

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА»**

ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ

Ю.В.Волков

**СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО
ДИАГНОСТИРОВАНИЯ, АВТОМАТИЧЕСКОГО
УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ**

Часть 1

Учебное пособие

Санкт-Петербург

2016

УДК 62-5 (075)
ББК 32.965я7
В 676

Волков Ю.В.

Системы технического диагностирования, автоматического управления и защиты: учебное пособие. Часть 1 / ВШТЭ СПбГУПТД. СПб., 2016.-115 с.: ил. 35.

В учебном пособии рассмотрены методы диагностирования технических объектов, методы и средства измерений диагностических параметров, уделено внимание вопросам выбора первичных преобразователей и создания информационных систем.

Учебное пособие предназначено для студентов всех форм обучения по направлению подготовки 13.04.01 “Теплоэнергетика и теплотехника”. Может представлять интерес для специалистов, занимающихся разработкой и эксплуатацией автоматизированных систем контроля и управления, а также для преподавателей, аспирантов и студентов технических высших учебных заведений.

Рецензенты: канд. техн. наук, начальник кафедры электромеханической службы Военного института дополнительного профессионального образования ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия им. Н.Г. Кузнецова» Д.И. Коваленко
канд. техн. наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики ВШТЭ СПбГУПТД С.Н. Смородин

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД в качестве учебного пособия.

©Высшая школа технологии и энергетики
СПбГУПТД, 2016
©Волков Ю.В., 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1. Основы технического диагностирования	5
1.1. Стратегии технического обслуживания и ремонта	5
1.2. Задачи технического диагностирования	8
1.3. Виды технических состояний	10
1.4. Виды дефектов	12
2. Методы технического диагностирования	19
2.1. Классификация методов технического диагностирования	19
2.2. Методы получения информации.....	22
2.3. Методы обработки информации	35
3. Измерения – основа диагностики.....	50
3.1. Измерения физических величин	50
3.2. Виды измерений	52
3.3. Методы измерений	54
3.4. Погрешность измерения	56
3.5. Исключение систематических погрешностей.....	63
4. Средства измерений	66
4.1. Классификация средств измерений.....	66
4.2. Метрологические характеристики средств измерений	75
4.3. Поверка и сертификация средств измерений.....	79
5. Первичные измерительные преобразователи	82
5.1. Параметрические измерительные преобразователи	83
5.2. Генераторные измерительные преобразователи	94
6. Измерительные системы	103
6.1. Классификация измерительных систем	103
6.2. Структуры ИИС	108
Библиографический список	111

ВВЕДЕНИЕ

Появление первых машин поставило задачу контроля технического состояния для определения рациональных сроков и видов ремонта. Эта задача первоначально решалась путем контроля температуры, наблюдением за изменением вибрации и анализа шумов механизмов. В основном использовались органолептические методы. Осуществлялся контроль специалистами высокой квалификации с многолетним практическим опытом, оснащенными простейшими приспособлениями. В дальнейшем, при внедрении системы планово-предупредительных ремонтов (ППР), этот опыт был использован при составлении правил технической эксплуатации. Система ППР ориентировала ремонтные службы на поддержание безаварийной работы оборудования путем принудительной замены узлов в среднестатистические сроки. Часто это не приводило к желаемым результатам и увеличивало затраты на содержание оборудования [1].

Исследования надежности работы энергетического оборудования, приведенные в [2, 3], проведенные в 70÷80-х гг. XX века, показали значительный разброс в сроках службы однотипных элементов. Это доказало необходимость определения фактического состояния конкретного узла безразборными методами технической диагностики для эффективного управления надежностью оборудования на этапе эксплуатации.

В 1990-х гг. становится очевидной необходимость перехода на обслуживание технических средств по фактическому состоянию, что сулит значительную экономию средств, затрачиваемых на обеспечение работоспособного состояния оборудования. Опыт применения средств технического диагностирования на отдельных предприятиях позволил добиваться высокой экономической эффективности [4, 5]. Поэтому в XXI веке передовые производства оснащаются автоматизированными информационно-измерительными системами, а технические изделия – встроенными средствами технического диагностирования.

1. Основы технического диагностирования

1.1. Стратегии технического обслуживания и ремонта

Рассмотрим существующие стратегии технического обслуживания и ремонта, достоинства и недостатки каждой с учетом использования методов оценки текущего состояния.

Стратегия ремонтов после отказа применяется в случае использования многочисленных недорогих машин, с дублированием каждого ответственного участка технологического процесса. Механическое оборудование эксплуатируется до выхода из работоспособного состояния — до отказа. Затраты на техническое обслуживание в этом случае минимальны. Возникающие отказы часто непредсказуемы и приводят к существенным затратам на их ликвидацию.

Данная стратегия используется для недорогого вспомогательного оборудованию, имеющего резервирование. В этом случае замена механизма дешевле, чем затраты на ремонт и обслуживание. В отсутствие резервирования на время ремонта производственный процесс приходится останавливать. Часто при эксплуатации оборудования до выхода из строя проводятся периодические измерения вибрационного состояния машины. Это позволяет рационально выбирать время ремонта и своевременно обеспечить подготовку к ремонту.

Стратегия планово-предупредительных ремонтов должна обеспечивать безотказную работу оборудования путем принудительной замены узлов и деталей в сроки, устанавливаемые на основе статистического анализа отказов. Установленное среднее значение норматива заранее предполагает аварийные отказы одних деталей и замену других, не отработавших свой ресурс. Следовательно, данная стратегия не исключает возможность возникновения аварийных отказов.

Фактически оказывается, что не менее 50 % регламентных ремонтных воздействий выполняются без особой необходимости. В некоторых случаях безотказность работы оборудования после технического обслуживания или ремонта снижается, иногда временно, до момента окончания процесса приработки, а иногда постоянно. Снижение показателей надежности обусловлено появлением отсутствовавших до обслуживания дефектов монтажа. Проведение необоснованных ремонтов может являться причиной отказов в результате дефектов монтажа.

Стратегия ремонтов по состоянию. По этой стратегии обслуживания состояние машин и механизмов контролируется периодически или в зависимости от результатов диагноза и прогноза технического состояния. Ремонт проводится в оптимальные сроки, в необходимом объеме. Основой для этого служит знание фактического состояния механизма. Это позволяет минимизировать объем ремонтов и обеспечить безаварийную работу. Эффективность применения стратегии определяется снижением объемов ремонтов, повышением безотказности работы оборудования за счет своевременного технического обслуживания.

На основании информации о техническом состоянии решаются следующие задачи: определение рациональных сроков и объемов ремонта; выявление механизма с наихудшими параметрами, требующего немедленной замены; оценка качества проведенного ремонта; оценка состояния и качества монтажа нового оборудования. Эффективность решения этих задач обеспечивается за счет ремонта наиболее изношенного оборудования, ликвидации ошибок монтажа и контроля состояния оборудования, вступающего в эксплуатацию после ремонта.

Виды стратегий технического обслуживания и ремонта могут быть разделены на реактивные и активные [6] (табл. 1.1).

Таблица 1.1. Сравнительная характеристика стратегий технического обслуживания

Наименование стратегии	Сущность	Достоинства	Недостатки
Реактивные			
Ремонт после отказа	Механическое оборудование эксплуатируется до выхода из работоспособного состояния — до отказа	Минимальные затраты на техническое обслуживание	Непредсказуемость возникающих отказов. Значительные затраты по ликвидации последствий отказов
Ремонт по состоянию	Техническое обслуживание и ремонт проводятся в зависимости от фактического состояния машин и механизмов	Ремонт проводится в оптимальные сроки, в необходимом объеме	Отсутствие возможности влиять на сроки и объемы ремонтов оборудования. Нестабильность загруженности ремонтной службы
Активные			
Планово-предупредительные ремонты	Принудительная замена узлов и деталей в сроки, устанавливаемые на основе статистического анализа отказов	Повышение безотказности работы оборудования	Значительные затраты на техническое обслуживание и ремонты. Замена работоспособных элементов
Активная стратегия ремонтных воздействий	Выявление и устранение отклонений и неисправностей в работе механизмов	Снижение объемов ремонтов и увеличение срока службы оборудования	Нет

Реактивные стратегии в той или иной форме отвечают на изменение технического состояния. Соответственно — это ремонт после отказа либо ремонт по состоянию, когда оборудование достигнет предела возможного использования. В этом случае имеется возможность одновременного отказа нескольких механизмов, тогда необходимость в ремонтных работах превысит возможности ремонтной службы, что может привести к остановке технологического процесса.

Активные стратегии влияют на состояние оборудования до возникновения необходимости ремонта путем предупредительной замены узлов и

деталей либо устранением отклонений и неисправностей в работе механизмов [6]. Принудительная замена деталей и узлов (например, замена уплотнений при ремонтах, замена двух подшипников вала) не всегда экономически оправдана, однако повышает безотказность работы оборудования. Проблематичным в данном случае является выбор рациональных сроков и объемов заменяемых деталей. Если техническое состояние оборудования известно, появляется возможность снизить объемы ремонтов и увеличить срок службы оборудования. Это осуществляется путем выявления и устранения дефектов и повреждений, приводящих к снижению ресурса.

Знание фактического состояния объекта создает принципиально новые предпосылки управления работоспособным состоянием оборудования, существенно меняет стратегию ремонтных служб, ориентируя ее не только на своевременную замену, но и на преобладание качественного технического обслуживания. Это позволяет сформулировать целевую функцию деятельности ремонтной службы как стабилизацию технического состояния оборудования в рассматриваемом временном интервале.

Получаем следующую **постановку задачи**: при известных законах изменения технического состояния необходимо обеспечить минимальное изменение в техническом состоянии механизма путем выполнения рациональных ремонтных воздействий. По отношению к обслуживанию оборудования цеха промышленного предприятия возникают ограничения, связанные с постоянным объемом выполняемых ремонтных работ и требованием качественного проведения ремонтов. Решение данной задачи в такой постановке позволяет снизить затраты на техническое обслуживание и ремонт оборудования до минимально возможного уровня.

1.2. Задачи технического диагностирования

Техническая диагностика — область знаний о распознавании состояния

технических систем (объектов), исследующая формы проявления технического состояния, разрабатывающая методы и средства его определения [7].

Задачами технической диагностики как науки являются:

- определение технического состояния объекта диагностирования в условиях ограниченной информации;
- изучение методов и средств получения диагностической информации;
- разработка алгоритмов автоматизированного контроля, поиска дефектов;
- минимизация затрат на постановку диагноза.

