

И.Н. Баринов, В.С. Волков

Датчики – это очень просто

## Введение

Путь, который пришлось пройти измерениям и измерительной технике, прежде чем более или менее надежно утвердились относящиеся к ним общепринятые определения и термины, был весьма длинным и тернистым. Многие отечественные ученые, с большинством которых, начиная с середины XX века, автор имел честь быть знакомым, сотрудничать и даже дружить, внесли неоценимый вклад в развитие метрологии и измерений. К их заслугам следует отнести создание и развитие теории измерений (проф. М. Ф. Маликов, акад. А. А. Харкевич, проф. Ф. Е. Темников, Р. Р. Харченко, В. Н. Милынтейн, П. В. Новицкий, Э. И. Цветков, В. Г. Кнорринг, Г. Н. Солопченко, к.т.н. В. Я. Розенберг и многие другие), формирование крупнейших научных школ в области приборостроения, к числу которых в первую очередь необходимо отнести коллективы ученых и инженеров, «выпестованных» кафедрами Ленинградского (проф. Е. Г. Шрамков) и Львовского (проф. К. Б. Карандеев) политехнических институтов.

Невозможно (да и не нужно!) в одной популярной книге (а именно такой является предлагаемая читателю брошюра) осветить все стороны многогранной научной и производственной деятельности измерителей и приборостроителей, десятилетиями накапливавших бесценный опыт создания оригинальных, все более совершенных образцов измерительной техники. Остановимся в этой книге лишь на таком важнейшем для измерений понятии, как **измерительное преобразование, и той роли, которую играют в этом процессе датчики (они же измерительные преобразователи!) физических величин.**

Итак, что же такое измерение и основные связанные с ним понятия и определения? Достаточно подробно с этим знакомит книжка [1], поэтому нам остается лишь напомнить кое-что читателю, проявившему интерес к метрологии и измерениям.

**Измерением** является, несомненно, познавательный процесс получения количественной информации об объекте, которым может служить предмет, физическая система, явление и т.д. Очевидно, что объект измерения должен обладать одним или совокупностью характеризующих его свойств, представляющих интерес для получателя именно количественной информации!

Одно из таких свойств объекта (в дальнейшем речь будет идти исключительно о физических объектах), общее в качественном отношении для многих физических объектов, но в количественном отношении индивидуальное для каждого из них, называется **физической величиной** (или просто величиной), а она же, но подлежащая измерению, измеряемая или измеренная в соответствии с поставленной задачей, именуется **измеряемой физической величиной** (или просто измеряемой величиной). Заметим, что понятие физической величины является одним из фундаментальных понятий измерений (и, конечно, метрологии как науки об измерениях).

Для количественного выражения каждой измеряемой величины служит соответствующая **единица измерения**, т.е. такая же физическая величина, но которой присвоено числовое значение, равное единице.

При этом для дальнейшего, изложения особенно важно отметить, что число подлежащих измерению механических, тепловых, оптических, акустических и пр. так называемых **неэлектрических величин**, интересующих науку и производство, уже в начале 60-х годов прошлого века во много раз превышало число всех возможных электрических и магнитных величин.

Измерения осуществляются специально предназначенными для этих целей техническими средствами, именуемыми **средствами измерительной техники**, причем основная «измерительная нагрузка» ложится **на средство измерений**, т.е. на техническое средство, предназначенное для измерений и

имеющее **нормируемые метрологические характеристики**, под которыми подразумеваются устанавливаемые нормативно-техническими документами свойства средства измерений, влияющие на получаемый результат и его достоверность. Эти же свойства, определяемые экспериментально, именуются **действительными метрологическими характеристиками**.

Чаще всего в повседневной практике нам приходится иметь дело с таким средством измерений, как **измерительный прибор**.

Любому читателю хорошо известны термометры, весы, амперметры, вольтметры, счетчики электрической энергии, часы и даже хронометры. Словом, существует огромное количество разнообразных приборов для измерений и электрических, и неэлектрических величин.

Теперь же, любезный мой читатель, задумаемся вот над чем: измерительный прибор тем или иным способом **воспринимает** (внимание: этот глагол нам очень важен!) измеряемую величину, а в результате мы получаем отображенное в доступной нам форме (отсчет по шкале; цифры на дисплее, диаграмма на ленте самопишущего прибора и пр.) значение измеряемой величины, поэтому возникает очевидный вопрос: что же происходит внутри этого средства измерений, благодаря чему из «замарашки» на входе прибора (извини меня, **входная измеряемая величина**, за такое сравнение...) возникает «красавица-царевна» на выходе, т.е. **выходная величина**? Очевидно, остается предположить, что имеют место одно или несколько «волшебных» преобразований. Верно! Только в нашем случае они не волшебные, а **измерительные преобразования**.

При этом очень важно отметить, что по мере нашего продвижения со входа на выход измерительного прибора преобразования одной физической величины в другую сопровождаются соответствующими преобразованиями энергии, определяющими принцип действия данного средства измерений. Однако энергетические преобразования - неизбежная дань, которую приходится платить за получение количественной информации об объекте

измерения. Поток энергии сквозь измерительный прибор - это лишь переносчик **измерительного сигнала**, содержащего количественную информацию об измеряемой физической величине. Очевидно, что при взаимодействии средства измерений с объектом измерений следует соблюдать принцип «не навреди чистоте эксперимента!» Это означает, что входная часть нашего измерительного прибора должна минимально воздействовать на измеряемый объект. В идеальном случае это означало бы отсутствие отбора энергии от объекта, но это физически нереализуемо. Поэтому надо стараться по возможности не вмешиваться входной частью средства измерений в «ауру» объекта измерения!

Таким образом, мы можем констатировать следующее: для получения количественной информации об объекте измерения нужно выбрать наиболее подходящую физическую величину, являющуюся интересующим нас свойством этого объекта, определиться с требуемым средством измерений и озаботиться хорошо продуманной «стыковкой» входной части прибора с объектом измерений с учетом вышеупомянутого принципа. При соблюдении этих условий мы приобретаем первоначальную уверенность в том, что физическая величина путем одного или нескольких измерительных преобразований с помощью передаваемого с входа на выход измерительного сигнала отобразится в виде результата измерений, именуемого **значением физической величины**.

Все относительно просто, пока измеряется одна величина, практически не меняющаяся в процессе измерения, да еще если необходима информация о свойстве объекта лишь в одной точке или в ее окрестности. А как быть, если нужно одновременно во многих разнесенных точках пространства измерять совокупность разных физических величин, причем непосредственный доступ к объекту измерения экспериментатору не разрешен (например, доменная печь или атомный реактор), да и сами физические величины достаточно быстро изменяются в ходе выполнения

эксперимента?

В этих случаях средствами измерений служат уже **измерительные системы** (а не приборы!), представляющие собой совокупности функционально объединенных средств измерений и других технических средств, размещенных в разных точках объекта измерения, а часто, кроме того, удаленных друг от друга на значительные расстояния, что приводит к необходимости использования каналов связи (или передачи информации) между ними.

Именно здесь уместно познакомиться с двумя понятиями, которые окажутся весьма полезными в дальнейшем:

- совокупность элементов средств измерений, образующих непрерывный путь прохождения измерительного сигнала одной физической величины от входа до выхода, называется **измерительной цепью**;
- измерительная цепь измерительной системы называется **измерительным каналом**.

Таким образом, коль скоро мы уяснили, что «по дороге» от объекта измерений как источника информации к экспериментатору как к пользователю этой информации выполняется ряд преобразований, формирующих процесс измерений, логично считать, что используемое средство измерений (или их совокупность) состоит из цепочки (измерительной цепи) **измерительных преобразователей**, один из которых, непосредственно связанный с объектом измерения, правомерно считать **первичным измерительным преобразователем**.

Мы не ошиблись, так оно и есть, а именно:

- техническое средство с нормированными метрологическими характеристиками (т.е. тоже являющееся одной из разновидностей средств измерений), служащее для преобразования измеряемой величины в другую величину или

измерительный сигнал, удобный для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации или передачи, именуется **измерительным преобразователем (ИП)**;

- измерительный преобразователь, на который непосредственно воздействует измеряемая физическая величина, т.е. первый преобразователь в измерительной цепи (канала) средства измерений, именуется **первичным измерительным преобразователем или просто первичным преобразователем (ПП)**.

В дальнейшем, когда мы будем более подробно знакомиться с ИП, нам встретятся различные физические эффекты и явления, поясняющие принципы действия, а также варианты их конструктивного исполнения. В частности, ПП могут быть встроены в измерительный прибор или измерительное устройство, а также конструктивно обособлены. В последнем случае такой ПП рекомендуется именовать **датчиком** (поскольку от него якобы поступают измерительные сигналы, т.е. он «дает» информацию).

Судьба этого термина достаточно «драматична». Мало того, что в целом ряде применений его именуют (равно, кстати, как и ПП!) то сенсором, то детектором, то просто чувствительным элементом. Главное - в течение десятилетий в отечественной нормативной метрологической терминологии существовало строжайшее «табу», мягко говоря, не рекомендовавшее этот термин к использованию при написании книг и статей. В последние годы запрет снят, термин «датчик» признан метрологически обоснованным, причем оговорено, что он может быть вынесен на значительное расстояние от средства измерений, принимающего его сигналы.

И еще немного о датчике в терминологическом плане. Во-первых, датчики получили широкое распространение не только в средствах

измерений, но и в устройствах управления, сигнализации, охраны, обнаружения различных объектов. Однако здесь мы рассматриваем лишь датчики как элементы измерительной техники, имеющие гарантированные, сохраняющиеся в течение определенного интервала времени метрологические характеристики. Во-вторых, еще раз обратим внимание на то, что датчик как первичный измерительный преобразователь не только «дает» информацию, но и (что, по мнению автора, еще важнее!) воспринимает измеряемую (входную) физическую величину от объекта измерения, играя при этом роль своеобразного «приемопередатчика». Следовательно, в датчике реализуются три процесса: восприятия входной физической величины, ее преобразования в промежуточную (или же сразу же в выходную) величину той же или иной физической природы, формирования измерительного сигнала, передаваемого вдоль измерительной цепи, сопрягаемой с датчиком.

Однако не стоит забывать, что измерительная цепь состоит и из ряда вторичных ИП, которые уже не являются датчиками, так как лишь передают друг другу измерительные сигналы, преобразуя их, но не соприкасаясь при этом непосредственно с объектом измерения. Тем не менее метрологические характеристики идентичны для первичных и вторичных ИП и их следует рассмотреть в первую очередь, что и будет нами выполнено в разд. 1.2.

(Прошу прощения, а золотник в эпиграфе? Нет, упоминание о нем не случайно, поскольку именно восприятие входной величины от объекта измерений часто является наиболее «деликатной» операцией при реализации измерительного процесса, требующей высочайшего искусства как при конструировании современного миниатюрного датчика с уникальными метрологическими характеристиками, так и при его стыковке с объектом измерения, обеспечивающей требуемую «неприкосновенность» последнего.)



## Глава I

### «ПОРТРЕТЫ» ДАТЧИКОВ И ИХ МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Представим себе, что нужно, имея альбом для систематизации сведений о датчиках, как-то разложить их «портреты», сгруппировав по определенным признакам. В мире фауны и флоры принято делить объекты по родам, видам, подвидам, классам и подклассам. А по каким признакам расклассифицировать датчики? Существует ли единообразная совокупность признаков, позволяющая составить такую классификационную таблицу? Оказывается, нет, хотя метрологические характеристики датчиков универсальны для всех их разновидностей, не зависят от конструкций и принципов действия и различаются только диапазонами и значениями. Поэтому сначала попробуем в разных ракурсах рассмотреть «классификационные портреты» (или, если угодно, разновидности) как датчиков, так и следующих за ними ИП, а затем ознакомимся с метрологическими характеристиками этих средств измерений (это не оговорка, датчик и любой следующий за ним в измерительной цепи или измерительном канале ИП является не только элементом средства измерений, но и сам по себе может служить самостоятельным средством измерений!). Речь будем вести вообще об измерительных преобразователях, поскольку любой датчик в измерительной цепи представляет собой лишь входной (очень и очень важный!) ИП.

#### 1.1 Классификация (разновидности) измерительных преобразователей

Первый ракурс, позволяющий нам взглянуть на множество разнообразных ИП, базируется на сопоставлении физических величин на входах и выходах преобразователей независимо от их принципов действия. (Последняя фраза в этом предложении особенно важна, поскольку, будь то первичный или вторичный ИП, часто в нем имеют место несколько промежуточных преобразований величин, но характеризуется он конечным результатом, т.е. связью между входной и выходной физической величиной.)

