начале раздела 3.3, на страницах 51 и 53, говорилось об определении предела прочности материала. В данном случае сравниваются реальное механическое напряжение, развиваемое в образце испытательной установкой, и внутреннее свойство материала – напряжение, вызывающее разрыв образца. Сам этот разрыв является характеристическим знаком отношения.

На тех же страницах 51 и 53 приводился и другой аналогичный пример: сравнение интенсивности реального звукового стимула с внутренним свойством слуховой системы человека – способностью слышать звуки, превышающие некоторый уровень громкости.

Заметим, что в обоих последних примерах сравнение происходит *внутри объекта*.

Более сложный случай объективного сравнения внутри человеческого организма имеет место при измерении артериального давления классическим методом Короткова. Систолическое и диастолическое давления в артерии сравниваются с давлением в надувной манжете; характеристическими знаками двух выявляемых отношений являются появление и исчезновение тонов Короткова при постепенном снижении давления.

Переходы количества в качество, используемые для сравнения, могут быть нечёткими и их может быть много. В таких случаях более уместно говорить не столько о сравнении по принципу *перехода количества в качество*, сколько о сравнении по более общему принципу *воздействия – реакции*.

На многих переходах (или, лучше, реакциях) основаны двенадцатибалльные шкалы силы ветра и силы землетрясений.

Приведём в качестве примера описание некоторых реакций на воздействие ветра, по которым на суше определяется сила ветра по двенадцатибалльной шкале Бофорта:

0 – Штиль. Дым поднимается вертикально.

1 – Тихий. Направление ветра заметно по отношению дыма.

2 – Лёгкий. Движение ветра ощущается лицом, шелестят листья, приводится в движение флюгер.

3 – Слабый. Листья и тонкие ветви деревьев всё время колыхаются, ветер развеивает верхние флаги.

4 – Умеренный. Ветер поднимает пыль и бумажки, приводит в движение тонкие ветви деревьев.

И т. д

Примером технического применения принципа воздействия – реакции может быть измерение частоты звуковых или электрических колебаний с помощью перестраиваемого резонатора или набора резонаторов, настроенных на различные частоты. Совпадение измеряемой частоты сигнала с собственной частотой резонатора выявляется по резкому росту реакции резонатора – амплитуды его колебаний.

Возможно, самостоятельным принципом сравнения является *неразличимость*: выше, на странице 18, упоминалось сравнение освещённостей по неразличимости, о котором писал Гельмгольц в фундаментальной статье [13].

Из всего сказанного видно, что элементарное сравнение является нетривиальной операцией, и, вероятно, есть смысл подумать о том, как объединить приведённые выше примеры некоторой общей теорией.

Кроме самих принципов сравнения, интересно было бы формулировать в общем виде вопрос о составляющих погрешности измерений, вносимых сравнением. Сейчас они анализируются для каждой технической реализации отдельно. Например, компаратор характеризуется дрейфом, входными токами, временем реакции, а при отсутствии стробируемого триггера ещё и областью неопределённости (или гистерезисом при добавлении цепи положительной обратной связи).

В заключение здесь следовало бы, в дополнение к элементарному сравнению, сказать хоть что-то о *сравнении по комплексу признаков*, которое выполняется при *распознавании* слуховых, зрительных и других образов. В этой области за последнее время достигнуты невероятные успехи, построены новые модели, на основе которых производится сравнение.

Но эта тема далеко выходит за рамки измерений, а автор настоящего издания не обладает достаточными знаниями в области распознавания и не берётся рассуждать о нём.

5.2. “Пропорционирующее” сравнение

Напомним, что термин, вынесенный в заголовок, принадлежит богослову и философу XV века Николаю Кузанскому, который высказал немало опередивших своё время мыслей в области теории познания. Метрологи не употребляют этот термин, не обращая внимания на то, что *элементарного* сравнения далеко не достаточно для измерения, – см. выше страницу 27.

Сейчас появляется всё больше оснований для того, чтобы понимать измерение как *нахождение места объекта на некоторой шкале*. Из этого, казалось бы, следует, что всякое измерительное устройство должно содержать набор реперов, с которыми сравнивается исследуемый объект. Но это уже цифровая техника, а ведь долгое время в измерительной технике господствовали аналоговые, чаще всего стрелочные приборы, да и сейчас они широко применяются. В этих приборах нет ничего похожего на набор реперов.