Техническая диагностика изучает методы получения и оценки диагностической информации, диагностические модели и алгоритмы принятия решений. Техническая диагностика базируется на двух теориях: теории распознавания и теории контролепригодности (рис. 1.1).

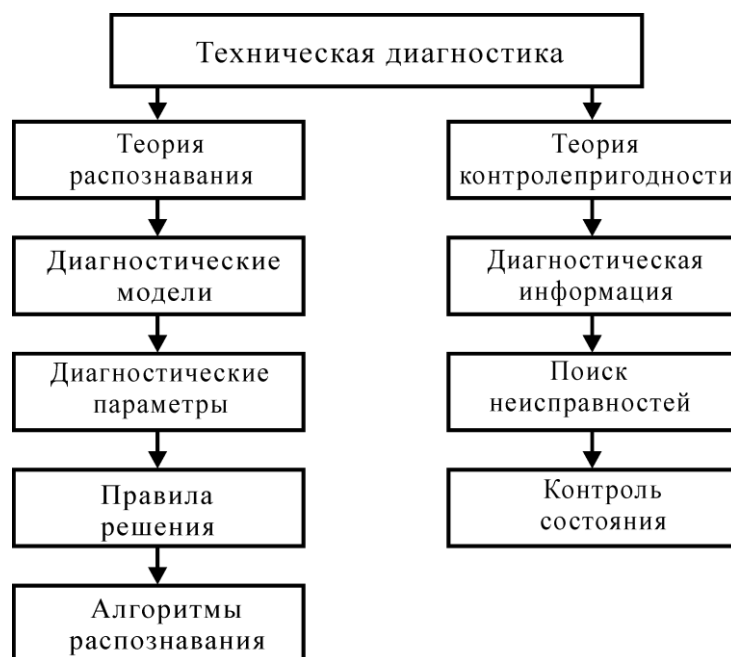


Рис. 1.1. Структура технической диагностики

Теория распознавания, используя диагностические модели при исследовании объекта, определяет решающие правила для распознавания текущего состояния и вида неисправности. Благодаря известным характери-

кам неисправностей появляется возможность разработки оптимальных алгоритмов (последовательности) распознавания.

Теория контролепригодности решает вопросы рациональной последовательности поиска отказавшего или неисправного элемента, контроля состояния объекта. Решения базируются на использовании диагностической информации, характеризующей состояние объекта.

Контролепригодность — приспособленность объекта к измерению диагностических параметров средствами диагностирования, свойство изделия обеспечивать достоверную оценку технического состояния (ТС) и раннее обнаружение неисправностей и отказов. Контролепригодность создается конструкцией изделия и принятой системой технического диагностирования [7].

ТС определяется наличием и развитием в объекте дефектов.

Целью технического диагностирования (ТД) является обеспечение безопасности, поддержание надёжности и эффективности работы технического объекта, а также сокращение затрат на его техническое обслуживание и уменьшение потерь от простоев в результате отказов и преждевременных выводов в ремонт.

Для достижения этой цели ТД решает задачи, которые определены в [16] и которые принято считать **задачами технического диагностирования**, а именно:

- контроль технического состояния;
- поиск места и определение причин отказа (неисправности);
- прогнозирование технического состояния.

1.3. Виды технических состояний

Основным понятием в технической диагностике является **техническое состояние** — совокупность признаков (параметров), характеризующих изменение свойств объекта в процессе эксплуатации [8]. Различают следующие

виды технических состояний: исправное и неисправное, работоспособное и неработоспособное [9, 10] (рис. 1.2).



Рис. 1.2. Виды технических состояний

Исправное состояние характеризуется соответствием объекта всем требованиям, установленным нормативно-технической документацией. Если объект не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической документации — состояние характеризуется как **неисправное**.

Работоспособное состояние определяется выполнением всех заданных функций процесса в границах заданных параметров. Неработоспособное состояние наступает при невыполнении одной из заданных функций или при выходе параметров процесса за заданные границы.

Дополнительно, для электромеханических систем, определяют понятие **правильности функционирования** — способность объекта выполнять в текущий момент времени предписанные алгоритмы функционирования со значениями параметров, соответствующими установленным требованиям.

В зависимости от необходимости проведения технического обслуживания и ремонта различают следующие **категории ТС**:

- **хорошее** — техническое обслуживание и ремонт не требуются;
- **удовлетворительное** — осуществляется техническое обслуживание и ремонт в соответствии с планом;

– **плохое** — проводится внеочередное техническое обслуживание или ремонт;

– **аварийное** — требуется немедленная остановка и ремонт [8].

В некоторых случаях регламентируют хорошее, плохое и аварийное состояния.

1.4. Виды дефектов

1.4.1. Понятие производственного брака

Производственный брак — продукция, *отбираемая* на стадии производства, не удовлетворяющая установленным требованиям. Передача такой продукции потребителю не допускается из-за наличия дефектов [11].

ISO 9000 рекомендует использовать вместо брака понятие *несоответствие* [12].

Основные требования устанавливаются законодательными актами страны, стандартами, нормативно-технической документацией предприятия или иными аналогичными регламентирующими документами.

Наличие дефекта означает, что действительное значение параметра (например, L_d) не соответствует заданному нормированному значению параметра. Следовательно, условие отсутствия брака определяется следующим неравенством

$$d_{\min} \leq L_d \leq d_{\max}, \quad (1.1)$$

где $d_{\min}$, $d_{\max}$ — наименьшее и наибольшее предельно-допустимые значения параметра, задающие его допуск.

Перечень, вид и предельно допустимые значения параметров, характеризующих дефекты, определяются *показателями качества* продукции и данными, приведёнными в нормативно-технической документации предприятия на изготавливаемую продукцию [11].

Различают *исправимый производственный брак* и *окончательный производственный брак*. К исправимому относится продукция, которую технически возможно и экономически целесообразно исправить в условиях предприятия-производителя; к окончательному — изделия с дефектами, устранение которых технически невозможно или экономически невыгодно. Такие изделия подлежат утилизации как отходы производства либо реализуются изготовителем по цене значительно ниже, чем такое же изделие без брака (*уценённый товар*¹).

По времени выявления производственный брак продукции может быть *внутренним* (выявленным на стадии производства или на заводском складе) и *внешним* (обнаруженным покупателем или иным лицом, использующим данную продукцию, некачественный товар).

Следует иметь в виду, что товар, признанный потребителем некачественным, формально таковым может и не быть. Это связано с расхождением в понимании, что считается дефектом по мнению покупателя (субъективное мнение), и что — в соответствии с нормативно-технической документацией предприятия (официально).

1.4.2. Классификация дефектов

Дефектом является каждое отдельное несоответствие продукции установленным требованиям, а продукция, имеющая хотя бы один дефект, называется **дефектной** (*браком, бракованной продукцией*). Бездефектная продукция считается *годной*.

¹ Уцененный товар — товар (продукция), стоимость которого значительно снижена продавцом по причине дефектности товара: наличие производственного брака в данном изделии (партии изделий), повреждение товара при транспортировке/хранении, истечение срока годности товара. Как правило, при продаже уцененных товаров продавец и покупатель обязаны заранее оговорить дефекты, присутствующие в товаре, и документально зафиксировать данную договоренность. На данные оговоренные дефекты гарантия производителя/продавца не распространяется. Тем не менее, на остальные потребительские свойства товара гарантия действует в соответствии с [13] (Статья 470. Гарантия качества товара).

Классификации, исчерпывающей все разновидности дефектов до сих пор еще не создано. Прежде всего, задача осложняется тем, что дефекты трудно разграничить на неизбежные и такие, которых можно избежать.

Очевидно, было бы целесообразно разграничить дефекты на две группы (как это делают немецкие специалисты): производственные и эксплуатационные [14].

По такой классификации к первой группе относятся дефекты, вызванные усталостными разрушениями вследствие недостаточной конструктивной прочности деталей или нарушениями технологии изготовления и сборки.

Ко второй группе, значительно более многочисленной, относятся дефекты, вызванные недостаточным уходом, неправильным обслуживанием и нарушением инструкций по эксплуатации.

Существующая классификация дефектов согласно [11] позволяет разделить дефекты на виды:

1) явный – дефект, для выявления которого в нормативной документации, обязательной для данного вида контроля, предусмотрены соответствующие правила, методы и средства;

2) скрытый – дефект, для выявления которого в нормативной документации, обязательной для данного вида контроля, не предусмотрены соответствующие правила, методы и средства;

3) критический – дефект, при наличии которого использование продукции по назначению практически невозможно или недопустимо;

4) значительный – дефект, который существенно влияет на использование продукции по назначению и (или) на ее долговечность, но не является критическим;

5) малозначительный – дефект, который существенно не влияет на использование продукции по назначению и ее долговечность.

1.4.3. Понятие отказа

Отказ – нарушение работоспособности объекта, при котором система или элемент перестает выполнять целиком или частично свои функции [9].

Классификация и характеристики отказов

Основные классификационные признаки отказов:

1. Тип отказа:

- функциональный (выполнение основных функций объектом прекращается, например, поломка зубьев шестерни);
- параметрический (некоторые параметры объекта изменяются в недопустимых пределах, например, потеря точности станка).

2. Природа отказа:

- случайный, обусловленный непредусмотренными перегрузками, дефектами материала, ошибками персонала или сбоями системы управления и т.п.;
- систематический, обусловленный закономерными и неизбежными явлениями, вызывающими постепенное накопление повреждений: усталость, износ, старение, коррозия и т.п.

3. Характер возникновения:

- внезапный — отказ, характеризующийся быстрым (скачкообразным) изменением значений одного или нескольких параметров объекта, определяющих его качество;
- постепенный — отказ, характеризующийся медленным (постепенным) изменением параметров объекта.

4. Причина возникновения:

- конструкционный отказ, вызванный недостатками и неудачной конструкцией объекта;
- производственный отказ, связанный с ошибками при изготовлении объекта по причине несовершенства или нарушения технологии;

- эксплуатационный отказ, вызванный нарушением правил эксплуатации.

5. Характер устранения:

- устойчивый отказ;
- перемежающийся отказ (возникающий/исчезающий).

6. Последствия отказа:

- лёгкий отказ (легкоустранимый);
- средний отказ (не вызывающий отказы смежных узлов — вторичные отказы);
- тяжёлый отказ (вызывающий вторичные отказы или приводящий к угрозе жизни и здоровью человека).