Таким образом, по видам входных и выходных величин ИП можно подразделить на преобразователи:

- электрических величин в электрические: например, непрерывных во времени или так называемых аналоговых электрических сигналов в прерывистые (дискретные или цифровые) электрические сигналы;
- неэлектрических величин в неэлектрические: например, диафрагма с точно известным по площади отверстием, «вырезающая» из падающего на нее светового потока строго определенную его часть;
- электрических величин в неэлектрические: например, когда необходимо получить нормированную оптическую величину в виде светового потока или освещенности, т.е. его части, приходящейся на единичную поверхность, на вход ИП подают заранее известную мощность постоянного электрического тока;
- неэлектрических величин в электрические; здесь мы не будем приводить примеров, поскольку почти вся остальная часть книги посвящена именно этим датчикам (или, если угодно, первичным ИП), поскольку творческие вообще и конструкторские в частности усилия многих поколений приборостроителей в XX веке были направлены на разработку и освоение производства преобразователей этого типа и становление целой отрасли измерительной техники - **электрических измерений неэлектрических величин.**

Второй ракурс позволяет нам обратить внимание на то, что ИП последней, четвертой, группы принято делить на **генераторные и параметрические преобразователи**. (Поскольку читатель уже вдоволь «насладился» вариациями на тему «датчик-измерительный преобразователь-первичный измерительный преобразователь», остановимся впредь лишь на первом из этих терминов; только в необходимых случаях мы будем пользоваться остальными.)

Отнесение датчика к одной из этих двух групп зависит от выходной электрической величины, в которую **в конечном счете** (напоминание о том, что в процессе преобразования входной неэлектрической величины в выходную электрическую могут наличествовать промежуточные преобразования различной физической природы!) преобразуется входная неэлектрическая величина. Если выходной является «активная» электрическая величина - напряжение, заряд, ток, электродвижущая сила (ЭДС), то мы имеем **генераторный датчик**. Если же выходной служит «пассивная» электрическая величина, чаще именуемая параметром, - сопротивление, индуктивность, взаимная индуктивность, емкость, диэлектрическая или магнитная проницаемость, то налицо **параметрический датчик**.

Мы упоминали только что о возможности ряда промежуточных преобразований величин «по трассе» от входной к выходной величине. Подобных датчиков немало, и некоторые авторы рекомендуют их называть **комбинированными датчиками**.

Есть еще один принципиальный классификационный признак, по которому датчики можно разделить на две группы: датчики, непосредственно соприкасающиеся с объектом измерения, будем именовать **контактными датчиками**; датчики, не соприкасающиеся с объектом измерения и, как говорят, дистанционно воспринимающие измеряемую величину, назовем **бесконтактными датчиками** (например, датчики,

воспринимающие поток светового или теплового излучения).

Введя это понятие, можно было бы обойтись и без третьего «классификационного ракурса». Однако в группе комбинированных датчиков особое место занимают **волоконно-оптические датчики (ВОД)**, воспринимающим (чувствительным) элементом которых, испытывающим воздействие входной величины, служит **оптическое волокно**. Первые попытки создания датчиков на основе оптических волокон можно отнести к середине 1970-х годов. Однако считается, что этот тип датчиков сформировался как одно из направлений техники только в начале 1980-х годов. Основанием для «рассмотрения в третьем ракурсе» служит небольшое нарушение стройности нашей классификации, поскольку здесь входной может быть как неэлектрическая, так и электрическая величина, а выходной - всегда электрическая. Кроме того, ряд существенных преимуществ ВОД, о которых мы поговорим подробнее в дальнейшем, предопределил формирование на их основе целой области измерительной техники с датчиками неэлектрических и электрических величин.

«Портретам» датчиков не хватает еще нескольких мазков и штрихов. Дело в том, что классифицированы датчики в неких «тепличных» условиях их функционирования, когда на датчик воздействует лишь входная (измеряемая) величина, «идеально» преобразуемая в выходную величину в полном соответствии со связывающей их функциональной зависимостью. Конечно, это соответствие выполняется не совсем строго «по вине» самого датчика, поскольку он «неидеален», т.е. по ряду конструктивных и технологических причин функциональная зависимость между входной и выходной величиной отклоняется от расчетной, именуемой одной из нормируемых метрологических характеристик датчика. Это порождает недостоверность результата преобразования, но об этом позже, когда будем говорить о погрешностях датчиков.

А пока рассмотрим ряд внешних факторов, именуемых **влияющими**

**величинами**, которые без принятия специальных защитных или охранных мер оказывают «вредное» влияние на результат преобразования и, как следствие, измерения.

Основными влияющими величинами являются:

- температура окружающей среды, изменяющая электрические и механические характеристики датчика, а также размеры составляющих его деталей;
- давление окружающей среды, а также ускорение и вибрации, изменяющие метрологические характеристики датчика и в первую очередь его чувствительность;
- влажность окружающей среды как один из основных возможных источников нарушения электрической изоляции между отдельными конструктивными элементами датчика (либо между датчиком и окружающей средой);
- внешнее постоянное или переменное магнитное поле, искажающее полезный сигнал;
- изменения амплитуды и частоты напряжения питания датчиков (если таковые нуждаются в питании от сторонних источников).

Полностью избежать последствий воздействия на датчик перечисленных влияющих величин невозможно, но существенно снизить степень причиняемого «метрологического ущерба» удастся как минимум тремя путями:

- снижением значений влияющих величин путем использования методов и средств защиты от них (применение антивибрационных оснований, магнитных экранов и пр.);
- стабилизацией влияющих величин (применение термостатов, стабилизаторов напряжения питания и пр.);
- компенсацией воздействия влияющих величин путем

использования методов и средств коррекции в последующих измерительных цепях.

## 1.2 Метрологические характеристики измерительных преобразователей

Во введении мы познакомились с понятием метрологической характеристики в общей трактовке этого термина. Однако любой датчик обладает целым рядом свойств, которые, во-первых, необходимо нормировать, а во-вторых, экспериментально определять, чтобы потребитель знал, с чем он имеет дело и в какую измерительную цепь допустимо включить интересующий его преобразователь.

Прежде всего, очевидно, необходимо иметь представление о диапазоне значений измеряемой величины, в пределах которого датчик способен преобразовать ее в измерительный сигнал при соблюдении функциональной зависимости между входной и выходной величиной. Разумеется, речь идет не о расчетной, («идеальной»), а о реальной функциональной зависимости, т.е. «отягощенной» присущей любому датчику неточностью ее воплощения, именуемой **погрешностью** (о ней речь впереди!). Ранее эту зависимость для ИП было принято называть **функцией преобразования**, поскольку она представляет собой описываемую аналитическим выражением или графиком функциональную зависимость выходной величины от входной. В современной отечественной терминологии в области метрологии и измерительной техники рекомендованы такие термины, как **«диапазон измерений средства измерений»** и **«градуировочная характеристика средства измерений»**.

Поскольку наш датчик (как, впрочем, и любой <sup>1</sup>ИП) является средством измерений, то у нас не остается выхода: мы должны привести здесь «расшифровку» обоих терминов.

Итак:

- область значений величины, в пределах которой нормированы допускаемые пределы погрешности средства измерений (в нашем случае - отступлений от «идеальной» функции преобразования датчика), называется **диапазоном измерений средства измерений** (конечно, логичнее было бы ввести термин «**диапазон преобразования входной величины**», но ничего не поделаешь, измерения вообще и метрология как наука об измерениях в особенности требуют неукоснительного соблюдения «терминологического этикета»!);
- полученная экспериментально зависимость между значениями величин на входе и выходе средства измерений, выраженная в виде формулы, графика или таблицы, называется **градуировочной характеристикой средства измерений** (это дает нам не только право, но и все основания расчетную зависимость именовать **функцией преобразования** датчика или ИП).

В дальнейшем мы будем использовать разрешенные нормативным документом сокращенные термины: **«диапазон измерений и градуировочная характеристика»**.

Чаще всего стремятся иметь линейную функцию преобразования, т.е. прямую пропорциональность между изменением входной величины и соответствующим приращением выходной величины датчика или ИП. Именно функцию преобразования, поскольку градуировочная характеристика, получаемая экспериментально, всегда будет несколько отличаться от идеальной линейной характеристики!

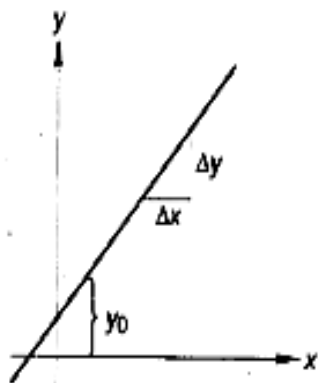


Рис. 1.1 Линейная функция преобразования

Для описания линейной функции преобразования  $y = f(x)$ ,

где  $x$  входная, а  $y$  - выходная величина, (см. рис. 1.1) достаточно двух так называемых параметров: начального значения  $y_0$  выходной величины, именуемого нулевым уровнем а также соответствующего нулевому (или какому-либо другому характерному) значению входной величины  $x$ , и показателя относительного наклона прямой  $s = \Delta y / \Delta x$ , называемого чувствительностью датчика или любого другого ИП.

(Здесь также уместно заметить, что применительно к ИП «благозвучнее» выглядит термин «коэффициент преобразования», который и поныне часто встречается в соответствующей научно-технической литературе. Однако будем придерживаться нового регламента и оперировать понятием чувствительности.)

Чувствительность преобразователя - это, как правило, именованная величина с разнообразными единицами, зависящими от природы входной и выходной величины.

Определившись с такими двумя важнейшими метрологическими характеристиками датчика, как градуировочная характеристика и чувствительность, приведем ряд существенных примечаний:

- на чувствительность датчика значительное влияние может оказывать температура окружающей среды; поэтому при определении



чувствительности датчиков следует указывать соответствующую ей температуру и коэффициент изменения чувствительности в зависимости от температуры;

- на чувствительность датчика значительное влияние может оказывать температура окружающей среды; поэтому при определении чувствительности датчиков следует указывать соответствующую ей температуру и коэффициент изменения чувствительности в зависимости от температуры;

- на чувствительность датчика ощутимо влияет характер изменения во времени входной величины (например, ее частота при периодическом входном воздействии); соответственно различают чувствительность при статическом и динамическом режимах работы датчика: первый из них соответствует постоянной или очень медленно меняющейся входной величине, а второй - быстро меняющейся;

- несмотря на отсутствие в нормативной современной метрологической терминологии понятия «коэффициент преобразования», этот термин имеет право на существование и представляет собой отношение не приращений величин, а их соответствующих друг другу значений; если функция преобразования линейна и проходит через начало координат (т.е.  $y_0 = 0$ ), то коэффициент преобразования и чувствительность датчика

- синонимы;

- характеристика датчика в виде наименьшего значения изменения физической величины, начиная с которого может осуществляться измерительное преобразование, называется порогом чувствительности датчика;

17

- отклонение от линейности градуировочной характеристики - это показатель, позволяющий оценить данную метрологическую характеристику; его определяют по максимальному отклонению

градуировочной характеристики от прямой линии, а отклонение выражают в процентах от максимального значения входной величины в заданном диапазоне преобразования.

При преобразованиях изменяющихся во времени входных величин одним из важнейших свойств датчика является его быстродействие (инерционность). Читателю понятно, что любой датчик обладает определенной инерционностью, которую необходимо учитывать при подаче на его вход переменного воздействия. Что же это означает физически? Всего лишь то, что в силу инерционности датчика процессу установления значения выходной величины, которое можно принять за окончательный результат преобразования, предшествует так называемый переходный (или неустановившийся) процесс изменения преобразуемой величины, длительность и характер протекания которого зависят исключительно от инерционных свойств датчика.

Если читателю пришлось в школе на уроках физики экспериментировать с гальванометром, то он, очевидно, помнит, что в малоинерционном приборе переходный процесс при подаче на вход скачкообразного воздействия протекает в затухающем периодическом режиме. Наоборот, при аналогичном воздействии на очень инерционный прибор (например, баллистический гальванометр) имеет место аperiodический режим очень медленного «подползания» стрелки к установившемуся показанию. Промежуточным между этими двумя режимами является так называемый критический режим - «пограничный» между периодическим и аperiodическим. Каждому из этих режимов свойственно свое **время установления**, которое и следует считать метрологической характеристикой быстродействия средства<sup>48</sup> измерений, в том числе датчика или ИП.

Теперь остается вспомнить, что мы имеем дело с **измерительным** преобразованием, т.е. нам не обойтись без такой важнейшей

метрологической характеристики, как **точность средства измерений**, отражающей близость его погрешности к нулю. (Считается, что чем меньше погрешность, тем точнее средство измерений.)