Как же в стрелочных приборах реализуется пропорционирующее сравнение? Обратимся для начала к официальному определению измерения по рекомендациям [3]:

“Измерение (величины): Процесс экспериментального получения одного или более значений величины, которые могут быть обоснованно приписаны величине”.

Это нам ничего не даёт, даже с учётом примечания:

“Измерение подразумевает сравнение величин или включает счет объектов”.

Какие величины сравниваются и как это происходит, какие объекты подвергаются счёту (*вместо* сравнения?) и как при этом получается значение величины? Всё это остаётся неясным.

В ранее действовавших рекомендациях РМГ 29–99 измерение определялось содержательнее:

“Совокупность операций по применению технического средства, хранящего единицу физической величины, обеспечивающих нахождение соотношения (в явном или неявном виде) измеряемой величины с ее единицей и получение значения этой величины”.

Но каким образом, например, стрелочный миллиамперметр может *хранить ампер*, и как можно найти “соотношение измеряемой величины с её единицей”? Снова загадка за загадкой.

А что происходит на самом деле? В одном из вариантов, который мы рассмотрим в качестве примера, при изготовлении стрелочного миллиамперметра или при его очередной поверке на него от калибратора последовательно подают токи заданной силы, соответствующие оцифрованным отметкам его шкалы (здесь термин *шкала* означает часть отсчётного устройства, – пластину с делениями).

Прибор регулируют (или непосредственно градуируют) так, чтобы отклонения от правильных показаний были в пределах установленных допусков.

Что же передаётся прибору? На него действует ряд реализаций измеряемой величины, имеющих такие *размеры*, что стрелка прибора устанавливается на заданные отметки, но одновременно учитываются и *значения* реализаций величины, соответствующие этим отметкам. Коротче говоря, прибору передаётся *участок шкалы измеряемой величины* (теперь термин *шкала* имеет смысл, придаваемый ему в репрезентационной теории).

Этот переданный прибору участок шкалы (а не единицу величины!!!) он и должен хранить. В каком виде хранить? В виде *способности* реагировать заданным образом на различные измеряемые токи.

В рассмотренном примере (а мы им ограничимся) необходимое для измерения пропорционирование выполняется заранее, оно обеспечивается устройством калибратора. Сравнение оказывается *разновременным*: от передачи прибору участка шкалы до применения прибора для измерения может пройти значительное время.

Более разнообразными способами выполняется пропорционирующее сравнение в цифровой измерительной технике. Этому вопроса стóит коснуться хотя бы для того, чтобы продемонстрировать типичную методологическую ошибку первых теоретиков этой области измерений, работы которых относятся к 1960-м годам и к началу 1970-х годов.

Эти теоретики исходили именно из того, что для получения цифрового отсчёта, скажем, электрического напряжения, необходимо его сравнение с *образцовым напряжением*. Термин *пропорционирующее*

сравнение, конечно, не использовался (инженеры не читали трудов Николая Кузанского!), но необходимость пропорционирования подразумевалась. И, казалось бы, были выявлены *все возможные* способы пропорционирования:

- деление образцового напряжения на равные доли резистивным делителем (т. е. одновременное формирование ряда точек материальной кодированной шкалы напряжений),
- последовательное формирование необходимых точек шкалы цифроаналоговым преобразователем,
- умножение измеряемого напряжения на заданные коэффициенты,
- операции с разностями преобразованных измеряемого и образцового напряжений.

Что же ещё можно было придумать? Классификация была исчерпывающей. А впоследствии оказалось, что возможен ещё целый ряд методов аналого-цифрового преобразования, основанных на сравнении *интегралов* измеряемого и опорного напряжений при использовании временной шкалы как *посредника* при пропорционировании.

В чём состояла методологическая ошибка? В абсолютизации казавшегося очевидным принципа *сравнения напряжений*, которая ограничила кругозор теоретиков. Этому ограничению кругозора помогла классификация, по-своему действительно бывшая исчерпывающей.