7. Дальнейшее использование объекта:

- полные отказы, исключающие возможность работы объекта до их устранения;
- частичные отказы, при которых объект может частично использоваться.

8. Легкость обнаружения:

- очевидный (явный) отказ;
- скрытый (неявный) отказ — не обнаруживаемый визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования, но выявляемый при проведении технического обслуживания или специальными методами диагностики.

9. Время возникновения:

- приработочные отказы, возникающие в начальный период эксплуатации;
- отказы при нормальной эксплуатации;
- износосовые отказы, вызванные необратимыми процессами износа деталей, старения материалов и пр.

У объектов, функционирующих не постоянно во времени, отказы могут быть следующих видов:

- отказ срабатывания, заключающийся в невыполнении объектом требуемого срабатывания;
- ложное срабатывание, заключающееся в срабатывании при отсутствии требования;
- излишнее срабатывание, заключающееся в срабатывании при требовании срабатывания других элементов.

Наряду с отказом различают также **повреждения**. Несущественное повреждение не нарушает работоспособность (например, перегорела сигнальная лампа). Существенное же повреждение есть отказ.

По характеру исполнения и функционирования (в зависимости от ремонтпригодности) элементы (объекты) могут быть восстанавливаемые и невосстанавливаемые. Если при отказе объект либо не подлежит, либо не поддается восстановлению, то он является невосстанавливаемым. Невосстанавливаемые объекты работают только до первого отказа.

Как известно, наличие дефекта или повреждения еще не означает того, что произойдет отказ, но любой отказ происходит только при наличии дефектов или возникновении повреждений.

Систематический контроль и диагностирование состояния элементов машин и механизмов, определение характера и величины износа деталей, обнаружение незначительных повреждений позволяют принять своевременные меры и устранить отказы, когда это еще возможно. Контроль и диагностирование способствуют сохранению элементов машин и механизмов для дальнейшей работы, увеличению срока их службы и сохранению механизма в целом.

Необходимо отметить, что определение отказавшего элемента весьма важно как с точки зрения решения организационно-технических вопросов,

так и с экономической стороны. Одной из важных сторон этого процесса является организация сбора информации. Эта задача решается ведением рекламационной и претензионно-исковой работы, представлением отчетов по техническому состоянию, а также путем дефектации и изучения отказов при нахождении в ремонте.

2. Методы технического диагностирования

2.1. Классификация методов технического диагностирования

Решение задач диагностирования связано с определенными трудностями, о которых будет изложено в дальнейшем. При этом возникает необходимость осветить некоторые методологические аспекты.

Прежде всего, необходимо дать определение понятию “метод технического диагностирования”, поскольку в нормативно-технической документации его нет. В самом общем значении “метод – способ достижения цели, определенным образом упорядоченная деятельность” [15]. Под “техническим диагностированием” понимается определение технического состояния объекта [16]. Под термином “упорядоченный” будем понимать “организованный по установленным правилам” [17]. “Деятельность” определим как “специфическую человеческую форму отношения к окружающему миру, содержание которой составляет его целесообразное изменение в интересах людей; условие существования общества. Деятельность включает в себя цель, средства, результат и сам процесс” [18]. Таким образом:

Метод технического диагностирования – способ (способы), организованный (ые) по установленным правилам в процесс определения технического состояния объекта средствами диагностирования с целью обеспечения безопасности, функциональной надёжности и эффективности работы технического объекта, а также сокращения затрат на его техническое обслуживание и уменьшения потерь от простоев в результате отказов и преждевременных выводов в ремонт.

В настоящее время в научно-исследовательской и технической литературе существуют различные подходы к определению классификационных признаков методов технического диагностирования [19, 20]. Не проводя подробного анализа предлагаемых вариантов, остановимся на наиболее распространенном подходе, в котором предлагается классификация методов

технического диагностирования по следующим признакам, как представлено в табл. 2.1.

Таблица 2.1. Классификация методов технического диагностирования

Классификационный признак	Методы технического диагностирования
По виду диагностических средств	– органолептические (использующие органы человека) – инструментальные (метрологические; объективные)
По назначению	– оперативные – ресурсные
По характеру измерения	– прямые – косвенные
По воздействию на объект диагностирования	– функциональные – тестовые

Методы диагностирования могут быть классифицированы в зависимости от **вида диагностических средств**.

Органолептические методы диагностирования включают в себя обслуживание, осмотр, проверку осязанием и обонянием.

Обслуживанием выявляют места и характер ненормальных стуков, шумов, перебоев в работе двигателя, отказов в трансмиссии и ходовой системе (по скрежету и шуму), неплотность (по шуму прорывающегося воздуха) и т.п.

Осмотром устанавливают места подтекания воды, масла, топлива, цвет отработавших газов, дымления из сапуна, биение вращающихся частей, натяжение цепных передач и т.п.

Осязанием определяют места и степень ненормального нагрева, биения, вибрации деталей, вязкость, липкость жидкости и т.п.

Обонянием выявляют по характерному запаху отказ муфты сцепления, течь топлива, электролита и др.

Инструментальные, или объективные, методы применяют для измерения и контроля всех параметров технического состояния, используя при этом диагностические средства.

По назначению методы диагностирования подразделяются на **оперативные**, предназначенные для измерения параметров состояния, характе-

ризирующих функциональные свойства составных частей и агрегатов, и **ресурсные**, предназначенные для определения остаточного ресурса диагностируемых узлов и агрегатов машины.

По характеру измерения параметров методы диагностирования машин подразделяются на прямые и косвенные.

Прямые методы основаны на измерении структурных параметров технического состояния непосредственно прямым измерением: зазоров в подшипниках, прогиба цепных и ременных передач, размеров деталей и т.д.

Из-за своей простоты прямые методы нашли широкое практическое применение при контроле и регулировании механизмов и устройств расположенных снаружи агрегатов машины, доступных и удобных для проверки, не требующих разборки механизмов (приводные механизмы, режущие аппараты комбайнов, ходовая часть, рулевое управление, тормозная система и др.). Применение прямых методов измерения находящихся внутри агрегатов (цилиндро-поршневая группа (ЦПГ), подшипниковые узлы коленчатого вала двигателя) ограничено большой трудоемкостью и необходимостью разборки агрегата.

Косвенные методы диагностирования основаны на определении структурных параметров технического состояния агрегатов машин по косвенным (диагностическим) параметрам при установке датчика или диагностического устройства снаружи агрегата без разборки механизмов машины. Косвенные методы основываются на измерении непосредственно физических величин, характеризующих техническое состояние механизмов, систем и агрегатов машин: давление, перепад давления, температура, перепад температуры рабочего тела в системе, расход газа, топлива, масла, параметры вибрации составных частей машин, ускорение при разгоне двигателя и др. Многие методы осуществляются на основе преобразования механических величин в электрические с применением электронных диагностических приборов и установок.

При этом очевидно, что методы технического диагностирования, представленные в табл. 2.1, в соответствии с определением, можно отнести к одной большой группе методов получения информации. А методы, использующие полученную информацию для решения задач диагностирования, отнесем к методам обработки информации. Таким образом, методы технического диагностирования представляют собой набор способов, как представлено на рис. 2.1.



Рис. 2.1. Классификация методов технического диагностирования

2.2. Методы получения информации

2.2.1. Функциональное диагностирование

Под **функциональным диагностированием** понимают определение технического состояния системы путем наблюдения за выполнением возложенных на систему функций [20]. Функциональное диагностирование осуществляется во время функционирования механизма (любого объекта), на который поступает только рабочее воздействие. Примером его могут служить величины хода рычагов и педалей приводов управления механизмами, определение тормозного пути и др. Главное достоинство функционального

диагностирования – отсутствие необходимости в применении специального генератора стимулирующих воздействий. Диагностирование заключается в определении характера необходимой информации, определении точек и момента ее съема, регистрации и обработке полученных данных.

Методы функционального диагностирования могут быть представлены следующими классификационными признаками [21]:

- по алгоритму функционирования;
- по результату функционирования;
- по физическим параметрам.

При диагностировании **по алгоритму функционирования** осуществляется проверка последовательности выполнения всех операций, или их временные интервалы и продолжительность выполнения операций, или то и другое. Выбор метода зависит от характера объекта и особенностей алгоритма функционирования.

По результату функционирования диагностирование осуществляется по реакции на рабочие воздействия, возникающие в процессе эксплуатации. Если объектом диагностирования (ОД) является отдельный оператор (блок, элемент), то функциональное диагностирование осуществляется по результату функционирования отдельного оператора (блока, элемента), оценивая при этом реакцию оператора (блока, элемента) на входное воздействие. В обоих случаях возможны как одномерные, так и многомерные оценки.

В настоящее время известен ряд объективных методов и средств диагностирования работоспособности машины в целом, ее систем и сборочных единиц.

Статопараметрический метод основан на измерении давления и подачи или расхода рабочей жидкости и позволяет оценивать объемный коэффициент полезного действия. Он позволяет определить величину структурного параметра и экономическую целесообразность дальнейшей эксплуа-

тации диагностируемого объекта. Однако для подключения датчиков к сборочным единицам необходимо разъединять трубопроводы и рукава.

Метод амплитудно-фазовых характеристик реализуется с использованием встроенных или накладных датчиков и базируется на анализе волновых процессов изменения давления в напорной магистрали при нагружении рабочего органа и соответственно в сливной при дросселировании рабочей жидкости. Метод широко используется для общей оценки работоспособности объекта с высокой степенью жесткости в нагнетательной магистрали и локализации неисправности.

Временной метод основывается на измерении параметров движения объекта или его рабочего органа в условиях нормированных режимов нагружения. Широко используется при оценке работоспособности гидропривода в целом. Так, время подъема ковша погрузчика от минимального до максимального значения при номинальной частоте вращения коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания (ДВС) характеризует работоспособность гидравлической системы привода рабочего оборудования, а продолжительность перемещения управляемых колес из одного крайнего положения в другое — гидропривода рулевого управления. К достоинствам метода относится возможность использования простых средств измерения, не требующих установки датчиков, но трудно обеспечить необходимую точность из-за сложности повторения необходимого режима.

Силовой метод основан на определении диагностических параметров через усилия на рабочем органе, движителе или крюке. К достоинствам данного метода относится оценка работоспособности объекта в целом на режимах, приближенных к реальным, но для его реализации требуются специальные нагрузочные стенды.