Не вызывает сомнений, что участвовавший в выполнении лабораторных работ по физике читатель имеет представление о погрешности измерений. Тем не менее поскольку речь идет о метрологических характеристиках датчика как средства измерений, нелишним будет уточнить некоторые понятия.

В повседневной жизни нам часто приходится слышать просьбы об «измерении с точностью до...», а иногда и того хлеще - вместо глагола «измерить» обычно слышишь: «померить», «замерить», «промерить» и пр.

Разделим эти два случая использования «метрологического жаргона» и начнем с глаголов, которые в метрологической терминологии считаются «ненормативными». Желательно, чтобы любезный читатель начисто забыл все перечисленные глаголы и их возможные модификации и пользовался единственным правильным термином - измерять!

Что касается терминов **«точность»** и **«погрешность»**, то следует подчеркнуть принципиальную разницу между ними: точность

- это характеристика качества средства измерений, т.е. она не имеет количественного выражения. Мы можем высказывать пожелания об измерении величины с большей или меньшей точностью, что аналогично сравнительным качественным (не количественным!) оценкам наших ощущений типа «выше-ниже», «ближе-дальше», «быстрее-медленнее» и т.д. В то же время **погрешность средства измерений - количественная оценка получаемого результата измерений**, представляющая собою разность между показанием средства измерений (в случае датчика или иного ИП - полученным значением выходной величины) и истинным (действительным) значением измеряемой физической величины.

Хотелось бы обойти вниманием вновь представляемые здесь два

термина, но нельзя, они играют принципиальную роль не только в практике, но и в теории измерений. Обратимся к официальному нормативно-терминологическому документу:

- значение физической величины, которое **идеальным** образом характеризует в качественном и количественном отношении соответствующую физическую величину, называется ее истинным значением; истинное значение физической величины может быть соотнесено с понятием абсолютной истины и получено только в результате бесконечного процесса измерений с бесконечным совершенствованием методов и средств измерений;
- значение физической величины, полученное экспериментальным путем и настолько близкое к истинному значению, что в поставленной измерительной задаче может быть использовано вместо него, называется ее действительным значением.

**Очевидно, что невозможно найти истинное значение измеряемой величины в условиях реального эксперимента.**

Поэтому довольствуются определением действительного значения  $x_d$ , а погрешность  $\Delta x_{\text{изм}}$  вычисляется по формуле

$$\Delta x_{\text{изм}} = x_{\text{изм}} - x_d,$$

где  $x_{\text{изм}}$  - измеренное значение величины.

(Понятно, что применительно к датчику и любому ИП  $x_{\text{изм}}$  - экспериментально найденное значение выходной величины преобразователя.)

О делении погрешностей на систематические и случайные и способах их вычисления мы здесь говорить не будем, полагая, что школьники с этим хорошо знакомы из курса физики.

Остается подвести краткий итог сказанному в этом параграфе, а именно:

- функция преобразования, градуировочная характеристика и

диапазон измерений (преобразования) указывают нам соответственно теоретический и экспериментальный характер взаимосвязи входной и выходной величин, а также те пределы, в которых датчик или любой ИП с допустимой погрешностью осуществляют преобразование входной величины, причем значения последней, ограничивающие диапазон измерений (преобразований) снизу и сверху, называют соответственно нижним и верхним пределами измерений (преобразования);

- функцию преобразования и градуировочную характеристику датчика (да и любого ИП) стараются иметь по возможности линейной;

- параметрами датчика являются чувствительность и коэффициент преобразования входной величины в выходную; чувствительность цепочки последовательно соединенных ИП с линейными градуировочными характеристиками равна произведению их чувствительностей;

- время установления, характеризующее скорость затухания переходного (неустановившегося) процесса в датчике, играет решающую роль при выборе последнего в качестве входного ИП при воздействии на средство измерений, работающее в динамическом режиме; иногда пользуются аналогичным термином - постоянной времени, также характеризующим инерционные свойства преобразователя;

## Глава 2

# ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВХОДНЫХ ВЕЛИЧИН В ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВЫХОДНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ

## 2.1. Типовые структурные схемы средств измерений и виды превращений сигналов

Почему мы приступаем к описанию не датчиков, т.е. первичных измерительных преобразователей в нашем толковании этого термина, а именно к типовым структурным схемам средств измерений и в первую очередь ИП электрических величин? Попытаемся обосновать логичность этого подхода к изложению дальнейшего материала.

Оказывается, подавляющее большинство **современных** средств измерений (дорогой читатель, прошу акцентировать внимание на слове «современных»!) стараются сделать либо автоматизированными с применением микропроцессоров или микроЭВМ (т.е. портативных средств вычислительной техники), либо, по крайней мере, с представлением результата измерений в виде именованных чисел (часто именуемых оцифрованными результатами измерений), отображаемых на экране дисплея. Это означает, что преобразованный из неэлектрической величины электрический сигнал измерительной информации, пройдя по измерительной цепи или измерительному каналу, претерпевает одно или несколько чисто электрических измерительных преобразований независимо от того, какого рода датчик включен на входе этого средства измерений (снова подчеркнем - **современного!**).

Все, о чем мы только что говорили, изобразим в виде так называемых структурных схем типичных средств измерений, рассматриваемых в настоящей книге (рис. 2.1). Как следует из этого рисунка, «хвостовая» часть современного средства измерений представляет собой совокупность последовательно соединенных ИП электрического сигнала, достаточно

унифицированных и освоенных в серийном производстве многими изготовителями в разных развитых в научно-техническом отношении странах. На рис. 2.1,а представлена структурная схема с преобразованием неэлектрической величины, а на рис. 2.1.б - с входным ВОД либо электрической, либо неэлектрической величины.

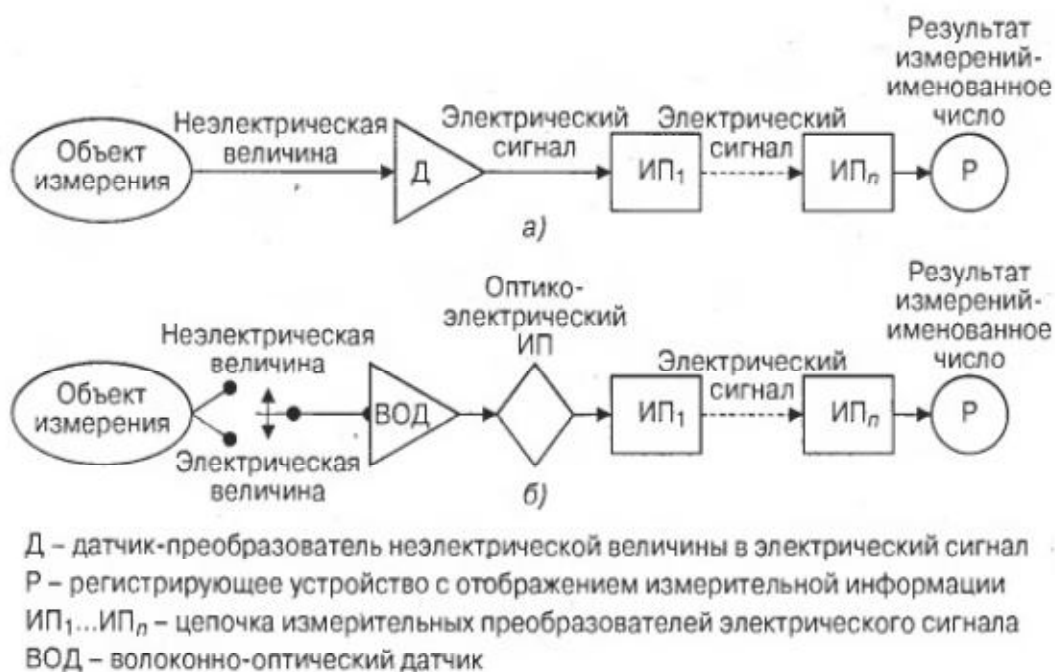


Рисунок 2.1 - Структурные схемы средств измерений

Более того, фирмы-изготовители и разработчики электрических и электронных ИП в последние десятилетия стремятся не только к стандартизации и унификации компонентов, из которых строятся ИП, но и к их всемерной миниатюризации, чтобы средства измерений были достаточно портативными. Об этом нам сообщают не только Интернет, но и многочисленные красочные каталоги различных фирм-изготовителей отдельных компонентов и в целом преобразователей.

Поэтому наше «путешествие» продолжим в «обратном направлении», т.е. начнем с рассмотрения различных измерительных преобразователей

входных электрических величин в электрические же величины, но отличающиеся от них по форме или другим характерным для измерительного сигнала признакам. Эти ИП, которыми и заканчиваются до регистрации результата все преобразования, принято называть просто электрическими измерительными преобразователями [8]. При этом преобразуемыми величинами являются постоянные или переменные (как, периодические, так и непериодические) электрические напряжения и токи.

В процессе преобразования электрических сигналов возникает необходимость с гарантированной точностью: усиливать или ослаблять их, т.е. изменять уровень или интенсивность сигнала; преобразовывать форму или, иначе говоря, изменять характер зависимости напряжения или тока от времени (или частоты, являющейся, как известно, величиной, обратной периоду колебаний). Если необходимо превратить постоянный или непрерывно изменяющийся во времени так называемый аналоговый сигнал в последовательность импульсов, то приходится использовать ИП, именуемые модуляторами, а обратное преобразование осуществлять демодуляторами.

Остановимся несколько подробнее на двух общепринятых в современной измерительной технике формах представления измеряемых величин: аналоговой и цифровой.

Термин «аналоговый» родствен по смыслу термину «подобный». Он означает, что одна физическая величина (например, измеряемая) выражается другой, подобной ей физической величиной, изменяющейся в соответствии с первой. Если первая величина принимает непрерывный ряд значений в каком-то диапазоне, то при аналоговом измерительном преобразовании и вторая величина принимает непрерывный ряд значений в соответствующем диапазоне.



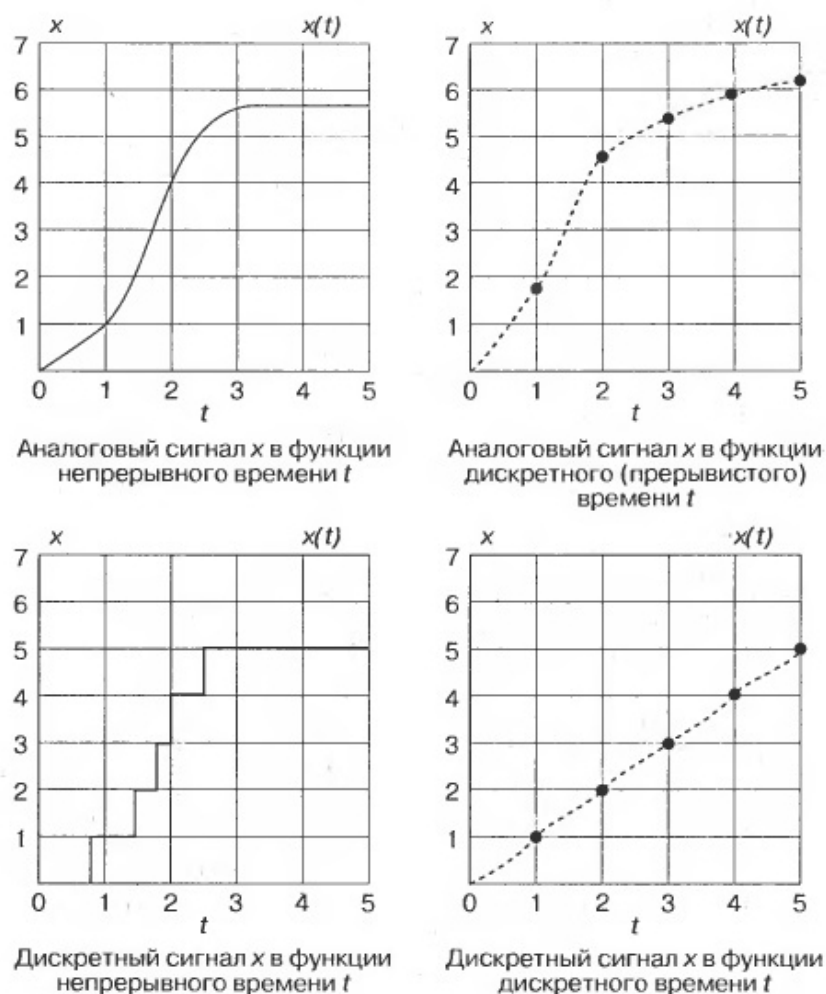


Рисунок 2.2. - Количественные особенности измерительных сигналов

Это означает, что преобразованная (выходная) величина является моделью, аналогом входной величины.