Поясним мысль о шкале-посреднике примером взвешивания на рычажных весах. Если весы равноплечие, то момент, создаваемый взвешиваемым телом, уравнивается моментом, создаваемым гирями, положенными на противоположную чашку. Пропорционирование осуществляется благодаря тому, что каждая гиря содержит заданное число единиц массы. Набор гирь – это аналог цифроаналогового преобразователя.

Но существуют также безмены, в которых используется единственная гиря m_0 , а пропорционирование осуществляется её перемещением по шкале длины l_x , нанесённой на плече коромысла. Если представить себе эту шкалу длины продолженной на l_0 до точки подвеса взвешиваемого тела m_x , то будет ясно, что равномерная деформация коромысла (скажем, от изменения температуры) не повлияет на результат измерения.

Равенство моментов (без учёта дискретности шкалы):

$$m_x \cdot l_0 = m_0 \cdot l_x;$$

$$\text{отсюда } l_x/l_0 = m_x/m_0$$

Равномерная деформация шкалы сохраняет неизменной отношение l_x/l_0 и не влияет на результат. Это безразличие к равномерной деформации и есть основное свойство шкалы-посредника.

По принципу безмена работают механические медицинские весы; то, что в них используются две гири, перемещаемые по размеченным рычагам, не меняет сути дела.

Электрическим аналогом безмена является АЦП двухтактного интегрирования (это тот усредняющий АЦП, о котором говорилось выше на странице 48).

В первом такте измеряемое напряжение U_x интегрируется за время $N_0 \cdot \Delta t$, где N_0 – заданное число (например, 10000), а Δt – интервал используемой временной шкалы (период сигнала тактового генератора). Во втором такте опорное напряжение противоположной полярности U_{REF} (индекс – общепринятый, от английского reference) интегрируется за такое время $N_x \cdot \Delta t$, что интегратор возвращается в исходное состояние. Момент возвращения обнаруживается компаратором, выполняющим, таким образом, элементарное *сравнение интегралов*.

Равенство интегралов (без учёта дискретности шкалы)

$$U_x \cdot N_0 \cdot \Delta t = U_{\text{REF}} \cdot N_x \cdot \Delta t;$$

$$\text{отсюда } N_x/N_0 = U_x/U_{\text{REF}}, \text{ независимо от } \Delta t.$$

Временные шкалы-посредники более сложным образом (не будем углубляться в детали) используются также в популярных сейчас АЦП с так называемыми $\Sigma\Delta$ -модуляторами.

Отметим, что во многих случаях цифровому средству измерения достаточно передать единственный репер. Необходимые шкалы такое средство строит самостоятельно.

Итак, материальные кодированные шкалы в цифровой измерительной технике могут непосредственно использоваться для сравнения с измеряемой величиной (как в АЦП с резистивными делителями и с цифроаналоговыми преобразователями), а могут и играть роль посредника для пропорционирования. Но есть и другие возможности их использования. Материальная кодированная шкала может формироваться из самого объекта. Например, интегрирующий преобразователь

напряжение→частота [25] формирует последовательность импульсов, каждый из которых соответствует определённому *приращению интеграла* входного напряжения (сравнение происходит внутри преобразователя). Это – импульсная шкала интегралов напряжения. Частота импульсов пропорциональна напряжению.

В современных электронных счётчиках электроэнергии довольно сложным способом формируется импульсная шкала интегралов мощности. Импульсы этой шкалы подаются на счётный механизм, и он показывает затраченную энергию.

Можно было бы приводить ещё примеры использования материальных кодированных шкал в цифровой измерительной технике, но, наверное, у читателя уже сложилось впечатление, что эта область измерений – настоящий заповедник шкал.

А если оставить легкомысленный тон, то можно вспомнить: в самом начале, говоря об описании объекта при измерении, мы были вынуждены обратиться к понятию шкалы и отметить существование развитой репрезентационной теории. Теперь мы рассматриваем, по сути дела, сердцевину механизма измерения и снова приходится говорить о шкалах. Видно, что теория аналого-цифрового преобразования должна стать одной из центральных областей измерительной науки. Эта теория в наибольшей степени связывает измерительную науку с философской теорией познания.

Заключение

Каждая серьёзная учебная дисциплина, кроме своего фактического материала, должна передать обучающемуся своеобразный, свойственный только ей, *способ мышления*, – определённую составляющую научной культуры. Не является исключением и метрология.