Метод переходных характеристик базируется на анализе явлений, протекающих при неустановившихся режимах работы. Этот метод широко

используется для проверки герметичности пневмо- и гидросистем. Создается необходимое давление и при отключении подачи воздуха или рабочей жидкости по времени падения давления в диагностируемой части системы оценивают работоспособность соответствующих элементов. Перспективен этот метод при оценке технического состояния гидропривода на основании характера волновых процессов, протекающих в системе при перекрытии потока рабочей жидкости. Метод обладает высокой информативностью и может быть реализован с помощью накладных и встроенных датчиков. Однако расшифровка волновых диаграмм весьма сложная задача и требует дорогого оборудования.

При **нефелометрическом методе** сравнивают интенсивность двух световых потоков: рассеянного эталонной жидкостью, не содержащей загрязнений, и жидкостью того же типа, взятой из емкости работающего объекта. Интенсивность рассеянного света пропорциональна концентрации частиц в жидкости и зависит от их оптических свойств, углов падения и рассеивания света. Создаются также приборы, позволяющие осуществлять анализ рабочих жидкостей непосредственно в потоке. Действие этих приборов основано на определении с помощью фотоэлектрического датчика числа и размеров частиц, проходящих вместе с жидкостью через калиброванную щель, которая имеет по бокам прозрачные окна. При проходе каждой частицы загрязнений происходит частичное затемнение фотодиода, в результате на выходе схемы образуется импульс, амплитуда которого соответствует размеру частиц.

По физическим параметрам методы диагностирования делятся на энергетические, пневмогидравлические, тепловые, акустические, спектрографические и некоторые другие.

Каждый метод предназначен для контроля физического процесса и основан на применении определенного явления. Физический процесс характе-

ризуется изменением физической величины во времени. Классификация по использованному физическому процессу позволяет наиболее полно выявлять возможность и техническую характеристику соответствующего метода диагностирования.

Энергетические методы. Методы оценки технического состояния машин по мощностным показателям используют как для общего, так и для углубленного поэлементного диагностирования. В основе методов лежат зависимости эффективности использования машины от технического состояния основных элементов. В качестве диагностических параметров в этом случае используют эффективную мощность двигателя, силу тяги, рабочую скорость, грузоподъемность. В зависимости от характера измеряемых диагностических параметров подбирают соответствующее диагностическое оборудование.

Пневмогидравлические методы. Пневмогидравлические методы диагностирования связаны с оценкой параметров потока жидкости или газа при установившихся режимах течения или подачи. В качестве диагностических параметров чаще всего применяют расход и давление, функционально связанные между собой. Например, в топливомере расход жидкости оценивается по изменению ее давления перед откалиброванным отверстием диафрагмы. Простейшие примеры использования пневмогидравлических методов диагностирования: оценка износа плунжерных пар топливных насосов по утечке топлива; оценка состояния деталей цилиндропоршневой группы по количеству и давлению газов, прорывающихся в картер; контроль герметичности системы охлаждения методом опрессовки и т.п.

Тепловые методы. Методы диагностирования машин по тепловому состоянию имеют более узкую область применения. Их используют в основном для оценки технического состояния элементов двигателей. Поскольку ни один из этих методов не позволяет произвести полную оценку технического

состояния машины, при углубленном техническом диагностировании часто используют совокупность функциональных методов.

Акустические методы. Акустические методы технического диагностирования основаны на измерении амплитуды и частоты звуковых колебаний, излучаемых объектом диагностирования в процессе работы [20, 22, 23, 24, 25]. Изменение технического состояния элементов машин в процессе работы – увеличение зазоров в сопряжениях, изменение нагрузочного, скоростного и теплового режимов работы деталей вследствие изнашивания, старения, коррозии – вызывает соответствующие изменения параметров звуковых колебаний. Сопоставляя эмпирические значения звуковых сигналов с эталонными, можно судить о техническом состоянии объекта в данный момент времени и прогнозировать его изменение на некоторый период.

Поскольку в формировании звукового потока участвуют практически все подвижные детали объекта диагностирования, акустические методы позволяют оценить техническое состояние большинства основных элементов по величинам излучаемых ими звуковых сигналов. Основная сложность при этом состоит в выделении определенного сигнала из общего спектра и распознавании его принадлежности тому или иному элементу машины. Для оценки звукового сигнала (выделения его из общего спектра и измерения) используют специальные приборы – анализаторы, спектрометры, шумометры, виброметры.

Акустические методы диагностирования применяют в основном для оценки технического состояния элементов, силовых установок, механических и гидромеханических передач.

Спектрографические методы. Спектрографические методы технического диагностирования (по составу масел) наиболее универсальны и широко применяются для экспресс-оценки состояния двигателей, элементов

трансмиссии, гидравлических систем управления, а также в оценке качества смазочных материалов и рабочих жидкостей [23, 24, 26, 27].

Основными диагностическими параметрами в этих случаях являются концентрация, дисперсионный и элементный составы механических примесей, кинематическая вязкость масла, кислотное и щелочное числа, а также содержание воды в масле. С точки зрения диагностирования состояния основных составных частей машины (двигателя, трансмиссии, гидравлической системы управления) наиболее информативны первые три показателя.

Для анализа содержания механических примесей в масле используют химический, спектральный, радиометрический, активационный и оптический методы.

2.2.2. Тестовое диагностирование

Задача построения теста¹ состоит в том, чтобы найти такую совокупность и последовательность входных воздействий, при подаче которой на объект диагностирования получаемые ответы объекта в заданных контрольных точках позволяют делать заключение о его техническом состоянии.

По степени искажения возмущений судят о состоянии объекта. Возмущения имеют известные характеристики, и предметом изучения являются только те искажения, которые возникают при их передаче через объект. Подобные методы строятся на базе достаточно простых информационных технологий и широко используются для диагностирования различных узлов на этапе их изготовления, а также машин и оборудования в неработающем состоянии.

Состав и последовательность подачи этих воздействий на диагностируемые объекты определяются из условий эффективности контроля и диагностики. При этом для получения воздействий и ответных реакций можно ис-

¹ Тест (англ. test — проба, испытание, исследование) — задание с известным решением, предназначенное для проверки качества системы.

пользовать не только основные входы, используемые при применении объекта по назначению, и выходы аппаратуры, но также внутренние узлы и ветви и дополнительные входы, организованные специально для диагностирования. Это способствует получению большей глубины поиска дефектов при меньших затратах времени и оборудования. Тестовое диагностирование может проводиться не только во время поиска неисправностей и наладки, но и при нормальном функционировании аппаратуры. Для того чтобы тестовые воздействия не влияли на нормальную работу диагностируемой аппаратуры, их подают, например, во время рабочих пауз данной части объекта.

Проверяющие тесты предназначены для проверки исправности или работоспособности объекта, а тесты поиска дефектов — для указания места и, возможно, причин дефектов, нарушающих исправность и работоспособность объекта диагностирования.

Для дискретных объектов тесты (их алгоритмы) строятся либо по структурным, либо по функциональным моделям. Тесты могут быть как строго определенными (детерминированными) так и вероятностными (псевдослучайные входные воздействия также относятся к последним). В качестве тестовых могут быть использованы входные воздействия, являющиеся рабочими при применении системы по назначению. Такие тесты называют функциональными. Однако необходимо помнить, что функциональные тесты пригодны только для проверки работоспособности объектов, так как обеспечиваемые ими полнота обнаружения и глубина поиска дефектов явно недостаточны для проверки исправности и поиска дефектов.

Другой стороной тестового диагностирования являются ***задачи выбора и разработки средств реализации тестов***. Средства тестового диагностирования для выполнения возлагаемых на них функций должны иметь три основные группы устройств:

а) устройства для хранения алгоритмов диагностирования и другой информации, необходимой для реализации алгоритмов и для анализа результатов реализации;

б) устройства для реализации алгоритмов диагностирования;

в) устройства для анализа и выдачи результатов реализации алгоритмов диагностирования.

2.2.3. Неразрушающий контроль

Неразрушающий контроль (НК) — контроль надежности основных рабочих свойств и параметров объекта или отдельных его элементов/узлов, не требующий выведения объекта из работы либо его демонтажа.

Также существует понятие *разрушающего контроля*. Например, *краш-тесты* автомобилей.

Основными методами неразрушающего контроля являются [28]:

- **магнитный** — основанный на анализе взаимодействия магнитного поля с контролируемым объектом;
- **электрический** — основанный на регистрации параметров электрического поля, взаимодействующего с контролируемым объектом или возникающего в контролируемом объекте в результате внешнего воздействия;
- **вихретоковый** — основанный на анализе взаимодействия электромагнитного поля вихретокового преобразователя с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в контролируемом объекте;
- **радиоволновой** — основанный на регистрации изменений параметров электромагнитных волн радиодиапазона, взаимодействующих с контролируемым объектом;
- **тепловой** — основанный на регистрации изменений тепловых или температурных полей контролируемых объектов, вызванных дефектами;
- **оптический** — основанный на регистрации параметров оптического излучения, взаимодействующего с контролируемым объектом;

- **радиационный** — основанный на регистрации и анализе проникающего ионизирующего излучения после взаимодействия с контролируемым объектом. Слово «радиационный» может заменяться словом, обозначающим конкретный вид ионизирующего излучения, например, рентгеновский, нейтронный и т. д.;

- **акустический** — основанный на регистрации параметров упругих волн, возбуждаемых или возникающих в контролируемом объекте. При использовании упругих волн ультразвукового диапазона (выше 20 кГц) допустимо применение термина «ультразвуковой» вместо термина «акустический»;

- **проникающими веществами** — основанный на проникновении веществ в полости дефектов контролируемого объекта. Термин «проникающими веществами» может изменяться на «капиллярный», а при выявлении сквозных дефектов — на «течеискание».

Методы каждого вида НК классифицируют по следующим признакам:

- по характеру взаимодействия физических полей или веществ с ОД;
- по первичным информативным признакам;
- по способам получения первичной информации.

При этом в названии метода обязательно присутствуют все указанные классификационные признаки табл. 2.2).

В настоящее время известно 110 методов неразрушающего контроля (МНК). Все МНК достаточно хорошо изучены, отражены в научно-технической литературе и утверждены соответствующими ГОСТами.