Наряду с аналоговой применяется и другая форма представления измерительной информации в результате преобразования. Ее именуют цифровой, хотя это и не совсем точно, поскольку «забывают» при этом, что на самом-то деле в ИП аналоговый измерительный сигнал преобразуется в дискретный измерительный сигнал, который в определенных пределах принимает лишь некоторое конечное число значений. Если же дискретное значение измерительного сигнала состоит из целого числа  $q$  элементарных квантов (ступеней значений) соответствующего значения измеряемой величины, то, ставя каждому сигналу в соответствие определенную комбинацию символов принятого алфавита (кодovou комбинацию), т.е.

производя кодирование дискретного сигнала, мы и получаем **цифровой измерительный сигнал**. Возможные варианты измерительных сигналов (до операции кодирования) приведены на рис. 2.2. Под **кодированием** понимается построение сигнала по некоторому определенному принципу, имеющему простое математическое выражение.

Таким образом, наряду с аналоговой применяется и цифровая форма представления информации. Результат измерения в конечном итоге выдается (часто после обработки полученных данных по определенной программе в соответствии с алгоритмом измерения) в виде некоторого числа, причем регистрация этого результата может осуществляться самим экспериментатором, но чаще всего в настоящее время - автоматически.

Однако нередко приходится осуществлять и обратное преобразование формы сигнала из цифровой в аналоговую.

Поэтому в последние десятилетия в измерительной технике широчайшее распространение получили аналого-цифровые (АЦП) и цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП).

Теперь у нас появилось достаточно оснований для более подробного ознакомления с различными типами электрических измерительных преобразователей.

## **2.2. Масштабные электрические измерительные преобразователи**

Масштабными рассматриваемые ИП называются потому, что с их помощью осуществляются изменения в ту или иную сторону (увеличение или уменьшение) уровней измерительных сигналов - и то и другое достаточно часто встречается при прохождении сигнала по измерительной цепи.

Эти преобразователи делятся на **пассивные и активные электрические ИП**. В преобразователях первой группы, типичными представителями которых являются резистивные (а также конденсаторные) делители и измерительные трансформаторы, не требуется применения

источников питания электрической энергией. Типичными представителями второй группы служат различные усилители как постоянного, так и значительно чаще переменного тока.

Начнем с пассивных масштабных ИП и в первую очередь - с

**резистивных делителей** входных сигналов  $U_{вх}$ . Прежде всего вспомним, что такое резистор. Им является промышленное изделие (часто именуемое электрорадиокомпонентом), основное функциональное назначение которого — оказывать известное активное сопротивление электрическому току (напоминать так напоминать: активное сопротивление (в отличие от реактивного) обусловлено необратимыми превращениями электрической энергии проходящего по резистору тока в другие формы (преимущественно в тепловую или так называемое джоулево тепло)). Резисторы характеризуют номинальным значением сопротивления в омах или соответствующих кратных единицах, допустимыми отклонениями от номинального значения в процентах и рассеиваемой в резисторе мощностью в ваттах или кратных единицах

Схема простейшего резистивного делителя изображена на рис. 2.3.

Коэффициент преобразования такого ИП описывается следующей формулой:

$$\mu = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_2/R_1}{1 + R_2/R_1}$$

и определяется отношением сопротивлений обоих резисторов. Эта формула справедлива для случая, когда  $r_i$  пренебрежимо мало, а сопротивление  $R_H$ , напротив, достаточно велико по сравнению с  $R_1$  и  $R_2$ . В противном случае, т.е. при соизмеримости значений  $r_i$  и  $R_H$  со значениями  $R_1$  и  $R_2$ , в формулу вместо  $R_1$  следует подставить  $R_1 + r_i$ , а вместо  $R_2$  —  $\frac{R_2 \cdot R_H}{R_2 + R_H}$

Нередко желательно иметь несколько значений  $U_{\text{ВЫХ}}$  при данном  $U_{\text{ВХ}}$ . С этой целью применяют многоступенчатые резистивные делители последовательного типа. Схема такого делителя, не требующая пояснений, приведена на рис. 2.4.

Рис. 2.3. Схема простейшего резистивного делителя:  $R_1$ ,  $R_2$  - резисторы;  $U_{\text{ВХ}}$ ,  $U_{\text{ВЫХ}}$  - электрические напряжения, соответственно подаваемое на делитель от источника сигнала с внутренним сопротивлением  $r_i$  и передаваемое в результате деления на нагрузку с сопротивлением  $R_H$

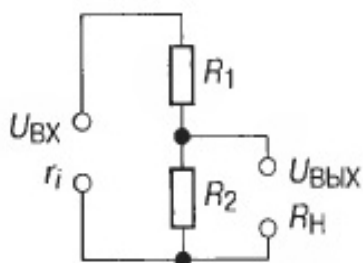
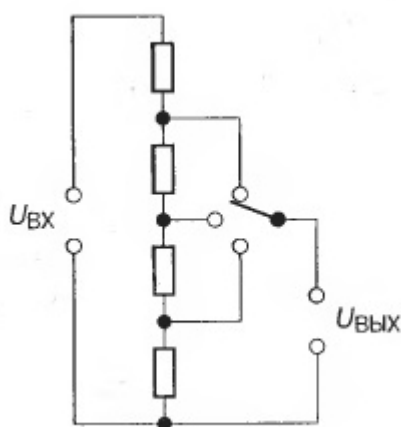



Рисунок 2.4. - Схема многоступенчатого резистивного делителя входного сигнала  $U_{\text{ВХ}}$



Заменим в схемах рис. 2.3 и 2.4. резисторы, конденсаторами, емкость которых обозначается, как известно, прописной латинской буквой  $C$ , а условное обозначение выглядит в виде двух параллельных пластин .

В результате по тем же схемам получим **конденсаторные делители**, которые применяются, как правило, на более высоких частотах - от единиц килогерц до сотен мегагерц. При этом следует помнить, что входные и выходные сопротивления таких делителей (а соответственно и коэффициенты преобразования) зависят от частоты.

Перейдем к следующей широко распространенной подгруппе пассивных электрических ИП - **измерительным трансформаторам тока и напряжения**. Это тоже масштабные преобразователи, но их отличает от резистивных и конденсаторных делителей, во-первых, возможность не только деления (ослабления) входного сигнала, но и его умножения (усиления), а во-вторых, отсутствие гальванической (т.е. «контактирующей») связи между входом и выходом преобразователя: первичная и вторичная обмотки измерительного трансформатора не гальванически, а индуктивно (т.е. бесконтактно) связаны друг с другом.

Этой же цели служат **и входные трансформаторы**, используемые на звуковых и ультразвуковых частотах как для гальванической развязки, так и для согласования входного и выходного сопротивлений последовательно включаемых в измерительную цепь электрических ИП, а также для введения **масштабного коэффициента**. В измерительных трансформаторах последний равен отношению чисел витков первичной и вторичной обмоток. Измерительными эти трансформаторы названы потому, что масштабный коэффициент стабилен в течение длительного промежутка времени и его значение известно с очень высокой точностью: в диапазоне рабочих частот от  $10^3$  до  $10^6$  Гц (т.е. от 1 кГц до 1 МГц) погрешность масштабного коэффициента находится в пределах 0,01-0,001%.

**Теперь познакомимся с активными масштабными электрическими измерительными преобразователями, а точнее - с разнообразными измерительными усилителями электрических сигналов.** Назначение подобных усилителей - увеличение

чувствительности средств измерений физических величин. Какое же основное требование предъявляется к усилителям, применяемым в измерительных цепях? Оказывается, требования различны и зависят прежде всего от конкретной измерительной задачи, решаемой с помощью данного средства измерений, в состав которого входит рассматриваемый усилитель.

Одной из наиболее распространенных групп измерительных усилителей являются **измерительные усилители переменного тока**. С них и начнем. Всем школьникам старших классов хорошо известна мостовая схема измерения электрических сопротивлений резисторов. Часто эту схему называют мостом Уинстона или измерительным мостом. Правда, он обычно работает на постоянном токе и служит для измерений активных сопротивлений, но в данном случае это не имеет значения: пусть эта схема питается низкочастотным переменным током. Для нас важно, что мост состоит из четырех сопротивлений, образующих «квадрат» с двумя диагоналями. К двум противоположным вершинам этой схемы (первая диагональ) подводят напряжение питания, а между двумя другими вершинами, т.е. во вторую диагональ, включают достаточно чувствительный измерительный прибор, фиксирующий равновесие этой мостовой схемы, т.е. практическое равенство нулю тока в этом приборе. Часто для увеличения чувствительности этого указателя равновесия перед ним включают усилитель, к которому не предъявляется требование стабильности коэффициента усиления; важно лишь, чтобы он «чувствовал» возможно меньший разбаланс моста, т.е. минимально достижимую разность потенциалов между вершинами второй диагонали. Это означает, что подобный усилитель должен лишь иметь предельно низкий **порог чувствительности**, а стабильность чувствительности (в данном случае коэффициента усиления) не играет роли. Тем более нет необходимости в определении точного значения коэффициента усиления.

Однако в измерительных схемах, где необходимо усилить сигнал с помощью усилителя, играющего роль масштабного измерительного

преобразователя, от него требуется **стабильность коэффициента усиления**; значение последнего при этом часто должно быть точно известно. Эта метрологическая характеристика зависит от параметров элементов, составляющих усилитель, и изменяется при изменении напряжения питания, температуры окружающей среды и других внешних условий. Не составляет труда стабилизация напряжения питания и тем самым повышение точности и стабильности коэффициента усиления. Устранить так же просто другие причины нестабильности коэффициента усиления, вызванные, в частности, старением входящих в состав усилителя транзисторов, не представляется возможным.

Таким образом, появляются две задачи:

- точного определения коэффициента усиления;
- стабилизации его значения, причем желательно на возможно более длительный промежуток времени.

Первая задача решается проведением электрической градуировки измерительного усилителя или, точнее, проверкой коэффициента усиления перед или во время измерения

нередко выпускаются измерительные усилители с встроенными в них градуировочными устройствами, подключаемыми автоматически по заданной программе.

Одним из радикальных способов повышения стабильности коэффициента усиления, т.е. решения второй задачи, является введение в схему измерительного усилителя глубокой **отрицательной обратной связи**. Наверное, не все отчетливо представляют себе, что такое обратная связь вообще, а отрицательная — тем более. Поэтому сообщим читателю, что обратная связь — это воздействие результатов какого-либо процесса на его протекание. Если при этом интенсивность процесса возрастает, то обратная связь называется положительной, а в противоположном случае — отрицательной. Именно отрицательная обратная связь может обеспечить автоматическое поддержание регулируемых физических характеристик (в

нашем случае - коэффициента усиления) системы (у нас - измерительного усилителя) на требуемом уровне, т.е. стабилизировать их.



Рис. 2.5. Схема, поясняющая принцип воздействия цепочки обратной связи на процесс усиления:

$\Delta U_{вх}, \Delta U_{вых}$  - приращения сигнала на входе и выходе усилителя;

$K_0$  - коэффициент усиления в отсутствие обратной связи;

$\beta$  - коэффициент передачи доли выходного сигнала на вход усилителя

Классический пример отрицательной обратной связи - центробежный регулятор Уатта, примененный в паровой машине для уменьшения подачи пара в цилиндр при увеличении скорости маховика и наоборот. Применительно к измерительному усилителю поясним сказанное рис. 2.5 и простейшей формулой:

$$K = \frac{K_0}{1 - \beta \cdot K_0}$$

из которой следует, что обратная связь может действовать двояко: при положительной обратной связи по мере стремления произведения  $\beta \cdot K_0$  к единице знаменатель в приведенной формуле приближается к нулю, что соответствует потере устойчивости и может привести к самовозбуждению усилителя, т.е. превращению его в генератор сигналов; при смене знака в знаменателе на противоположный (например, путем изменения полярности сигнала, подаваемого в цепочку обратной связи) обратная связь становится



отрицательной и коэффициент усиления  $K$  уменьшается ( $K < K_0$ ), но зато повышается устойчивость усилителя по отношению к внешним воздействиям. Чем «отрицательнее» обратная связь или, как принято выражаться, чем глубже отрицательная связь, тем стабильнее работает усилитель. Так и просится формулировка «принципа»: проигрываем в усилении, но выигрываем в стабильности!

Мы достаточно подробно познакомились с весьма распространенным активным масштабным электрическим измерительным преобразователем - измерительным усилителем переменного тока. Значительно реже измерительная техника нуждается в измерительных усилителях несколько иного принципа действия и назначения. К их числу относятся измерительные усилители с большим входным сопротивлением и измерительные усилители постоянного тока.