Что можно сказать о метрологической культуре?

Наверное, нужно начать с того, что такое культура вообще. Имеется большое число дефиниций, из которых можно вывести только то, что культура – явление сложное и многогранное. Одна из наиболее существенных её черт – это *уважение к труду*, как своему собственному, так и других людей, в том числе принадлежавших к ушедшим поколениям.

Например, такая составляющая культуры как культура общения и, в частности, культура речи, предполагает уважение говорящего к усилиям слушателя правильно понять сообщение. Если в пользующейся широкой известностью газете редакция крупным шрифтом помещает на первой полосе заголовок: **ЕДУ В МУСОР**, – значит, эта редакция не подумала о возможной первой реакции читателя: “Зачем ты туда едешь?”. С трудом можно догадаться, что речь идёт не о поездке, а о выбрасываемых в мусор продуктах питания.

Одна из сторон метрологической культуры, которой должны обладать все люди, независимо от профессий, – это культура выражений, связанных с измерениями. Самым её минимумом является навык правильного именованя величин и их единиц.

Язык величин в своей общей части и в “диалектах” отдельных областей человеческой деятельности создан (и продолжает создаваться) многолетним трудом ряда поколений учёных. Метрологи своими работами старались (и стараются) обеспечить системность этой части языка и по возможности хранят его чистоту.

В настоящем издании не воспроизведены стандартные разделы учебников метрологии, относящиеся к величинам и их единицам. Читатель может найти этот материал хотя бы в пособии [1]; нетрудно также ознакомиться с содержанием стандарта *ГОСТ 8.417–2002. ГСИ. Единицы величин* (мы не зря упоминали его уже на странице 6). Но основные навыки именованя величин и единиц должны быть приобретены нормальным человеком ещё в средней школе.

Наиболее часто встречающаяся ошибка, относящаяся к величинам, – это игнорирование различия между мощностью и энергией. Когда домохозяйка сообщает оператору Петрозэлектросбыта, “сколько киловатт нагорело”, ей можно простить непонимание того, что “нагореть” могут не киловатты (это мощность, т. е. *скорость* потребления энергии), а только киловатт-часы. Но совсем не хочется прощать редакторов газет, которые сплошь и рядом выражают энергию в диковинных единицах кВт/час (это, получается, уже ускорение потребления!?).

А вот газета “Политехник” от 23 июня 2011 г. сообщает о работах академика Ф.Г. Рутберга: “Академик привёл такие данные: 1 кг переработанных древесных отходов даёт 4 кВт энергии”. Четыре киловатта энергии! Но ведь в киловаттах измеряется не энергия, а мощность.

Академик этого не знал? Или редакция его подправила? В любом случае приведённые в газете “данные” потеряли всякий смысл.

Иначе продемонстрировала метрологическую невежественность газета “Санкт-Петербургские ведомости” от 18 сентября 2017 г. В ней находим “...опоры линий электропередачи напряжением 6 – 10 кВт”. Уже и напряжение стали измерять в киловаттах!

Почему-то стало модным и часто встречается в печати и в речах политиков нелепое выражение “генерирующие мощности”. Мощность – это физическая величина, она не может ничего генерировать. Генерируют генераторы, установленные на электростанциях.

И, кстати, о генераторах. Довольно часто в печати появляются сообщения о вводе в эксплуатацию генераторов мощностью, например, 500 мВт. То есть авторы сообщения хотят сказать 500 МВт (мегаватт), а на письме получаются у них милливатты, *в миллиард раз меньше*.

Эти 500 мВт примерно соответствуют мощности, потребляемой человеческим мозгом. Даже чайника не вскипятить.

Впрочем, и в студенческих работах иногда попадаются единицы мГц (миллигерцы) вместо МГц (мегагерц). Отметим, что в последней фразе намеренно допущено нарушение стандарта: нельзя писать, как часто делают студенты, сокращённые названия единиц без числовых значений; правильно было бы, например, 10 МГц.

Все перечисленные ошибки, кроме, пожалуй, нарушения запрета, о котором говорилось в предыдущем абзаце, можно, как было уже сказано, объяснить плохим усвоением их “авторами” материала средней школы. Какие же более тонкие элементы метрологической культуры должны быть привиты будущим исследователям в вузе?