Неразрушающий контроль (англ. *Nondestructive testing (NDT)*) также называется оценкой надёжности неразрушающими методами (англ. *nondestructive evaluation (NDE)*) или проверкой без разрушения изделия (англ. *nondestructive inspection (NDI)*). НК особенно важен при создании и эксплуатации жизненно важных изделий, компонентов и конструкций, для выявления различных изъянов, таких как разъедание, ржавление, растрескивание.

Таблица 2.2. Классификация методов неразрушающего контроля

Вид контроля	По характеру взаимодействия физических полей с контролируемым объектом	По первичному информативному параметру	По способу получения первичной информации
Магнитный	Магнитный	Коэрцитивной силы, намагниченности, остаточной индукции, магнитной проницаемости, напряженности эффекта баркгаузена	Индукционный, феррозондовый, магнитографический, пондеромоторный, магниторезисторный
Электрический	Электрический, трибоэлектрический, термоэлектрический,	Электродинамический, электростатический, емкостный	Электростатический порошковый, электропараметрический, электроискровой, рекомбинационного излучения, экзоэлектронной эмиссии, шумовой, контактной разности потенциалов
Вихревой	Прошедшего излучения, отраженного излучения	Амплитудный, фазовый, частотный, спектральный, многочастотный	Трансформаторный, параметрический
Радиоволновой	Прошедшего излучения, отраженного излучения, рассеянного излучения, резонансный	Амплитудный, фазовый, частотный, временной, поляризационный, геометрический	Детекторный (диодный), болометрический, термисторный, интерференционный, голографический, жидких кристаллов, термобумаг, термолюминофоров, фотоуправляемых полупроводниковых пластин, калориметрический

Вид контроля	По характеру взаимодействия физических полей с контролируемым объектом	По первичному информативному параметру	По способу получения первичной информации
Тепловой	Тепловой контактный, конвективный, собственного излучения	Термометрический, теплометрический	Пирометрический, жидких кристаллов, термокрасок, термобумаг, термолуминофоров, термозависимых параметров, оптический, интерференционный, калориметрический
Оптический	Прошедшего излучения, отраженного излучения, рассеянного излучения, индуцированного излучения	Амплитудный, фазовый, частотный, временной, поляризационный, геометрический, спектральный	Интерференционный, нефелометрический, голографический, рефрактометрический, рефлексометрический, визуально-оптический,
Радиационный	Прошедшего излучения, рассеянного излучения, активационного анализа, характеристического излучения, автоэмиссионный	Плотности потока энергии, спектральный	Сцинтилляционный, ионизационный, вторичных электронов, радиографический, радиоскопический
Акустический	Прошедшего излучения, отраженного излучения (эхо-метод), резонансный, импедансный, свободных колебаний, акустико-эмиссионный	Амплитудный, фазовый, временной, частотный, спектральный	Пьезоэлектрический, электромагнитно- акустический, микрофонный, порошковый

Вид контроля	По характеру взаимодействия физических полей с контролируемым объектом	По первичному информативному параметру	По способу получения первичной информации
Проникающими веществами	Молекулярный	Жидкостной, газовый	Яркостный (ахроматический), цветной (хроматический), люминесцентный, люминесцентно-цветной, фильтрующихся частиц, масс-спектрометрический, пузырьковый, манометрический, галогенный

Целью использования неразрушающего контроля в промышленности является надёжное выявление опасных дефектов. Поэтому выбор конкретных методов НК определяется эффективностью обнаружения такого брака. На практике наибольшее распространение получил ультразвуковой контроль, как обладающий высокой чувствительностью, мобильностью и экологичностью, а также радиационный, успешно выявляющий опасные дефекты и объективно фиксирующий полученные результаты [29].

В зависимости от стоящих задач, используют и другие методы контроля. Например, для поиска поверхностных дефектов — капиллярные, а для выявления сквозных — течеискание.

Электрические, магнитоэлектрические, магнитные и вихревые методы позволяют вести контроль свойств проводящих сред, как правило, на поверхности и в предповерхностном слое. Более полным образом неразрушающий контроль осуществляется совокупностью нескольких методов [29].

2.3. Методы обработки информации

2.3.1. Методы определения технического состояния

Решение диагностической задачи определения технического состояния ОД основывается на положениях теории распознавания образов, которая содержит разделы, связанные с построением алгоритмов распознавания, решающих правил и диагностических моделей. Поскольку техническое диагностирование связано с обработкой большого объема информации, то для принятия обоснованного решения (распознавания) целесообразно привлекать методы теории статистических решений [7].

В этой связи необходимо отметить, что немаловажной частью при решении указанной задачи является контролеспособность ОД, т.е. свойство объекта обеспечивать достоверную оценку его технического состояния. Контролеспособность изделия закладывается при его проектировании и создается конструкцией изделия.

Существующие два основных подхода к решению задачи распознавания, вероятностный и детерминистский, имеют лишь небольшое различие в том, что для вероятностных методов необходим значительно больший объем предварительной информации.

Основные методы распознавания в задачах технического диагностирования принято разделять на группы:

- статистические методы распознавания;
- методы статистических решений;
- методы разделения в пространстве признаков;
- логические методы распознавания.

2.3.1.1. Статистические методы распознавания

Основное преимущество статистических методов распознавания состоит в возможности одновременного учета признаков различной физиче-

ской природы, так как они характеризуются безразмерными величинами – вероятностями их проявления при различных состояниях системы.

Среди методов технической диагностики метод, основанный на обобщенной формуле Байеса (**метод Байеса**), занимает особое место благодаря простоте и эффективности [30, 31]. Недостатками метода являются необходимость большого объема предварительной информации и “угнетение” редко встречающихся диагнозов. Но когда объем статистических данных позволяет применить этот метод, его целесообразно использовать как один из наиболее надежных и эффективных.

Метод последовательного анализа применяется для дифференциальной диагностики (распознавание двух состояний) [7]. В отличие от метода Байеса, число обследований заранее не устанавливается, их проводится столько, сколько необходимо для принятия решения с определенной степенью риска.

2.3.1.2. Методы статистических решений

Методы статистических решений отличаются от вышеуказанных правилами принятия решения. В этих методах решающее правило выбирается исходя из некоторых условий оптимальности, например, из условия минимума риска. Возникшие в математической статистике как методы проверки статистических гипотез, они успешно используются в решении задач технического диагностирования [32]. К методам статистических решений относятся **метод минимального риска, метод минимального числа ошибочных решений, метод минимакса, метод Неймана-Пирсона, метод наибольшего правдоподобия**. Эти методы применимы также при наличии зоны неопределенности (зоны отказа от распознавания) в случаях, когда требуется высокая надежность распознавания.

2.3.1.3. Методы разделения в пространстве признаков

Методы разделения в пространстве признаков являются одними из

наиболее важных методов технического диагностирования [7]. Они основаны на “гипотезе компактности”, в соответствии с которой точки, отображающие одно и то же состояние (диагноз), группируются в одной области пространства признаков. Такими методами являются **линейные методы разделения, метод потенциальных функций и метод потенциалов, метод стохастической аппроксимации и метрические методы распознавания.**

2.3.1.4. Логические методы распознавания

Логические методы основаны на установлении логических связей между признаками и состояниями объектов, для которых возможны лишь два значения (например, 0 и 1). Переменные величины или функции, принимающие такие значения, называются логическими, или булевыми. Исследованием таких переменных и функций занимается математическая логика. Применительно к задачам распознавания (диагностированию) методы математической логики стали использоваться после работ Р.Ледли [33]. Детерминистское описание с помощью двоичных переменных, характерное для логических методов распознавания, является приближенной моделью реальной ситуации [7]. Логические методы позволяют выявить состояния, не противоречащие имеющимся техническим сведениям о связях состояний и признаков. К логическим методам распознавания относятся **метод сокращенного базиса, методы теории графов, лингвистические** и другие методы.

2.3.2. Методы поиска дефекта

Если при определении технического состояния ОД установлено, что он неисправен, возникает необходимость поиска дефекта. Анализируя изменение диагностических параметров, можно найти место проявления дефекта. Поиск дефекта выполняется по заранее разработанному алгоритму, включающему определенную совокупность проверок. Множество состояний ОД, обусловленное наличием дефектов, больше множества проверок, так как

при выполнении одной проверки можно найти больше одного дефекта. Каждая проверка требует определенных затрат. Поэтому необходимо разработать такой алгоритм поиска дефекта, чтобы затраты были минимальными. Это приводит к необходимости решения задачи оптимизации. Для решения указанной задачи используют методы оптимизации. Целесообразность применения тех или иных методов обуславливается характером исходной информации и сложностью ОД. В соответствии с вышеизложенным выделяют следующие методы поиска возникшего дефекта:

- метод средних затрат;
- метод построения логических функций;
- метод ветвей и границ;
- метод динамического программирования;
- метод теории информации.

При поиске дефекта **методом средних затрат** в качестве критерия затрат часто используют среднее время поиска дефектного элемента [35]. Минимизация этой величины выполняется известными методами поиска оптимума, а в простейших случаях - путем перебора всех возможных значений. Оценка эффективности выполнения каждой проверки производится по минимуму отношения вероятности отказа ко времени проверки данного элемента. Последовательная проверка элементов по указанной эффективности обеспечит минимальные затраты времени на поиск дефекта.

Метод построения логических функций применяется для отыскания оптимальной последовательности проверок, приводящей к выявлению дефектного элемента. Этот метод целесообразно применять при равновероятных состояниях объекта диагностирования и одинаковых стоимостях каждой проверки [34, 35]. В основе метода находится определение логических функций различия состояний, которые формируются по таблице диагностических признаков. Полученное уравнение математической логики преобразуется в

дизъюнктивно-конъюнктивную форму по известным зависимостям. В результате получают избыточные последовательности проверок, приводящие к решению задачи.

Метод ветвей и границ является частным случаем метода перебора всех возможных проверок [21]. Его отличительной особенностью является отбрасывание в процессе перебора некоторого количества вариантов. Отбрасывание выполняется по заранее установленному критерию в виде границы средней стоимости алгоритма диагностирования.

Метод динамического программирования предусматривает два алгоритма поиска дефектов: условный и безусловный [21, 35]. Условный алгоритм поиска дефекта оптимален в том случае, если для всех входящих в него проверок их стоимость минимальна. Под стоимостью проверок следует понимать затраты на поиск дефекта, время поиска дефекта и т.п. Безусловный алгоритм поиска дефекта будет оптимальным, если средняя стоимость определения состояния ОД минимальна. Этот алгоритм предусматривает оптимальное упорядочение проверок.