Сразу же возникает вопрос: для чего в масштабном измерительном преобразователе необходимо обеспечивать высокое входное сопротивление и что это такое? Обратимся снова к рис. 2.5 и увидим, что слева расположены два так называемых входных зажима усилителя (справа - соответственно два выходных зажима; иногда зажимы именуют клеммами). Теперь положим, что к входным зажимам подключается своими двумя выходными зажимами датчик, являющийся источником преобразованного из измеряемой величины электрического сигнала. Очевидно, что измерение электрического сопротивления между выходными зажимами датчика и входными зажимами усилителя (разумеется, когда датчик не присоединен к усилителю) позволит нам определить два значения: одно из них является выходным сопротивлением датчика, а другое — входным сопротивлением усилителя. Оказывается, в разных случаях большую роль играет соотношение между этими двумя сопротивлениями, обеспечивающее согласование условий неискаженной передачи по измерительной цепи полезного сигнала датчика. Не останавливаясь на всех подобных случаях, отметим лишь, что существуют датчики, обладающие весьма большим

выходным сопротивлением, достигающим  $10^8$ - $10^{10}$  Ом и более. При работе с такими датчиками входное сопротивление усилителя должно быть не менее чем на два порядка большим выходного сопротивления датчика, т.е. равным  $10^{10}$ - $10^{13}$  Ом.

Как же обеспечить столь высокое входное сопротивление усилителя? Способ был найден, и базировался он на так называемом каскадировании схемы усилителя. Это означает, что в его составе предусматривается не один, а несколько активных элементов (электронных ламп или транзисторов), каждый из которых «обрамлен» некоторой совокупностью пассивных элементов (резисторов, конденсаторов), в результате чего образуется каскад усиления с определенной возложенной на него разработчиком схемы усилителя функцией. В рассматриваемом случае для достижения столь высоких входных сопротивлений первый каскад усилителя приходится выполнять по специальным схемам, которые принято называть электрометрическими. (Для тех, кто более детально знаком с электроникой, сообщим, что можно применять специальные электрометрические лампы или полевые транзисторы с изолированным затвором (МДП-транзисторы), собственное входное сопротивление которых достигает  $10^{12}$ - $10^{14}$  Ом.)

До сих пор мы говорили об усилителях переменного тока, но не уточняли, с какой скоростью изменяется входной сигнал. Эта скорость (или быстрота) изменения характеризуется обычно частотой измеряемого сигнала, а ее единицей, как известно, служит герц. Однако достаточно часто возникает необходимость усиления измеряемых медленно меняющихся сигналов, характер изменения которых во времени близок к практически постоянному току. В этом случае применяют так называемые усилители постоянного тока, характерной особенностью которых является отсутствие межкаскадных разделительных конденсаторов или трансформаторов, находящихся обычно в усилителях переменного тока.

Напомним, что при описании в этом параграфе активных

масштабных электрических' измерительных преобразователей мы все время оперировали аналоговыми Электрическими сигналами. Поэтому рассмотренные типы усилителей можно именовать также аналоговыми электронными схемами, цепями или элементам

Однако вторая половина XX века ознаменовалась, как известно, бурным развитием интегральной электроники, т.е. разработчики электронной измерительной аппаратуры получили в свое распоряжение не только отдельные элементы, а уже готовые функциональные **узлы**, к числу которых относятся **операционные усилители в интегральном исполнении**. Операционными усилителями при этом называют усилители постоянного тока, имеющие коэффициент усиления по напряжению больше тысячи. Такой усилитель содержит, как правило, один, два или три транзисторных каскада усиления напряжения, выходной (последний) каскад усиления тока и цепи согласования каскадов между собой.

### **2.3\* Аналого-цифровые и цифро-аналоговые измерительные преобразователи**

Предыдущий параграф посвящен измерительным преобразователям, которые в составе измерительной цепи решали задачи по возможности неискаженного масштабного преобразования аналогового электрического сигнала, отображающего измеряемую физическую величину (некоторые предпочитают говорить не об отображении, а об адекватности измеряемой величине - дело вкуса!). Однако в современной автоматизируемой измерительной технике необходимо, как правило, подвергнуть измерительный сигнал по завершении масштабирования вторичной обработке и зарегистрировать результат измерений, а иногда использовать выходной сигнал измерительного устройства для регулирования или управления другими системами. Эти завершающие операции измерительного процесса оказалось удобнее выполнять с цифровыми сигналами, а для подачи в системы автоматического управления и регулирования пригодны как цифровые, так и преобразованные из них

аналоговые сигналы.

В результате возникла необходимость в измерительных аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователях.

Сегодня каждому школьнику известно, что преобразователи этих двух типов широко используются также в устройствах вычислительной техники для кодирования и декодирования информации. Для чего же нужно кодировать сигнал? Академик А. А. Харкевич понимал под кодированием построение сигнала по некоторому определенному принципу, имеющему простое математическое выражение. Иными словами, мы имеем дело с процессом простейшего «шифрования» преобразованного аналогового сигнала, а декодирование позволяет его «расшифровать» и предоставить в распоряжение пользователя аналоговый сигнал. Зачем сначала «шифровать», а затем (разумеется, при необходимости!) «расшифровывать»?

Оказалось, что обработка сигналов упрощается, если они имеют цифровую форму, а отображение результата в цифре наглядно и привычно.

Однако мы чуточку отвлеклись, но не совсем! Все сказанное об АЦП и ЦАП в вычислительной технике непосредственно относится и к измерительной технике, но..! Представленный на рис. 2.2 процесс дискретизации аналогового сигнала по шкалам уровней (квантование) и времени должен выполняться с гарантированной точностью, т.е. за масштабным измерительным преобразователем в измерительной цепи должен следовать **измерительный АЦП**, градуируемый по шкале уровней с приписываемой ему так называемой погрешностью квантования. Аналогичные требования предъявляются и к **измерительному ЦАП**.

Таким образом, мы можем более подробно познакомиться с АЦП и ЦАП. Начнем с первого из этих преобразователей, не забывая при этом, что речь идет об элементах измерительной цепи!

**Аналого-цифровым преобразователем**, иногда именуемым **преобразователем аналог-код**, называется устройство, осуществляющее

автоматическое преобразование (измерение и кодирование) непрерывно изменяющихся во времени аналоговых величин в эквивалентные значения числовых кодов. Количественная связь между аналоговой величиной  $A(t_i)$  и соответствующей ей цифровой величиной  $N_i$  для любого момента времени  $t_i$ , определяется соотноше

$$N_i = \frac{A(t_i)}{\Delta A} \pm |\delta N_i|$$

Где  $\Delta A$  - шаг квантования, т.е. аналоговый эквивалент единицы младшего разряда кода;  $\delta N_i$  - погрешность преобразования на данном шаге.

Об аналоговых электрических сигналах  $A(t)$  мы уже достаточно говорили ранее. Что же касается выходных кодов  $N_i$  то они представляются чаще всего в двоичной, двоично-десятичной или десятичной системах счисления

К АЦП предъявляется некоторая совокупность технических, метрологических и эксплуатационных требований. Их основные характеристики: быстродействие, описываемое максимальным числом однократных преобразований в секунду; точность в виде максимальной суммарной или средней квадратической погрешности преобразования в статическом или динамическом режиме; чувствительность, т.е. минимальное значение аналогового сигнала, которое преобразователь надежно различает как единицу кода; число каналов, определяющее максимальное количество аналоговых сигналов, которые могут быть одновременно подключены к АЦП.

**Цифро-аналоговым преобразователем, иногда именуемым преобразователем код-аналог,** называется устройство, осуществляющее автоматическое декодирование входных величин, представленных числовыми кодами, в эквивалентные им значения в данном случае аналогового электрического сигнала. Количественная связь между входной

числовой величиной  $N$ , и ее аналоговым эквивалентом  $A(t_i)$  выражается отношением

$$A(t_i) = N_i \cdot \Delta A + |\delta A_i|$$

Где  $\Delta A$  - аналоговый эквивалент единицы младшего разряда кода;  $\delta A$  - погрешность преобразования. Коды  $N$ , представляются в тех же системах счисления, что ранее были указаны для АЦП. Основными характеристиками ЦАП являются быстродействие, точность и число каналов. Под быстродействием понимается максимальная частота поступления на вход декодируемых чисел, при которой сохраняется требуемая точность преобразования. Точность и число каналов не нуждаются в дополнительном разьяснении, ибо эти характеристики аналогичны таковым для АЦП.

вершает его АЦП (или ЦАП), цифровой (или аналоговый) сигнал на выходе которого либо регистрируется в качестве результата измерения, либо вводится в автоматизированное устройство обработки измерительной информации и отображения полученных данных в удобной для восприятия потребителем форме.

В-третьих, мы не касались видов и конструкций регистрирующих устройств, полагая, что читателю хорошо известны даже из школьного курса измерительные приборы аналогового и цифрового типа - стрелочные вольтметры и амперметры, цифровые тестеры и т.п.

Наконец, в-четвертых, важно отметить, что в целом измерительный прибор, на входе которого включен датчик соответствующей измеряемой физической величины, обычно градуируется в единицах этой величины, что упрощает непосредственное (без пересчета) получение желаемого результата измерений и делает его более наглядным. Однако аналогичную операцию получения градуировочной характеристики (но в данном случае уже характеристики преобразования) можно выполнить и применительно к датчику как отдельному элементу измерительной цепи. Если эта характеристика линейна, то речь идет об определении чувствительности

датчика.

Эти завершающие «аккорды» открывают нам путь к систематизированному рассмотрению датчиков неэлектрических величин, функционирующих в качестве первичных (т.е. непосредственно воспринимающих физическую величину) измерительных преобразователей в электрические величины параметрической или генераторной природы, измерение которых сводится в конечном счете к измерению электрического напряжения или тока.

Остается выбрать один из двух подходов к описанию датчиков:

- положить в основу систематизации сведений и классификации датчиков виды измеряемых величин (например, механические, тепловые, оптические и пр.);
- принять за основу физические принципы преобразования и описать соответствующие типовые конструкции датчиков, а в качестве примеров их применения привести приборы для измерения тех или иных величин.

Автору представился предпочтительным второй подход, а конкретные примеры заимствованы им из ранее упомянутых книг [2-5], рекомендованных для углубленного изучения этого **направления** измерительной техники. Поэтому, не отступая от традиционной классификации датчиков, последовательно остановимся на первичных измерительных преобразователях (датчиках) нескольких основных, на наш взгляд, групп:

- резистивных датчиках;
- пьезоэлектрических датчиках;
- преобразователях (датчиках) электростатической группы;
- преобразователях (датчиках) электромагнитной группы;
- тепловых преобразователях (датчиках);
- оптических датчиках.

Заметим, что, за исключением первой группы датчиков, мы

встретимся в каждой из групп как с параметрическими, так и с генераторными преобразователями. Однако следует напомнить читателю, что в любом параметрическом датчике изменение его выходной величины (параметра) в конечном счете преобразуется в изменение «активной» величины, электрического заряда, тока или напряжения.

Наибольшее распространение среди резистивных датчиков получили контактные датчики, реостатные преобразователи и тензорезисторы (особенно последние!).

### **Контактные датчики**

Эти простейшие датчики, как отмечалось в подстраничной сноске в начале раздела, следовало бы с большим основанием отнести к числу не измерительных преобразователей, а контактных элементов реле. Они предназначены обычно для измерения механического перемещения, преобразуемого в разомкнутое или замкнутое состояние контактов, управляющих электрической цепью. Ими удобно пользоваться в системе контроля размера изготавливаемого изделия: по мере приближения к заданному размеру соединенный механически с изделием шток перемещается, а укрепленный на нем контакт по достижении этого размера входит в соприкосновение с неподвижным контактом. При этом активное сопротивление между двумя контактами изменяется от бесконечности (разрыв) до малого значения контактного сопротивления (или наоборот, если схема работает на размыкание контактов).

Перемещение штока определяется по шкале, а контактная группа включается в измерительную или сигнальную цепь.

Если две электропроводящие пластины «проложить» полупроводящей прослойкой (например, из электропроводящей бумаги или резины), а затем этот «сэндвич» подвергнуть воздействию давления, то изменится сопротивление между проводящими элементами. В результате мы имеем преобразователь контактного сопротивления.



Таким образом, первый из описанных контактных датчиков находит применение в так называемых **линейных измерениях**, когда интересуются перемещением какой-то опорной поверхности. Датчик второго типа полезен при измерении давления или силы, т.е. при выполнении этих видов **механических измерений**. Во всяком случае, оба типа этих датчиков следует признать параметрическими преобразователями.

### **Реостатные преобразователи**

Школьникам, изучающим физику, хорошо известно, что реостатом называется устройство для регулирования напряжения и тока в электрической цепи, основная часть которого - проводящий элемент с активным электрическим сопротивлением, значение которого можно изменять плавно или ступенями в соответствии с заданными условиями. (В переводе с греческого rheos (течение, поток) и statos (стоящий, неподвижный) слово «реостат» означает возможность установки требуемого значения текущего по нему тока, а соответственно и падения напряжения.)