Наверное, прежде всего нужно выработать понимание того, что измерение – совсем не простая операция. Далеко не все даже выдающиеся учёные соглашались с этим. Вот что писал в книге [30], первое издание которой вышло в Петрограде в голодном 1923 году, наш гениальный Александр Александрович Фридман, впервые создавший теорию расширяющейся Вселенной:

“...В вопросе измерения, столь простом по существу, замечается значительная недоговорённость во многих курсах механики и физики, ставших классическими...”.

И он счёл необходимым предпослать своей работе [30], посвящённой принципу относительности, небольшой набросок теории измерений, близкий по духу к репрезентационной теории,

Однако “значительная недоговорённость” имеется и в этом наброске самого А.А. Фридмана! Так, возможность измерения он основывает на следующем предположении (курсив Фридмана):

“Положим, что для интенсивностей класса A мы, так или иначе, определим понятие о *трёх равноотстоящих интенсивностях*; при этом под тремя равноотстоящими интенсивностями будем подразумевать такие интенсивности A_1, A_2, A_3 , что A_1 настолько же меньше A_2 , насколько A_2 меньше A_3 ”.

Но ведь важно не “так или иначе определить *понятие*”, а указать способ нахождения или построения в *реальном мире* троек объектов, характеризующихся равноотстоящими атрибутами. Как, например, проверить, являются ли три жидкости, налитые в стоящие на столе сосуды, равноотстоящими по вязкости? Или ещё проще: как, не прибегая к взвешиванию, изготовить три гири, равноотстоящие по массе? Как вообще догадались сравнивать жидкости по вязкости, а твёрдые тела по массе? Ведь, хотя люди научились взвешиванию в глубочайшей древности, даже в физике Декарта не было понятия массы!

Ясно, что ни о какой “простоте измерения по существу” не может быть и речи.

Но не хочется соглашаться и с яростной аргументацией Анри Лебега, автора математической *теории меры*, который в своей книге [31] настаивал на том, что общая теория измерений невозможна. Ведь и “значительная недоговорённость во многих курсах механики и физики”, на которую обратил внимание А.А. Фридман, – отнюдь не случайный недосмотр!

Так какова же теория измерений – проста до очевидности или вообще невозможна, так что и изложить её в учебнике не удаётся? Ответ ясен: она проста на первый взгляд, но становится всё сложнее по мере углубления в неё. И, наверное, один из элементов метрологической культуры заключается в том, чтобы видеть те точки, в которых начинаются пути, ведущие вглубь теории. В настоящем издании сделана попытка указать некоторые такие точки.

Удалась ли она – об этом могут судить только читатели.

Но культура проявляется не только в прочной мировоззренческой основе, но и в повседневном поведении. И метрологическая культура исследователя должна проявляться главным образом в его повседневной научной работе.

Каким образом? Прежде всего чрезвычайно внимательным отношением к каждому шагу в своём исследовании – какие неопределённости или погрешности могут быть с ним связаны? Все принимаемые решения: выбор модели объекта, метода исследования, прибора, технологии выполняемых операций, способа обработки данных, – должны быть проверены на предмет возможных несовершенств. В настоящем издании опять-таки была сделана попытка при обсуждении каждого вопроса указать связанные с ним неопределённости и погрешности.

Наверное, полезно изучать опыт замечательных экспериментаторов прошлого. Приведём только один пример, обратившись к упомянутому выше на страницах 35 и 82 эксперименту Георга Ома. Установка Ома содержала некоторую постоянную часть (источник напряжения и измеритель тока), к которой с помощью чашечек с ртутью подключались проводники разной длины. Но если просто окунуть концы провода в ртуть, между какими точками отсчитывать его длину? Гениальный Ом покрыл участки провода на его концах изолирующим веществом и отшлифовал торцы провода. Теперь провод контактировал с ртутью только своими торцами, и его “рабочую длину” можно было точно измерить. Неопределённость была исключена. В эксперименте Ома было много и других подобных предосторожностей.

Далее, в ходе самого исследования желательно постоянно проверять себя, используя для этого любые возможности.