Поиск отказавшего элемента с использованием **метода теории информации** требует описания объекта диагностирования в виде таблицы проверок, которая составляется на основе его структурной схемы. Для каждого элемента (блока) анализируемого объекта должны быть известны вероятности отказов [34]. Поиск отказов начинают с выполнения проверки, несущей наибольшее количество информации. Следующая проверка выбирается с учетом результата предыдущей. Если к тому же известна цена информации в виде отношения количества информации к ее стоимости, алгоритм диагностирования начинается с проверки, имеющей максимальную цену.

2.3.3. Методы прогнозирования ресурса

Проблема прогнозирования изменения состояния технических объектов возникает практически на всех стадиях их жизненного цикла. Это требует в каждом случае своего подхода, учитывающего специфические особенности задачи прогнозирования и методов ее решения.

Основная идея рассматриваемой проблемы заключается, прежде всего, в количественной оценке состояния или степени работоспособности ОД в интересующие моменты времени в будущем [21]. Поэтому прогнозирование предполагает интенсивное использование **методов статистического моделирования**. Надо учитывать, что применяемый математический аппарат весьма разнообразен, и то, что существует множество методов, выбор которых для решения конкретных задач довольно затруднителен и зависит от таких факторов, как:

- обоснованность и правильность формулировки задачи;
- возможный характер контроля прогнозируемого объекта (однократный, периодический);
- объем и качество информации о состоянии объекта прогноза;
- наличие универсальных или специализированных средств для обеспечения вычислительных операций по прогнозированию.

В научно-технической литературе выделяют следующие группы методов прогнозирования [36]:

- методы аналитического прогнозирования;
- методы вероятностного прогнозирования;
- методы статистической классификации.

2.3.3.1. Методы аналитического прогнозирования

При выборе математического аппарата для решения задачи аналитического прогнозирования (экстраполяции) необходимо предварительно определить прогнозируемые признаки [21]. Выбранные показатели должны

быть чувствительны к изменениям, которые происходят в элементах, входящих в ОД, т.е. любая наметившаяся тенденция изменения состояния составляющих элементов должна отражаться на поведении выбранного диагностического признака.

Особенность аналитического прогнозирования заключается в возможности получения в результате вычисления значений параметров объекта, размерность которых соответствует размерности контролируемых параметров. При этом совокупность полученных параметров будет характеризовать состояние объекта, которое может быть представлено в виде вектора в многомерном пространстве состояний, где координатами пространства служат параметры объекта.

Положение вектора состояния в пространстве будет определять некоторую степень работоспособности системы [37]. В период эксплуатации степень работоспособности системы будет изменяться, вследствие чего точка (конец вектора) в пространстве состояний будет перемещаться в зависимости от значений параметров объекта. Целесообразно при осуществлении диагностирования выделить области, соответствующие определенным степеням работоспособности, и границу допустимого уровня работоспособности.

Градиентный метод заключается в том, что экстраполируется функция работоспособности (функция состояния) в градиентном направлении. Как известно, вектор градиента определяет направление наибольшего изменения функции. Поэтому этот метод является оптимальным [37], так как оценивает работоспособность системы в направлении более быстрого достижения допустимых значений или в “опасном” направлении. Градиентное прогнозирование разделяется на два этапа. На первом этапе определяются составляющие градиента, т.е. частные производные функции работоспособности по координатам (параметрам). На втором этапе осуществляется прогнозирование в градиентном направлении.

Решение задачи прогнозирования может быть осуществлено с помощью **метода Бокса-Вильсона**, обычно используемого в области оптимизации и планирования эксперимента [37, 38]. Этот метод позволяет по результатам контроля определить уравнение гиперповерхности второго порядка, которая является приближенной нижней границей области изменения контролируемых параметров большей части многопараметрических технических объектов.

Идея **метода обобщенного параметра** заключается в том, что деградационный процесс, характеризуемый многими параметрами, описывается одномерной функцией, численные значения которой зависят от контролируемых параметров объекта. Такая функция рассматривается как обобщенный параметр объекта. Ими могут быть функционально значимые параметры объекта, например, выходные характеристики узлов, их коэффициенты передачи и др. [37, 39]. Иногда в качестве обобщенного параметра можно использовать функции, не имеющие конкретного физического смысла, построенные с помощью тех или иных математических выражений. При этом удобно обобщать с помощью абстрактного математического выражения, в которое можно включить наиболее информативные параметры в необходимом количестве.

Как можно заметить, этот метод только подготавливает контролируемую информацию к осуществлению прогнозирования. Непосредственный прогноз можно осуществить с помощью простейших экстраполирующих выражений.

В **методе прогнозирования с адаптацией** используется следующее положение. Если в контролируемом процессе наблюдается в определенной степени монотонность, постепенность и инерционность, то количественное изменение параметра можно с некоторым приближением разложить на полиномы различных степеней. В результате получим полиномиальное разло-

жение, которое аналогично спектральному разложению колебательных функций весьма удобно для применения на практике. Знание полиномиального спектра позволяет более рационально построить прогнозирующее выражение, в которое должны входить коэффициенты и полиномы тех степеней, для которых величина коэффициентов превышает определенный порог. Наличие совокупности полиномов и коэффициентов (адаптационных) существенно расширяет возможности прогнозирования. Для практических целей число полиномов обычно не превышает 3-4, что значительно облегчает вычисления.

Описание временных изменений можно выполнять различными путями, однако, предпочтение обычно отдается экспериментально-статистическим **методам построения математических моделей**, которые позволяют составить математическую модель этих изменений. По количеству влияющих аргументов модели можно подразделить на однофакторные (микромоделю) и многофакторные (макромоделю). Трудности, встречаемые в реальных условиях (сложность экспериментов и физической картины в изделии и т.д.), приводят к необходимости создания вначале микромоделю, а затем на ее основе (если возможно) - макромоделю. Если удастся построить математические модели хотя бы от одного-двух факторов, то они позволяют решить задачу прогнозирования для многих важных практических случаев [37].

2.3.3.2. Методы вероятностного прогнозирования

Вероятностное прогнозирование – это совокупность алгоритмов и вычислительных процедур для оценки показателей надежности (или технического состояния) объекта в будущем на основании вероятностных характеристик его предшествовавшего функционирования.

Прогнозирование вероятностных характеристик диагностируемого процесса может осуществляться в двух случаях. В первом случае определение вероятности сохранения работоспособности объекта является непосредственно целью прогноза. В другом случае вероятностное прогнозирование

вызвано рядом причин, определяющей среди которых является сложность изменения контролируемых параметров.

Тенденцию, или направление, движения функции состояния к допустимым границам можно оценить статистически, в частности, **методом статистического градиента** [40]. Существенной особенностью этого метода является возможность принятия решения о направлении прогнозирования при любом числе координат, меньшем числа контролируемых параметров, в то время как метод градиента требует проверки всех направлений, т.е. контроля всех параметров.

В **методе прогнозирования известных функций распределения** речь идет о прогнозировании изменения плотности распределения значений случайной функции. Поскольку плотность распределения в большинстве случаев представляет собой нормальный закон [21], то задача прогнозирования его может быть сведена к прогнозированию изменения математического ожидания (МО) и среднеквадратического отклонения (СКО).

Появление **методов прогнозирования неаппроксимируемых функций распределения** вызвано тем, что не всегда экспериментальные распределения по тем или иным причинам подчиняются известным теоретическим законам [21]. В этом случае прибегают к математическому аппарату вероятностных неравенств. Наиболее распространенным из них является неравенство Чебышева, которое вычисляет вероятность потери работоспособности. Экстраполяция статистических характеристик МО и СКО с помощью этих прогнозирующих выражений позволяет определить вероятность на любой момент времени в будущем. Если экспериментальное распределение имеет одну основную моду, приближенно равную МО, и частоты распределения спадают непрерывно, то можно использовать более точное неравенство Кэмп-Мейдель.

Метод прогнозирования характеристик надежности связан с прогнозирующей аппроксимацией плотности распределения экстраполирующего многочлена. Необходимость такого прогнозирования возникает в случае, когда требуется определить количественные характеристики надежности изделий по их кратковременным испытаниям (или в начальный период эксплуатации) и при отсутствии отказов.

Метод прогнозирования марковских процессов. Марковский процесс характерен тем, что закон распределения значения параметра в любой момент времени в будущем зависит только от значения параметра в данный момент времени и не зависит от того, какие величины параметров были в прошлом [41]. Известно, что все законы распределения марковского процесса однозначно могут быть выражены через двумерные законы распределения. Это означает, что задание двумерного закона распределения для любых значений времени полностью определяет течение случайного процесса. При соответствующих начальных и граничных условиях, накладываемых на марковский процесс, условная плотность вероятности удовлетворяет уравнениям Колмогорова. Полученная в результате решения уравнений плотность распределения для заданного момента времени в будущем позволяет вычислить с помощью дифференциального закона распределения значений случайной функции искомую вероятность сохранения работоспособного состояния объекта.

Метод прогнозирования многоэкстремальных процессов. При решении задачи предсказания формы временных рядов обычно основываются на двух предположениях [21]:

- любой ряд является отрезком более длинного ряда;
- законы, управляющие событиями, на любом отрезке инвариантны, так что характер изменения ряда на одном отрезке времени будет похож на характер изменения на другом.

При наличии таких предположений изучаемый отрезок ряда можно рассматривать как совокупность выборочных значений и в зависимости от требований оценивать значения других отрезков аналитическими или статистическими методами.

При постоянных и циклически изменяющихся воздействиях средние, эффективные и максимальные (минимальные) значения параметров определяются достаточно просто, что и требуется для предсказания формы ряда.

При других видах воздействий средние значения параметров не зависят от длины отрезка, однако неопределенность в оценке этой величины, безусловно, возрастает с уменьшением длины отрезка. В общем виде это формулируется так: вероятность превышения данного значения переменной зависит от числа сделанных наблюдений.

Если известно начальное распределение, то распределение крайних значений можно вычислить непосредственно. Однако начальное распределение не всегда известно. Кроме того, в любом случае оно ведет к интегральным выражениям, которые можно аппроксимировать только численными методами. Поэтому желательно пользоваться асимптотическими формулами теории экстремальных значений [42]. Существует несколько методов использования этих формул (функций распределения). Простейшим из них, наиболее распространенным в инженерной практике, является метод построения графиков на экстремально-вероятностной бумаге. Совокупность точек на графике аппроксимируется соответствующей линией, которая и позволяет прогнозировать значения экстремумов.