Отсюда реостатным преобразователем называют реостат, движок которого перемещается линейно или по окружности (в зависимости от конструкции датчика) под действием измеряемой неэлектрической величины. Следовательно, входной величиной является перемещение движка, а выходной величиной - изменение сопротивления, т.е. и этот датчик является параметрическим преобразователем.

Одной из распространенных конструкций реостатного преобразователя является кольцеобразный каркас из изоляционного материала, на который намотана с равномерным шагом проволока. Изоляция проволоки на верхней грани каркаса зачищается, и по металлу проволоки скользит щетка (надеюсь, читатель понимает, что речь идет не о щетке в обычном понимании этого слова, а об электрической щетке, представляющей собой несколько скрепленных друг с другом пластинок из электропроводящего материала с высокой износостойкостью, торцы которых имеют косой срез и гладкую поверхность для надежного контакта с

витками проволоки, по которым она скользит). Добавочная щетка скользит по расположенному внутри каркаса концентрично ему токосъемному кольцу. Обе щетки закреплены на приводном вращающемся валике и электрически изолированы от него. По реостату пропускается обычно постоянный ток, а разность потенциалов (падение напряжения), пропорциональная выходному сопротивлению и функционально связанная с измеряемой величиной, подается в измерительную цепь с двух зажимов датчика: одного из зажимов реостата и зажима, соединенного через токосъемное кольцо со щеткой.

Формы каркасов разнообразны: помимо кольца это могут быть пластины, цилиндры и т.д. Выбор формы каркаса позволяет получить определенную функциональную зависимость между перемещением щетки и выходным сопротивлением.

Достаточно очевидно, что при переходе щетки с витка на виток намотанной на каркас проволоки выходное сопротивление изменяется «ступенями», т.е. дискретно. Однако школьникам известен и другой тип реостата - не в виде намотанной на каркас проволоки, а натянутой между двумя зажимами прямолинейной проволоки, по которой перемещается аналог щетки - контактирующий с проволокой «движок». Это устройство именуется, как известно, **реохордом**, а соответствующие датчики аналогового типа - **реохордными преобразователями**

Для изготовления этих (реостатных и реохордных) датчиков используется провод из различных сплавов платины, обладающих повышенной коррозионной стойкостью и износостойкостью, а также манганин и константан. Применение микропровода позволяет миниатюризировать конструкцию датчика, сведя его размеры до нескольких миллиметров.

Таким образом, и здесь мы имеем дело с непосредственным измерением перемещений, а также «косвенно» с измерениями других неэлектрических величин, тем или иными способами преобразуемых

предварительно в перемещения.

### Тензорезисторы

В основе работы тензорезисторов, часто именуемых тензодатчиками, лежит явление тензоэффекта (от латинского *tensus* - напряженный), заключающееся в изменении электрического сопротивления проводников и полупроводников при их механической деформации. Если сопротивление резистора  $R = \rho l / s$  где  $\rho$  - удельное сопротивление материала, из которого он изготовлен,  $l$  и  $s$  соответственно его длина и площадь поперечного сечения, то относительное изменение  $R$  при деформации резистора определяется как

$$\varepsilon_R = \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta s}{s}$$

где знаком  $\Delta$  обозначено приращение величины.

Введем в рассмотрение коэффициент Пуассона  $\mu$  и поперечный размер проводника  $b$  при продольном его размере  $l$ . Известно, что в твердом теле в зоне упругих деформаций поперечная и продольная деформация связаны соотношением

$$\varepsilon_b = \mu \cdot \varepsilon_l (\varepsilon_l = \Delta l / l; \varepsilon_b = \Delta b / b)$$

Тогда 
$$\varepsilon_R = \frac{\Delta \rho}{\rho} + (1 + 2\mu) \varepsilon_l$$

При линейно напряженном состоянии в зоне упругих деформаций чувствительность металлического тензорезистора (тензочувствительность) характеризуется коэффициентом тензочувствительности

$K_m = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_l}$ , значения которого для ряда металлов (в основном сплавов) находятся в пределах от 0,9 до 3,6, а для полупроводников (преимущественно кремния) в зависимости от материала (и-Si или p-Si)  $K_m$  соответственно равен -95,3 и =90,0 [4].

Наибольшее распространение в измерительной технике получили дискретные металлические и полупроводниковые тензорезисторы. При

изготовлении наклеиваемого на измеряемый объект проволочного тензорезистора на полосу тонкой бумаги или лаковую пленку предварительно наклеивается так называемая решетка из зигзагообразно уложенной тонкой проволоки диаметром 0,02- 0,05 мм. К концам проволоки припаиваются или привариваются выводные медные проводники. Сверху эта конструкция покрывается слоем лака. Измерительной базой преобразователя является длина поверхности объекта измерений, занимаемая проволокой. Наиболее часто используются преобразователи с базами 5-20 мм, обладающие сопротивлением 30-500 Ом [4].

Новейшие технологические процессы обеспечили возможность изготовления более тонких металлических тензопреобразователей - фольговых и тонкопленочных толщиной менее 0,001 мм.

Полупроводниковые тензорезисторы представляют собой тонкие полоски из кремния или германия, вырезанные в определенных направлениях осей кристаллов. На концах полоски расположены контактные площадки, к которым припаиваются выводы. Полупроводниковые тензорезисторы имеют длину 2-12 мм, ширину 15-0,5 мм, начальное сопротивление от 50 до 10000 Ом, коэффициент тензочувствительности  $K_T=50-200$  [4].

Тензорезисторы чаще всего служат датчиками при измерениях длины, а также механических величин (силы, давления и пр.), преобразуемых в статическую или динамическую деформацию упругого элемента. Поскольку эти датчики (особенно полупроводниковые) весьма чувствительны к изменениям окружающей температуры, их стараются включать симметрично в мостовые измерительные схемы: два идентичных тензорезистора в разных плечах моста находятся при одинаковой температуре, но только один из них подвергается воздействию измеряемой величины, от которой и зависит разностный сигнал в измерительной диагонали моста.

Все резистивные преобразователи являются датчиками

параметрического типа.

### 3.2 Пьезоэлектрические датчики

Здесь, прежде всего, необходимо напомнить некоторые сведения из области физики твердого тела. **Кристаллами** (от греческого *krystallos*) называются твердые тела, обладающие трехмерной периодической атомной структурой и при равновесных условиях образования имеющие естественную форму правильных симметричных многогранников.

**Текстура** (от латинского *textura*) - это преимущественная ориентация кристаллических зерен в поликристаллах или молекул в аморфных телах, жидких кристаллах, полимерах, приводящая к анизотропии (т.е. неоднородности в разных направлениях) свойств материалов.

#### Примечания:

1. Поликристалл — это соединение мелких монокристаллов (кристаллических зерен) различной ориентации.

2. Жидкие кристаллы - это особое состояние некоторых органических веществ, в котором они обладают присущей жидкостям текучестью, но сохраняют при этом определенную упорядоченность в расположении молекул и неоднородность ряда физических свойств, характерные для твердых кристаллов.

Теперь станет понятным следующее: пьезоэлектрическими называются кристаллы и текстуры, электризующиеся под действием механических напряжений (прямой пьезоэффект) и деформирующиеся в электрическом поле (обратный пьезоэффект). Пьезоэффект обладает знакочувствительностью, т.е. происходит изменение знаков заряда при замене сжатия растяжением и изменение знака деформации при изменении направления поля.

Типичным представителем пьезоэлектриков, достаточно широко применяемым при построении датчиков в приборах для измерений механических величин (силы, давления, ускорения и др.), является кварц.

Однако в последние десятилетия при измерениях ряда других неэлектрических величин в качестве чувствительных элементов датчиков используются такие разновидности пьезоэлектриков, как пирозлектрики, сегнетоэлектрики и сегнетоэлектрические пьезокерамики.

Пирозлектрики представляют собой особую разновидность пьезоэлектрических кристаллов, поляризующихся при всестороннем гидростатическом давлении и тепловом расширении, откуда и происходит название «пирозлектрики». Их типичным представителем является турмалин.

**Сегнетоэлектрики** входят в группу пирозлектрических кристаллов. Одни и те же кристаллы в зависимости от температуры могут быть как сегнетоэлектриками, так и линейными кристаллами. Температура, при которой сегнетоэлектрическая структура кристалла преобразуется в структуру линейного кристалла или в другую сегнетоэлектрическую структуру, называется точкой Кюри. Вблизи этой точки высокая поляризация при действии механических напряжений и температуры или очень большое изменение диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  при действии температуры проявляются особенно сильно. Сегнетоэлектрические монокристаллы сегнетовой соли и титаната бария практически не используются в измерительной технике из-за относительно низкой стабильности свойств и трудности получения бездефектных монокристаллов. Значительно чаще применяются **сегнетоэлектрические пьезокерамики**, представляющие собой продукт отжига спрессованной смеси, состоящей из мелкоизмельченного кристалла с присадками. Сырьем для производства пьезокерамики служат титанат бария ( $\text{BaTiO}_3$ ), титанат свинца ( $\text{PbTiO}_3$ ) и цирконат свинца ( $\text{PbZrO}_3$ ) с точками Кюри соответственно 120, 500 и  $\sim 230^\circ\text{C}$ .

Область применения этих датчиков весьма обширна. Например, датчики на основе прямого пьезоэффекта применяются в качестве первичных измерительных преобразователей силы, давления, ускорения.

Пироэлектрики не уступают по своим техническим и эксплуатационным характеристикам материалам, служащим для изготовления чувствительных элементов приемников электромагнитного излучения, особенно в оптическом диапазоне длин волн.

Обе эти группы следует отнести к датчикам генераторного типа, причем, как мы увидим в гл. 4. на основе пиро- и сегнетоэлектриков создаются бесконтактные датчики.

### **3.3. Емкостные датчики**

Строго говоря, датчики, в которых тем или иным способом изменяется емкость между двумя электродами (а таких способа три: изменять площадь электродов, расстояние или диэлектрическую переменного тока (на котором только и возможна работа датчиков этой группы!))  $Z_m$  - магнитное сопротивление датчика.

Как видно из приведенного выражения, полное сопротивление является комплексной величиной, содержащей вещественную  $R_0$  и мнимую

$\omega \cdot \frac{w_i^2}{Z_m}$  составляющие .

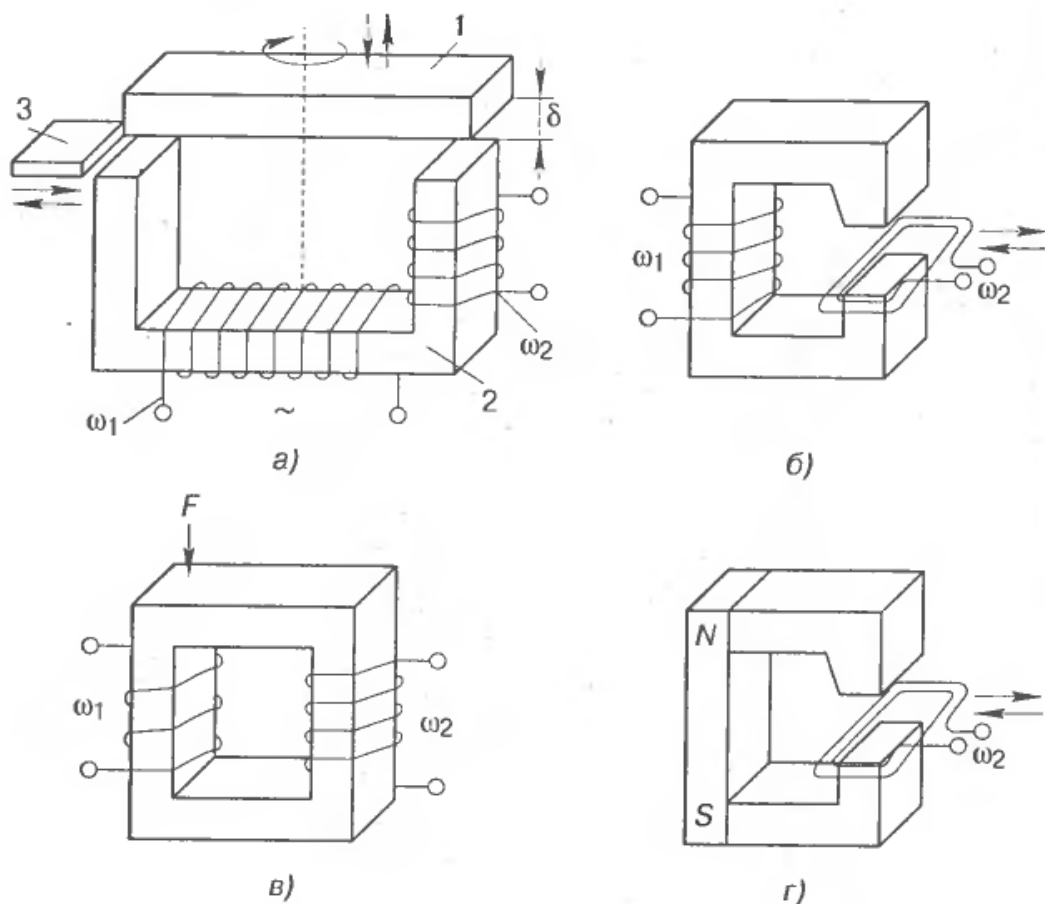


Рис. 3.2. Датчики электромагнитной группы

Обратим внимание на магнитное, сопротивление. Оно, в свою очередь, состоит из двух частей  $Z_m = Z_{mFe} + R_\delta$