И, наконец, излагая результаты эксперимента в отчёте или научной статье, следует привести все данные, позволяющие читателю оценить правильность принятых автором решений, а само изложение многократно проверить на однозначность и удобство восприятия.

Например, в таблицах и на графиках нужно обязательно указывать единицы величин в наиболее удобном для читателя виде. Наверное, значение тока $8 \cdot 10^{-7}$ А воспринимается хуже, чем 0,8 мкА. А, скажем, массовую долю какого-либо загрязнения лучше выразить не как 0,003%, а как 30 ppm (parts per million – миллионные доли). При указа-

нии недостоверности результатов желательно, наряду с границами погрешности или неопределённостью, кратко описать способ вычисления этих параметров.

Конечно, вузовские преподаватели могут только направить будущего исследователя на верную дорогу. Всё дальнейшее зависит от добросовестности самого исследователя.

Литература

1. *Кнорринг В.Г., Марамзина М.Г.* Метрология, стандартизация, сертификация: Учеб. пособие. – СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2006. – 240 с.
2. *Кнорринг В.Г., Марамзина М.Г., Трофимова Н.Ю.* Функциональная структура эксперимента как основа его метрологического анализа: Лекция для студентов факультета Медицинской физики и биоинженерии. – СПб., 2009. – 52 с.
3. РМГ 29–2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. – М. : Стандартинформ, 2014. – 56 с
4. *Бургин М.С., Кузнецов В.И.* Задачи как компоненты проблемно-эвристической подсистемы научной теории // Научное знание: логика, понятия, структура / Отв. редакторы В.Н. Карпович, А.В. Бессонов. – Новосибирск : Наука, Сибирское отделение, 1987. – С. 52–83.
5. Электрические измерения. Средства и методы измерений (общий курс). / Под ред. Е.Г. Шрамкова. – М. : Высшая школа, 1972. – 520 с.
6. Электрические измерения неэлектрических величин. / А.М. Турчин, П.В. Новицкий, Е.С. Левшина и др. под ред. П.В. Новицкого. Изд. 5-е, переработанное и дополненное. – Л. : Энергия, 1975. – 576 с.
7. *Новицкий П.В., Зограф И.А.* Оценка погрешностей результатов измерений. – Изд. 2-е. – Л. : Энергоатомиздат, Лен. отделение, 1991. – 304 с.
8. *Маликов М.Ф.* Основы метрологии. Часть первая. Учение об измерении. М. : Комитет по делам мер и измерительных приборов при СМ СССР, 1949. – 480 с.
9. *Розенберг В.Я.* Радиотехнические методы измерения параметров процессов и систем. – М. : Изд-во стандартов, 1970. – 308 с.
10. *Гомоюнов К.К.* Совершенствование преподавания общенаучных и технических дисциплин: Методологические аспекты анализа и построения учебных текстов. Изд. 2-е, переработанное и дополненное. – СПб. : Изд-во С.-Петербургского университета, 1993. – 252 с.