2.3.3.3. Методы статистической классификации

Преимущество методов статистической классификации (распознавания образов) заключается в том, что прогнозирование можно начинать с момента осуществления однократного контроля диагностируемого объекта. Кроме того, в процессе классификации участвует вся совокупность параметров, ха-

рактизирующих состояние объекта.

Распознавание образов предполагает отнесение изучаемого явления или объекта по их изображению к одному из известных классов объектов или явлений. При этом считают, что каждый класс характеризуется некоторым образом, присущим каждому изображению из множества, составляющих этот класс.

Проблема распознавания содержит решение двух задач [21]. Первую задачу – формирование классов – часто трактуют как обучение, при котором на основе анализа изображений каждого класса определяют меру подобия, или описание класса. Вторая задача - распознавание. При распознавании определяют меру подобия каждому классу изображения, для которого неизвестно, к какому классу оно принадлежит. По полученным результатам принимают решение об отнесении изображения к тому классу, для которого мера подобия максимальна.

При решении первой задачи важен выбор способа преобразования пространства изображений, который увеличивает близость изображения из одного класса. Выбранный способ преобразования должен учитывать в основном общие свойства изображений и не учитывать свойства, которые не присутствуют в каждом изображении.

Принадлежность изображения к определенному классу характеризуется функцией подобия, по которой можно оценить вероятность принадлежности к этому классу. Для принятия решения об отнесении изображения к тому или иному классу необходимо учитывать вероятности принадлежности изображения ко всем классам, иначе говоря, принятие решения зависит от близости точек по всем классам в пространстве изображений. Наиболее распространены при распознавании следующие методы принятия решений:

- корреляционный метод;
- метод евклидова расстояния;

- метод линий регрессии;
- метод зон.

Корреляционный метод состоит в определении корреляции (связи) рассматриваемого изображения с эталонными классами. При этом эталоны обычно представляют собой средние по совокупности обучающих изображений. Решения принимают в результате сравнения корреляции между рассматриваемыми изображениями и каждым из эталонов: изображение относят к тому классу, для которого коэффициент корреляции оказывается наибольшим. Поскольку корреляцию находят в виде скалярного произведения, то ее можно измерить косинусом угла между эталоном и рассматриваемым изображением. Этот метод используют в тех случаях, когда угол между эталонами значительно больше, чем угол, охватывающий изображения, относящиеся к одному классу.

Метод эвклидова расстояния основан на сравнении эвклидовых расстояний (минимизация квадрата ошибки) между исследуемым изображением и эталонами. Решающее правило делит пространство изображений на две области одной прямой. Для двумерного случая граница раздела проходит по перпендикуляру через середину линии, соединяющей центры эталонов. В частном случае, когда эталоны равны, границы областей, определяющих классы, получаемые методами эвклидова расстояния и корреляционным, совпадают.

Метод линий регрессии основан на определении расстояния от изображения до линии регрессии. Линия регрессии представляет собой прямую линию, проходящую через средние совокупности точек (изображений) с наклоном, пропорциональным корреляции между изображениями. Для каждого из нескольких классов характерна своя линия регрессии, и изображение относится к тому классу, линия регрессии которого ближе всего к

изображению. Границами между областями, относящимися к различным классам, будут биссектрисы углов между линиями регрессии.

Если начало координат перенести в точку пересечения линий регрессии, то решающее правило существенно упрощается. На практике для повышения эффективности распознавания можно не ограничиваться линейной регрессией, а построить кривую, лучше отражающую свойства рассматриваемой совокупности изображений. В качестве таких линий используют, в частности, гармонический ряд или степенной полином.

Наиболее простым методом распознавания при прогнозировании является **метод зон**, при котором значения диагностических показателей распределяют по трем зонам с границами, определяемыми СКО показателей.

Таким образом, при выборе метода классификации для прогнозирования необходимо учитывать простоту определения меры близости, описания границ классов и образов и т.п. Весьма важны степень изученности индивидуальных физических особенностей классифицируемых объектов, информативность выбранных показателей, количество априорной информации.

3. Измерения – основа диагностики

3.1. Измерения физических величин

Измерение – это нахождение значений физических величин опытным путем с помощью специальных технических средств.

Измерение – совокупность операций для определения отношения одной (измеряемой) величины к другой однородной величине, принятой всеми участниками за единицу, хранящуюся в техническом средстве (средстве измерений).

Получившееся значение называется числовым значением измеряемой величины, числовое значение совместно с обозначением используемой единицы называется *значением физической величины*.

Физическая величина – одно из свойств физического объекта¹ (физической системы, явления или процесса²), общее в качественном отношении для многих физических объектов, но в количественном отношении индивидуальное для каждого из них [44].

Значение физической величины – выражение размера физической величины в виде некоторого числа принятых для нее *единиц*.

Числовое значение физической величины — отвлеченное число, входящее в *значение физической величины*.

Единица физической величины – физическая величина фиксированного размера, которой условно присвоено числовое значение, равное 1, и применяемая для количественного выражения однородных с ней физических величин.

¹ Физические свойства вещества – свойства, проявляемые веществом в процессах, при которых вещество остается химически неизменным [43].

² Физическое понимание процессов, происходящих в природе, постоянно развивается. Большинство новых открытий вскоре получают применение в технике и промышленности. Однако перед исследователями постоянно встают новые загадки; обнаруживаются явления, для объяснения которых требуются новые физические теории. Несмотря на огромный объём накопленных знаний, современная физика ещё очень далека от того, чтобы объяснить все явления природы.

Совокупность физических величин, образованная в соответствии с принятыми принципами, когда одни физические величины являются независимыми (основными физическими величинами), а другие являются их функциями (производными физическими величинами), объединена в **систему единиц физических величин**.

В соответствии с [45] в РФ в качестве системы единиц физических величин подлежат обязательному применению единицы Международной системы единиц¹.

Основные единицы СИ в соответствии с [45] приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1. Основные единицы СИ

Величина		Единица		
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение	
			международное	русское
Длина	L	метр	m	м
Масса	M	килограмм	kg	кг
Время	T	секунда	s	с
Сила электрического тока	I	ампер	A	А
Термодинамическая температура	Θ	кельвин	K	К
Количество вещества	N	моль	mol	моль
Сила света	J	кандела	cd	кд

Измерение физической величины – совокупность операций по применению технического средства, хранящего единицу физической величины, обеспечивающих нахождение соотношения (в явном или неявном виде) измеряемой величины с ее единицей и получение значения этой величины [44].

В тех случаях, когда невозможно выполнить измерение (не выделена величина как физическая, или не определена единица измерений этой величины) практикуется оценивание таких величин по условным шкалам, например, шкала Рихтера интенсивности землетрясений, шкала Мооса – шкала твердости минералов.

¹ Международная система единиц (международное сокращенное наименование — SI, в русской транскрипции — СИ) принята в 1960 г. XI Генеральной конференцией по мерам и весам (ГКМВ) и уточнена на последующих ГКМВ.

Частным случаем измерения является сравнение без указания количественных характеристик.

Наука, предметом изучения которой являются все аспекты измерений, называется метрологией.

Измерения как экспериментальные процессы весьма разнообразны. Это объясняется множеством экспериментальных величин, различным характером измерения величин, различными требованиями точности измерения и др.

3.2. Виды измерений

Вид измерения – часть области измерений, имеющая свои особенности и отличающаяся однородностью измеряемых величин.

Существует несколько видов измерений. При их классификации обычно исходят из характера зависимости измеряемой величины от времени, вида уравнения измерений и способов выражения этих результатов.

3.2.1. По способу получения результата

Прямое измерение – измерение, при котором искомое значение физической величины получают непосредственно, т.е. при котором значение физической величины находят непосредственно из опытных данных, например, измерение электрического тока с помощью амперметра.

Косвенное измерение – определение искомого значения физической величины на основании результатов прямых измерений других физических величин, функционально связанных с искомой величиной, т.е. при котором искомое значение физической величины Y находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами $X_1, X_2, \dots, X_n$, подвергаемым прямым измерениям.

В результате измерения искомая величина находится путем расчета по формуле

$$Y = F(X_1, X_2, \dots, X_n) . \quad (3.1)$$

Например, при измерении мощности с помощью амперметра и вольтметра ток I и напряжение U измеряют прямым методом, а мощность P вычисляют по формуле

$$P = U \cdot I. \quad (3.2)$$

В этом примере используется два измерительных прибора; их может быть и больше.

Совместные измерения – проводимые одновременно измерения двух или нескольких неоднородных величин для определения зависимости между ними.

Например, определение зависимости сопротивления от температуры. При этом измеряются неоднородные величины: сопротивления тестируемых резисторов отдельно и их температуры отдельно, по результатам измерений определяется зависимость.

Другой пример: определение зависимости тока от напряжения. Так как при изменении напряжения меняется и ток, то при соответствующих измерениях меняющихся напряжения и тока можно получить зависимость тока от напряжения. Из полученных результатов можно определить вид зависимости и все ее параметры.

Совокупные измерения – проводимые одновременно измерения нескольких однородных величин, при которых искомые значения величин определяют путем решения системы уравнений, получаемых при измерениях этих величин в различных сочетаниях.

Например, это измерения, при которых значения сопротивлений отдельных резисторов набора находят по известному сопротивлению одного из них и по результатам прямых сравнений сопротивлений различных сочетаний резисторов.

3.2.2. По способу выражения результатов

По способу выражения результатов различают абсолютные и относительные измерения.

Абсолютное измерение – измерение, основанное на прямых измерениях одной или нескольких основных величин и (или) использовании значений физических констант.

Относительное измерение – измерение отношения величины к одноименной величине, играющей роль единицы, или измерение изменения величины по отношению к одноименной величине, принимаемой за исходную.

Например, измерение коэффициента усиления усилителя на разных частотах по отношению к максимальному значению этого коэффициента на некоторой частоте.

3.2.3. По характеру зависимости измеряемой величины от времени

Статическое измерение – измерение физической величины, принимаемой в соответствии с конкретной измерительной задачей за неизменную на протяжении времени измерения.

Динамическое измерение – измерение изменяющейся по размеру физической величины.

3.3. Методы измерений

Метод измерений – приём или совокупность приёмов сравнения измеряемой физической величины с её единицей в соответствии с реализованным принципом измерений. Метод измерений обычно обусловлен устройством средств измерений.