Здесь  $Z_{mFe}$  - магнитное сопротивление ферромагнитной части магнитной цепи, которое при работе датчика на переменном токе также комплексная величина;  $Z_m = Z_{mFe} + jX_m$ ;  $R_b = \delta / (\mu_0 \cdot S)$ ;  $\omega_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м

Если потери в стали магнитопровода малы, то  $X_m \ll R_m$  и для двух характерных параметров датчика - индуктивности  $L$  и взаимной индуктивности  $M$  имеют место следующие выражения:

$$L = \frac{w_i^2}{R_m + R_\delta}; M = \frac{w_1 \cdot w_2}{R_m + R_\delta}$$

Напомним читателю, что индуктивностью считается величина, характеризующая магнитные свойства электрической цепи. Примером



служит проводящий контур с током  $I$ , протекающим в нем и создающим в окружающем пространстве магнитное поле, причем магнитный поток  $\Phi$ , пронизывающий контур (сцепленный с ним), прямо пропорционален току:  $\Phi = L \cdot I$ . Величина, характеризующая магнитную связь двух (или более) электрических цепей (контуров), называется взаимной индуктивностью или коэффициентом взаимной индукции двух контуров.)

Теперь мы можем вернуться к рис. 3.2, а. Если изменять  $R_a$  перемещением или вращением подвижного сердечника 1, то будет изменяться значение  $L$  или  $M$ . Значения этих величин можно изменять и при неподвижных сердечниках 1 и 2, вводя в воздушный зазор пластину 3 из ферромагнитного или электропроводного неферромагнитного материала (в первом случае это эквивалентно уменьшению  $\delta$ , в то время как во втором случае неферромагнитная пластина в «магнитном смысле» не влияет на размер  $\delta$ , так как при этом изменение  $L$  и  $M$  обусловлено размагничивающим действием токов, индуктированных в пластине основным магнитным потоком, проходящим по магнитной цепи).

Как видно из рис. 3.2, а, непосредственно преобразуемой неэлектрической величиной является перемещение. Целый ряд преимущественно механических, акустических и даже тепловых величин часто преобразуются в перемещения с последующим их преобразованием в изменения  $L$  или  $M$ . Преобразователи в изменения  $L$  называют **индуктивными датчиками**, а преобразователи в изменения  $M$  – **трансформаторными (взаимоиндуктивными)** датчиками. В последних изменение  $M$  можно получить не только при изменении магнитного сопротивления, но и при перемещении вторичной обмотки  $w_2$  (рис. 3.2, б) Если к магнитной цепи, изображенной на рис. 3.2, в, приложить сжимающее, растягивающее или скручивающее усилия, то  $\mu_{Fe}$  произойдет изменение магнитной проницаемости сердечника и как следствие, его магнитного сопротивления  $Z_{mFe}$ . Результат тот же, что и ранее: изменятся  $L$  или  $M$ . Здесь входной преобразуемой величиной служит упругая деформация сердечника,

используемая для измерений сил, давлений, моментов и пр. Такого рода датчики именуются **магнитоупругими**.

Обратимся к рис. 3.2, з. Внешне все то же. но часть магнито-провода с обмоткой  $W_1$  заменена постоянным магнитом (это не принципиально, можно сохранить тот же участок магнитопровода с обмоткой  $W_1$ , но пшать ее постоянным током, т.е. использовать вместо постоянного магнита электромагнит). При неподвижной обмотке  $W_2$  ЭДС на ее зажимах равна нулю. Однако при перемещении обмотки под воздействием измеряемой величины в ней наводится (индуцируется) ЭДС

$$e = -w_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt},$$

где  $d\Phi/dt$  - скорость изменения магнитного потока, сцепляющегося с витками вторичной обмотки.

Поскольку  $d\Phi/dt$  определяется скоростью перемещения обмотки в воздушном зазоре, то преобразуемой в ЭДС величиной служит скорость линейных или угловых перемещений, а подобные датчики именуются **индукционными**.

### 3.5. Тепловые датчики

Тепловым считается датчик, преобразующий в ходе происходящих в нем тепловых процессов температуру измеряемого объекта (являющуюся для датчика входной физической величиной) в измерительный электрический сигнал. К генераторным датчикам относятся **термопары**, а к параметрическим датчикам - **терморезисторы**. Как те, так и другие бывают металлическими и полупроводниковыми, но в любом случае описываемые в настоящей главе датчики контактируют с измеряемым объектом.

Попробуем теперь разобраться в сущности физических процессов, протекающих в тепловом датчике. В качестве одного из условий примем, что речь идет о твердотельном преобразователе какого-то количества тепла  $Q$  при неизменном агрегатном состоянии материала, из которого он

изготовлен. Это означает, что во всем рабочем диапазоне температур металл или полупроводник, из которого изготовлен датчик, не превращается ни в жидкость, ни тем более в газ.

Сразу отмстим, что для любого теплового датчика основополагающим физическим процессом является теплообмен, описываемый **уравнением теплового баланса**. Тепловой датчик можно рассматривать как некий резервуар, заполняемый до определенного «уровня» теплом. По достижении этого «уровня» датчик «успокаивается» и пребывает в состоянии теплового равновесия (баланса): количество поступающего в единицу времени тепла равно количеству отдаваемого тепла. «Наполняемый теплом» датчик характеризуется теплосодержанием  $Q_{TC} = Q_{ЭЛ} + Q_{ТО} = m \cdot c \cdot \theta$ , где  $Q_{ЭЛ}$  - количество тепла, создаваемого в результате выделения в датчике электрической мощности;  $Q_{ТО}$  - количество тепла, поступающего в преобразователь от измеряемого объекта или отдаваемого им в результате теплообмена с окружающей средой;  $m$  - масса,  $c$  — удельная теплоемкость материала;  $\theta$  - температура датчика.

Однако такое состояние теплового равновесия устойчивым остается лишь на определенное время, поскольку непрерывно имеет место **теплообмен** - переход некоторого количества тепловой энергии из одной части пространства в другую. Теплообмен может осуществляться тремя совершенно различными способами: посредством **теплопроводности, конвекции и излучения**.

При теплопроводности перенос тепловой энергии осуществляется в результате непосредственной ее передачи от частиц (молекул, атомов, электронов), обладающих большей энергией, частицам с меньшей энергией.

При конвекции имеет место перенос массы в результате перемещения газа или жидкости. Конвекция может быть свободной (естественной) при движении воздуха в помещении, порождаемом нагревательным прибором, или вынужденной, когда осуществляется, например, принудительное охлаждение потоком воздуха от вентилятора или движением охлаждающей

жидкости в радиаторе. Излучение (в данном случае тепловое или температурное) представляет собой электромагнитное излучение, испускаемое веществом и возникающее за счет его внутренней энергии. (Надо полагать, что читатель знаком из курса физики с явлением испускания или распространения электромагнитных волн (фотонов), именуемым излучением или даже радиацией.)

Все сказанное свидетельствует о том, что тепловой датчик, каким бы он ни казался в своем конструктивном исполнении подчас простым и «бесхитростным», представляет собой достаточно сложную систему, требующую при разработке и воплощении датчика учета многих факторов, влияющих на теплообмен. Любое пренебрежение этими факторами приводит к нарушению точности преобразования температуры и неустойчивости характеристик датчика.

**Термопара** представляет собой термоэлектрический преобразователь. Явление термоэлектричества было открыто в 1823 г. Зеебеком, который составил цепь из двух различных проводников, параллельно соединив их концами. Затем он нагрел одно из соединений концов, а другое соединение оставил ненагретым. В результате в этой цепи появилась ЭДС, которую в дальнейшем стали именовать термоЭДС.

Измерить ее можно, разомкнув проводники в месте соединения, находящемся в ненагретом состоянии. Соединение проводников осуществляется методом сварки или пайки. Если один спай термопары, называемый рабочим, поместить в среду с температурой  $\theta_1$ , подлежащей измерению, а температуру  $\theta_2$  разомкнутых (нерабочих) концов проводов, между которыми включен милливольтметр для измерения термоЭДС, поддерживать постоянной, то показание прибора будет зависеть только от  $\theta_1$ . Разумеется, температуру  $\theta_2$  следует поддерживать строго постоянной.

Материалами для термопар могут служить не только металлы, но и полупроводники. В металлических термопарах одним из проводников часто служит платина, а вторым - хромель (сплав, содержащий 90% никеля и 10%

хрома) или сплав 90% платины и 10% родия, в полупроводниковых термопарах - кремний.

Металлические и полупроводниковые **терморезисторы** (или **термометры сопротивления**) также применяют для измерения температуры, используя температурную зависимость их электрического сопротивления.

Большинство химически чистых металлов обладает положительным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), находящимся (в интервале 0-100°C) в пределах от 0,35 до 0,68 процентов/К. Наилучшим материалом для изготовления высокоточных и высокостабильных так называемых термометров сопротивления считается платина. Благодаря своей дешевизне широко распространены медные терморезисторы, применяются также вольфрамовые и никелевые термометры сопротивления.

Итак, любезный мой читатель, теперь ты знаком с несколькими разновидностями датчиков с различными физическими принципами преобразования всевозможных неэлектрических величин в «активные» (электрический ток, ЭДС, электрическое напряжение) и «пассивные» (изменения сопротивления, емкости, индуктивности, взаимной индуктивности) электрические величины. Что же общего у рассмотренных нами разновидностей датчиков (независимо от их конструктивного исполнения)? Что их «роднит»?

Оказывается, таким «родовым признаком» является необходимость осуществления контакта, воспринимающего воздействие измеряемой неэлектрической величины элемента датчика с объектом измерения (за редкими исключениями, например, пирозлектриков, к которым мы еще вернемся в дальнейшем). Следствием такого контактного восприятия воздействия измеряемой неэлектрической величины явилось **непосредственное** в большинстве случаев ее преобразование (т.е. без промежуточных преобразований) в отображающую ее электрическую величину.

Однако существует несколько областей измерений, охватываемых общим для них понятием радиометрии - измерений энергетических величин, характеризующих излучение. Об излучении уже упоминалось в предыдущем разделе, но лишь об излучении нагретого тела. Вместе с тем читателю наверняка хорошо известно, что электромагнитное излучение характеризуется широчайшим спектром, охватывающим гамма- и рентгеновское излучение по «левую» границу спектра и длинноволновый его участок «справа», где, в частности, располагается и хорошо известное читателю излучение промышленной частоты 50 Гц. В средней же части этого спектра расположено оптическое излучение, которое, в свою очередь, делится на три спектральных поддиапазона: ультрафиолетовое (УФ) излучение, граничащее с рентгеновским излучением; видимое (световое) излучение; инфракрасное (ИК) излучение, граничащее с миллиметровым диапазоном радиоволн. (Кстати, тепловое излучение занимает один из поддиапазонов спектра инфракрасного излучения.)

Попробуем «связать» между собой и количественно оценить понятия спектра и длины волны (точнее, диапазона длин волн, занимаемого спектром). Слово «спектр» (от латинского spectrum - представление, -образ) означает совокупность всех значений какой-либо физической величины, характеризующей систему или процесс.; Чаще всего пользуются понятиями **частотного спектра колебаний**, характеризуя его диапазоном частот, в котором значения величины отличны от нуля. Однако «равноправным» понятием считается и диапазон длин волн, поскольку для электромагнитного излучения известна связь длины волны  $\lambda$  [м] и частоты  $f$  [Гц]:  $c = \lambda \cdot f$ , где  $c \sim 3 \cdot 10^8$  м/с - скорость распространения электромагнитной волны в вакууме.