11. РМГ 83–2007. Государственная система обеспечения единства измерений. Шкалы измерений. Термины и определения. – М., 2008. – 24 с.
12. Дойников А.С., Брянский Л.Н., Крупин Б.Н. Справочник по метрологии. – М. : ФГУП “Стандартинформ”, 2010. – 144 с.
13. *Helmholtz H. Zählen und Messen erkenntnistheoretisch betrachtet // Philosophische Aufsätze Eduard Zeller gewidmet. – Leipzig, 1887. – Ss. 11–52.*
14. *Кнорринг В.Г. Развитие репрезентационной теории измерений // Измерения. Контроль. Автоматизация: Научно-технический реферативный сборник. – 1980. – Вып. 11–12 (33–34). – С. 3–9.*
15. *Походун А.И., Матвеев М.С., Иванова А.Г. . Термометрия // Российская метрологическая энциклопедия. – СПб. : “Лики России”, 2001. – С. 426–434.*
16. *Кнорринг В.Г. Кодированная шкала как одно из основных понятий цифровой измерительной техники // Информационно-измерительная техника: Межвузовский сборник научных трудов. – Пенза, 1974. – Вып. 4. – С. 25–33.*
17. *Яновская С А. Преодолены ли в современной науке трудности, известные под названием “апорий Зенона”? // Яновская С.А. Методологические проблемы науки. – М. : Мысль, 1972. – С. 214–234.*
18. *Неуймин Я.Г. Модели в науке и технике. История, теория, практика. – Л. : Наука, 1984. –190 с.*
19. *Минский М. Фреймы для представления знаний. / Пер. с англ. О.Н. Гринбаума, под ред. Ф.М. Кулакова. – М. : Энергия, 1979. – 151 с.*
20. *Кнорринг В. Г. История и методология науки и техники. Информационная сфера человеческой деятельности в эпоху научной революции XVI – начала XVIII веков: Учеб. пособие. – СПб. : Изд-во Политехнического университета, 2015. – 412 с.*
21. *Мордасов М.М., Савенков А.П., Чечетов К.Е. Особенности применения термина “бесконтактный метод измерения” // Датчики и системы. – 2017. – № 4. – С. 47–52.*
22. *Алейников А.Ф., Гридчин В.А., Цапенко М.П. Датчики (перспективные направления развития): Учеб. пособие / Под ред. проф. М.П. Цапенко. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2001. – 176 с. [Есть более позднее издание]*
23. *Новицкий П.В., Зограф И.А., Лабунец В.С. Динамика погрешностей средств измерений. – Л. : Энергоатомиздат, Лен. отделение, 1990. – 192 с.*
24. *Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин (Измерительные преобразователи): Учеб. пособие для вузов. – Л. : Энергоатомиздат, Лен. отделение, 1983. – 320 с.*

25. *Гутников В.С.* Интегральная электроника в измерительных устройствах. Изд. 2-е, переработанное и дополненное. – Л. : Энергоатомиздат, Лен. отделение, 1988. – 302 с.

26. *Островский Л.А.* Основы общей теории электроизмерительных устройств. – М.-Л. : Энергия, 1965. – 531 с. [Есть второе, переработанное издание 1971 года]

27. *Кнорринг В.Г.* Философия и измерительная наука // Труды СПбГТУ. – 2008. – № 508. – С. 87–92.

28. *Гутников В. С.* Фильтрация измерительных сигналов. – Л. : Энергоатомиздат, Лен. отделение, 1990. – 192 с.

29. *Островерхов В.В.* Динамические погрешности аналого-цифровых преобразователей. – Л. : Энергия, 1975. – 176 с.

30. *Фридман А.А.* Мир как пространство и время. – Изд 2-е. – М. : Наука, 1965. – 112 с.

31. *Лебег А.* Об измерении величин. – М. : Учпедгиз, 1960. – 204 с.

Оглавление

Введение	3
1. Предмет курса	4
1.1. Метрология и наука об измерении	4
1.2. Измерение как система	7
2. Описание объекта как одна из сторон измерения	11
2.1. Структуры концептуальных моделей и параметризация ...	11
2.2. Шкалы и величины	16
2.3. Величины и параметры	22
2.4. Построение и хранение шкал	23
2.5. Представление результата измерения	29
2.6. Интерпретация результата	34
2.7. Замечания о состоянии измерительной науки	39
3. Взаимодействие с объектом при измерении	43
3.1. Рецепция	43
3.2. Локализация	46
3.3. Стимуляция объекта	51
3.4. Создание условий для объекта	55
4. Движение информации при измерении	57
4.1. Два потока информации при измерении	57
4.2. Измерительный канал	59
4.3. Передача информации при измерении	63
4.4. Преобразование информации при измерении	66
4.5. Селекция	72
4.5.1. Источники неопределённостей и погрешностей	73
4.5.2. Способы борьбы с погрешностями	93
4.5.3. Анализ веществ и сигналов	100
5. Сравнение при измерении	102
5.1. Элементарное сравнение	102
5.2. “Пропорционирующее” сравнение	106
Заключение	111
Литература	116

Кнорринг Вадим Глебович

МЕТРОЛОГИЯ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Учебное пособие

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
ОК 005-93, т. 2; 95 3005 – учебная литература

Подписано в печать 17.11.2017. Формат 60×84/16. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 7,5. Тираж 40 экз. Заказ 16080б.

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного автором,
в Издательско-полиграфическом центре Политехнического университета.
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

Тел.: (812) 552-77-17; 550-40-14.