Оказывается, что спектр электромагнитного излучения охватывает более 16 порядков - от  $\lambda < 2 \cdot 10^{-10}$  м для гамма-излучения до  $\lambda \sim 6000$  км для излучения на промышленной частоте.

Разумеется, для каждого спектрального поддиапазона (или интервала длин волн) электромагнитного излучения разработаны и | применяются

измерительные преобразователи (датчики) величин, характеризующих те или иные свойства объекта измерения. Им может являться источник излучения или вещество (материал, среда), с которым оно взаимодействует. Здесь важно лишь отметить, что интерес при решении измерительной задачи представляют **характеристики излучения**, а это означает, что датчик «контактирует» именно с **потоком излучения**, часто именуемым **лучистым потоком**. Слово «контактирует» не случайно заключено в кавычки, поскольку подобные измерения на самом деле являются бесконтактными. Более того, в отличие от рассмотренных непосредственных преобразований далее нам встретятся как минимум последователь-<sup>1</sup>ные преобразования излучательной характеристики (величины) в электрический измерительный сигнал.

Подводя итоги этим вступительным к следующим двум обширным главам комментариям, отдадим предпочтение лишь датчикам, преобразующим оптические величины. Выбор сделан нами не случайно, поскольку методы и средства именно этой области измерений, получившей название **оптической радиометрии**, получили широчайшее распространение в наисовременнейших системах измерений, диагностики, неразрушающего контроля и даже распознавания образов. Во всех трех поддиапазонах спектра (УФ, видимом и ИК) оптического излучения мы встретимся как с преобразователями < оптических величин непосредственно в электрические величины, так и с промежуточными преобразователями оптических величин тоже в оптические величины, но с другими интенсивностными, временными, спектральными и пространственными характеристиками.

## ОПТИКО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ

Пока мы имели дело с датчиками линейно-угловых, всевозможных механических и даже тепловых величин, читателю, изучавшему школьный курс физики в «срединных» (не в младших и не в последнем, 10-м, классе), классах, понятными должны были быть рассматривавшиеся в предыдущих главах книги измерительные задачи: воспринимающий измеряемую (преобразуемую) физическую величину элемент датчика (обычно именуемый чувствительным элементом) соприкасается с объектом измерения, в результате чего на выходе датчика наблюдается и тем или иным способом регистрируется приращение активной или пассивной электрической величины.

С пассивной электрической величиной ( $\Delta R$ ,  $\Delta L$ ,  $\Delta C$  или  $\Delta M$ ) все достаточно ясно и просто: промышленность выпускает в широкой номенклатуре автоматические измерительные мосты постоянного и переменного тока; остается лишь правильно подключить выходные зажимы датчика и зарегистрировать полученный результат. Еще проще с активной величиной, так как имеется большое количество разнообразных электроизмерительных приборов типа милливольтметров, аналоговых и цифровых вольтметров, амперметров и миллиамперметров, мультиметров (приборов для измерений нескольких электрических величин с переключаемыми диапазонами измерений). Здесь важно правильно подобрать прибор по виду тока (постоянный или переменный), диапазону измерений, рабочей частоте (если измерения выполняются на переменном токе).

Попробуем теперь сформулировать общий признак, характеризующий процедуру восприятия и преобразования рассмотренными типами датчиков физических величин. Назовем этот признак **локализованностью**



**преобразования**, хотя термин подобного рода пока не существовал и, следовательно, не был узаконен. Что это означает? По существу, речь идет о так называемых одноточечных измерениях, когда одним датчиком с чувствительным элементом относительно небольшого размера осуществляется преобразование измеряемой величины в ограниченной (локализованной) зоне взаимодействия этого чувствительного элемента с объектом измерения. Разумеется, зону эту точкой именуют достаточно условно. Если же объект протяженный или имеет большую площадь и требуется выполнить измерения во многих «точках» (т.е. локализованных зонах), то применяют соответствующее количество датчиков, а измерения носят название **многоточечных**.

Возникает вопрос: с каким объектом измерения приходится взаимодействовать датчику, если речь идет об оптическом излучении? Со времен М.Фарадея, знаменитого английского физика, считается, что оптическое излучение - это реальный физический объект, распределенный в пространстве, поскольку речь идет о так называемом свободном электромагнитном поле (разумеется, в упоминавшемся ранее оптическом диапазоне спектра), т.е. об электромагнитных волнах, представляющих собой электромагнитные колебания, распространяющиеся в пространстве с конечной скоростью (в вакууме - со скоростью света).

Поэтому прежде чем рассматривать датчики оптических величин, необходимо кое-что рассказать об объекте измерения и измерительных задачах.

#### **4.1. Оптическое излучение как объект измерения.**

##### **Измерительные задачи**

Начнем рассмотрение объекта измерения с любого источника излучения. Не имеет значения, является ли он естественным (например, Солнце) или искусственным (лампа, нагретое тело, светоизлучающий диод или лазер). Для нас представляют интерес физические величины, характеризующие именно те или иные свойства излучения источника и

подлежащие восприятию соответствующим датчиком. Такой объект, являющийся источником излучения, будем считать **самоизлучающим**. Он «поставляет» датчику некоторое количество электромагнитной энергии в виде **потока оптического излучения**, имеющего физический смысл переносимой электромагнитными волнами средней мощности и именуемого в дальнейшем **поток излучения** или **лучистым потоком**, а иногда для краткости просто **потоком**.

Вместе с тем существует огромное количество различных материалов, веществ и сред, прозрачных или не прозрачных для оптического излучения, оптические свойства которых либо сами по себе представляют интерес, либо по ним судят о неоптических свойствах и характеристиках объектов. Для того чтобы «проявить» эти оптические свойства, нужно направить на объект измерения поток само- излучающего источника, именуемый **первичным потоком**, а датчик должен воспринять отраженный объектом измерения и/или прошедший сквозь него **вторичный поток**.

Как первичный, так и вторичный поток распространяются в пространстве в пределах телесных углов от сотых долей до 4л стерадиана. Поэтому без применения специальных измерительных преобразователей здесь нельзя говорить о локализованное™ преобразования, поскольку измеряемая величина распределена в пространстве, а чувствительный элемент датчика «выхватывает» только ту часть этой величины, которая находится в «поле его зрения». Чтобы получить значение всей величины, нужно просуммировать результаты этих «точечных» преобразований, «пройдясь» суммирующим устройством по всем значениям в пределах заданного угла. При этом «шаги» (или дискретность), отделяющие одно «точечное» преобразование от другого, должны быть соотнесены с длиной волны излучения и размером чувствительного элемента датчика. Во всем оптическом диапазоне длин волн этот размер соизмерим или существенно превышает длину волны.

Кстати, а каковы длины волн для различных участков оптического

спектра? В целом оптическое излучение охватывает диапазон длин волн от  $\sim 1$  нм ( $10^{-9}$  м) до  $\sim 1$  мм ( $10^3$  м). При этом длины волны от  $\sim 1$  нм до  $\sim 380$ — $400$  нм принадлежат УФ излучению. В пределах от  $\sim 380$ — $400$  нм до  $\sim 760$ — $780$  нм расположено **видимое излучение**, часто в обиходе именуемое светом, а поток излучения — соответственно световым потоком. Кстати, и все остальные оптические величины в этом диапазоне длин волн именуется световыми величинами. Далее свыше  $\sim 760$ — $780$  нм до  $\lambda = 1$  мм простирается ИК излучение. Все оптические величины в УФ и ИК диапазонах длин волн называются энергетическими величинами.

Насколько проще нам было разобраться с электрическими величинами: что называется, «раз-два, и обчёлся...». Совсем не так в оптике, и нам предстоит в этом разобраться, иначе о датчиках говорить бессмысленно.

Начнем с величин, характеризующих интенсивность излучения, распространяющегося в свободном пространстве (в вакууме или в обычном воздухе). Как уже упоминалось, эти величины делятся на энергетические и световые. Часто первые из них снабжают подстрочным латинским индексом «*e*», а вторые - тоже латинским подстрочным индексом «*v*».

### ***Оптические величины, характеризующие интенсивность излучения***

Основной величиной, характеризующей интенсивность оптического излучения, является его поток ( $\Phi_e$  или  $\Phi_v$ ), причем в УФ и ИК диапазонах часто пользуются синонимом этой величины - мощностью  $P$  излучения. Световой поток  $\Phi_v$ , воспринимается глазом, поэтому и излучение в этом диапазоне длин волн называется видимым. Следовательно, как это ни парадоксально звучит, но глаз - это датчик, причем весьма сложный, но субъективный орган восприятия и преобразования световой величины. (В отличие от физического приемника излучения, являющегося объективным органом.)

Мы уже говорили о том, что поток распределен в пространстве и

приходится вводить в рассмотрение чрезвычайно важные «интенсивностные» величины, связанные с потоком определенными геометрическими соотношениями. Для УФ и ИК диапазонов, где поток излучения измеряется в **ваттах** [Вт], эта величина определена как облученность (энергетическая освещенность) и измеряется в ваттах на квадратный метр [Вт/м<sup>2</sup>]. В видимом диапазоне та же величина именуется **освещенностью**, поскольку световой поток измеряется в **люменах** [лм], то единицей измерения освещенности служит люмен на квадратный метр [лм/м<sup>2</sup>].

Таким образом, облученностью (освещенностью) называется плотность (т.е. величина, приходящаяся на единицу поверхности) лучистого (светового) потока по облучаемой (освещаемой) поверхности. Единица измерения облученности не имеет специального названия, а единица измерения освещенности называется **люксом** [лк].

Символом облученности (освещенности) служит  $E_e$  (E), а в формульном выражении  $E_e = \Phi_e / A$  ( $E_v = \Phi_v / A$ ), где  $A$  – площадь облучаемой (освещаемой) поверхности.

Внимательный читатель замечил, очевидно, что мы назвали поток основной величиной. Это не оговорка. Автор так считает «по справедливости», поскольку именно поток является «основой» для всех интенсивностных величин. Однако история распорядилась иначе. Ведь в средние века «светильником» служила в основном свеча, а характеристикой эффективности освещения ею окружающего пространства являлась сила света!

Поэтому именно эта оптическая величина «запала в душу» светотехникам и постепенно стала основной величиной, а единица ее измерения - кандела [кд] - одной из семи основных единиц Международной системы (System International). Силой света (аналогичная энергетическая величина - **сила излучения или энергетическая сила света**) принято называть пространственную плотность светового потока в заданном

направлении (то же относится и к лучистому потоку применительно к силе излучения). Сила света (излучения) определяется отношением светового (лучистого) потока  $d\Phi_v$  ( $d\Phi_e$ ) к телесному углу  $d\Omega$ , в пределах которого заключен и равномерно распределен этот поток.

**Примечание:** Поскольку при использовании датчиков стараются предельно ограничить зону восприятия ими излучения, приближаясь к исчезающе малому элементу поверхности, в рассмотрение вводятся элементы потока  $d\Phi$  и телесного угла  $d\Omega$ .

$$\text{Тогда } I_v = d\Phi_v / d\Omega [лм \cdot ср^{-1}] ; I_e = d\Phi_e / d\Omega [Вт \cdot ср^{-1}]$$

«Третий кит», на котором зиждется группа интенсивностных величин, зависящих от потока и параметров пространства, в котором он распространяется (направленность и телесный угол), называется **яркостью (энергетической яркостью)**. (Здесь придется читателю «включить» пространственное воображение с помощью рис.

4.1, где показаны направления наблюдения под углами  $\alpha$  в двух разных меридиональных плоскостях  $\beta = 0$  и  $\beta \neq 0$ .)

Это означает, что яркостью (энергетической яркостью) любого элементарного участка светящей (излучающей) поверхности является отношение силы света  $dI_{v_{\alpha,\beta}}$  ( $dI_{e_{\alpha,\beta}}$ ) светящего (излучающего) элемента  $dA$  к площади его проекции  $\cos\alpha \cdot dA$  на-плоскость, перпендикулярную заданному направлению  $\alpha, \beta$ , т.е.

$$L_{v_{\alpha,\beta}} = \frac{dI_{v_{\alpha,\beta}}}{\cos\alpha \cdot dA} [кд / м^2] ; L_{e_{\alpha,\beta}} = \frac{dI_{e_{\alpha,\beta}}}{\cos\alpha \cdot dA} [Вт / ср \cdot м^2]$$

Таким образом, интенсивность оптического излучения характеризуется его потоком (мощностью) или величинами, связанными с потоком так называемым геометрическим фактором  $G$ , который для силы света, яркости и освещенности введен, чтобы стандартизовать не только определения этих величин, но и «геометрию их измерения», т.е.

соотношения между размерами излучающей поверхности

#### Литература

1 Котюк А.Ф. Датчики в современных измерениях. – М.: Радио и связь, Горячая линия-телеком, 2006 – 96 с.