В настоящее время существует два основных метода измерений:

Метод непосредственной оценки – метод измерений, при котором значение величины определяют непосредственно по показывающему средству измерений.

Метод сравнения с мерой – метод измерений, в котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой, например, измерение напряжения постоянного тока путем сравнения с ЭДС известного элемента.

Есть несколько разновидностей метода сравнения с мерой:

Нулевой метод измерений – метод сравнения с мерой, в котором результирующий эффект воздействия измеряемой величины и меры на прибор сравнения доводят до нуля. Например, измерение электрического сопротивления мостом с полным его уравниванием.

Метод измерений замещением – метод сравнения с мерой, в котором измеряемую величину замещают мерой с известным значением величины. Например, измерение вносимого электрической цепью ослабления сигнала путем поочередного включения в измерительную установку исследуемой цепи и регулируемого рабочего аттенюатора¹.

Метод измерений дополнением – метод сравнения с мерой, в котором значение измеряемой величины дополняется мерой этой же величины с таким расчетом, чтобы на прибор сравнения воздействовала их сумма, равная заранее заданному значению.

Дифференциальный метод измерений – метод измерений, при котором измеряемая величина сравнивается с однородной величиной, имеющей известное значение, незначительно отличающееся от значения измеряемой величины, и при котором измеряется разность между этими двумя величинами. Например, измерение электрического сопротивления мостом с неполным его уравниванием.

¹ Аттенюатор — это электронное устройство, которое уменьшает амплитуду или мощность сигнала без существенного искажения его формы.

3.4. Погрешности измерений

Погрешность измерения — отклонение измеренного значения величины от её истинного (действительного) значения.

Погрешность измерения является характеристикой точности измерения.

Поскольку выяснить с абсолютной точностью истинное значение никакой величины невозможно, то невозможно и указать величину отклонения измеренного значения от истинного¹. Возможно лишь оценить величину этого отклонения, например, при помощи статистических методов. На практике вместо истинного значения используют *действительное значение величины* X_u , т.е. значение физической величины, полученное экспериментальным путем и настолько близкое к истинному значению, что в поставленной измерительной задаче может быть использовано вместо него [46]. Такое значение обычно вычисляется как среднестатистическое значение, полученное при статистической обработке результатов серии измерений. Это полученное значение не является точным, а лишь наиболее вероятным. Поэтому в измерениях необходимо указывать, какова их точность. Для этого вместе с полученным результатом указывается погрешность измерений.

3.4.1. Классификация погрешностей [47, 48, 49]

3.4.1.1. По форме представления

Абсолютная погрешность — ΔX является оценкой абсолютной ошибки измерения. Вычисляется разными способами. Способ вычисления определяется распределением случайной величины X_m . Соответственно, величина абсолютной погрешности, в зависимости от распределения случайной величины X_m , может быть различной. Если X_m — измеренное значение, а X_t — истинное значение, то неравенство $\Delta X > |X_m - X_t|$ должно выполняться с

¹ Это отклонение принято называть ошибкой измерения. В ряде источников, например в Большой советской энциклопедии, термины “ошибка измерения” и “погрешность измерения” используются как синонимы, но согласно [44] термин “ошибка измерения” не рекомендуется применять как менее удачный.

некоторой вероятностью, близкой к 1. Если случайная величина X_m распределена по нормальному закону, то обычно за абсолютную погрешность принимают её среднеквадратическое отклонение (СКО). Абсолютная погрешность измеряется в тех же единицах измерения, что и сама величина.

Существует несколько способов записи величины вместе с её абсолютной погрешностью:

1) обычно используется запись со знаком $\pm$. Например, рекорд в беге на 100 м, установленный в 1983 г., равен **9,930 $\pm$ 0,005 с**;

2) для записи величин, измеренных с очень высокой точностью, используется другая запись: цифры, соответствующие погрешности последних цифр мантиссы¹, дописываются в скобках. Например, измеренное значение постоянной Больцмана равно **1,3806488(13) $\times 10^{-23}$ Дж/К**, что также можно записать значительно длиннее как **1,3806488 $\times 10^{-23}$ $\pm$ 0,0000013 $\times 10^{-23}$ Дж/К**.

Относительная погрешность — погрешность измерения, выраженная отношением абсолютной погрешности измерения к действительному или среднему значению измеряемой величины

$$\delta_X = \frac{\Delta X}{X_t}; \delta_X = \frac{\Delta X}{X_m}. \quad (3.3)$$

Относительная погрешность является безразмерной величиной; её численное значение может указываться, например, в процентах.

Приведённая погрешность — погрешность, выраженная отношением

¹ Экспоненциальная запись — представление действительных чисел в виде мантиссы и порядка. Удобна при представлении очень больших и очень малых чисел, а также для унификации их написания.

$N = M \cdot n^p$, где

N — записываемое число;

M — мантисса;

n — основание показательной функции;

p (целое) — порядок;

n^p — характеристика числа.

Примеры:

1 000 000 (один миллион): $1 \cdot 10^6$; N = 1 000 000, M = 1,0, n = 10, p = 6.

1 201 000 (один миллион двести одна тысяча): $1,201 \cdot 10^6$; N = 1 201 000, M = 1,201, n = 10, p = 6.

абсолютной погрешности средства измерения к условно принятому значению величины, постоянному во всем диапазоне измерений или в части диапазона. Вычисляется по формуле

$$\gamma_X = \frac{\Delta X}{X_n}, \quad (3.4)$$

где X_n — нормирующее значение, которое зависит от типа шкалы измерительного прибора и определяется по его градуировке:

- если шкала прибора односторонняя, т.е. нижний предел измерений равен нулю, то X_n определяется равным верхнему пределу измерений;
- если шкала прибора двухсторонняя, то нормирующее значение равно ширине диапазона измерений прибора.

Приведённая погрешность также является безразмерной величиной.

3.4.1.2. По причине возникновения

Инструментальные / приборные погрешности — определяются погрешностями применяемых средств измерений и вызываются несовершенством принципа действия, неточностью градуировки шкалы, недостаточной наглядностью прибора.

В технике применяют приборы для измерения лишь с определённой, заранее заданной точностью — основной погрешностью, допускаемой в нормальных условиях эксплуатации для данного прибора. В различных областях науки и техники могут подразумеваться различные стандартные (нормальные) условия.

Нормальные (стандартные) условия определены разными организациями зачастую по-разному.

Например, IUPAC (Международный союз практической и прикладной химии) определяет нормальные условия следующим образом:

- атмосферное давление 101325 Па = 760 мм рт. ст. = 1 atm;
- температура воздуха 273,15 К = 0 °С.

В Великобритании стандартные условия SATP (Standard Ambient Temperature and Pressure) равны:

- атмосферное давление $100 \text{ kPa} = 750,12 \text{ мм рт. ст.} = 0,987 \text{ atm}$;
- температура $298,15 \text{ K} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

В США стандартные условия, определяемые NIST (National Institute of Standards and Technology), равны:

- атмосферное давление $101325 \text{ Па} = 760 \text{ мм рт. ст.} = 1 \text{ atm}$;
- температура $293.15 \text{ K} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$

В России используют [62], по которому нормальные условия равны:

- температура $293 \text{ K} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- атмосферное давление $101,3 \text{ кПа} = 760 \text{ мм рт. ст.}$;
- относительная влажность 60% .

Если прибор работает в условиях, отличных от нормальных, то возникает дополнительная погрешность, увеличивающая общую погрешность прибора — например, **температурная** (вызванная отклонением температуры окружающей среды от нормальной), **установочная** (обусловленная отклонением положения прибора от нормального рабочего положения) и т.п.

Методические погрешности обусловлены несовершенством метода, а также упрощениями, положенными в основу методики.

Субъективные / операторные / личные погрешности обусловлены степенью внимательности, сосредоточенности, подготовленности и другими качествами оператора.

3.4.1.3. По характеру проявления

Случайная погрешность — составляющая погрешности измерения, изменяющаяся случайным образом в серии повторных измерений одной и той же величины, проведенных в одних и тех же условиях. В появлении таких погрешностей не наблюдается какой-либо закономерности, они обнаруживаются при повторных измерениях одной и той же величины в виде некото-

рого разброса получаемых результатов. Случайные погрешности неизбежны, неустранимы и всегда присутствуют в результате измерения, однако их влияние обычно можно устранить статистической обработкой. Описание случайных погрешностей возможно только на основе теории случайных процессов и математической статистики.

Математически случайную погрешность, как правило, можно представить белым шумом: как непрерывную случайную величину, симметричную относительно 0, независимо реализующуюся в каждом измерении (некоррелированную по времени).

Основным свойством случайной погрешности является возможность уменьшения искажения искомой величины путем усреднения данных. Уточнение оценки искомой величины при увеличении количества измерений (повторных экспериментов) означает, что среднее случайной погрешности при увеличении объёма данных стремится к 0 (закон больших чисел).

Часто случайные погрешности возникают из-за одновременного действия многих независимых причин, каждая из которых в отдельности слабо влияет на результат измерения. По этой причине часто полагают распределение случайной погрешности «нормальным». «Нормальность» позволяет использовать в обработке данных весь арсенал математической статистики.

Однако априорная убежденность в «нормальности» на основании центральной предельной теоремы¹ (ЦПТ) не согласуется с практикой — законы распределения ошибок измерений весьма разнообразны и, как правило, сильно отличаются от нормального.

Случайные погрешности могут быть связаны с несовершенством приборов (трение в механических приборах и т.п.), тряской в городских услови-

¹ Центральные предельные теоремы – класс теорем в теории вероятностей, утверждающих, что сумма достаточно большого количества слабо зависимых случайных величин, имеющих примерно одинаковые масштабы (ни одно из слагаемых не доминирует, не вносит в сумму определяющего вклада), имеет распределение, близкое к нормальному.

ях, с несовершенством объекта измерений (например, при измерении диаметра тонкой проволоки, которая может иметь не совсем круглое сечение в результате несовершенства процесса изготовления).

Систематическая погрешность — погрешность, изменяющаяся во времени по определённом закону (частным случаем является постоянная погрешность, не изменяющаяся с течением времени). Систематические погрешности могут быть связаны с ошибками приборов (неправильная шкала, калибровка и т.п.), не учтёнными экспериментатором.

Систематическую погрешность нельзя устранить повторными измерениями. Её устраняют либо с помощью поправок, либо «улучшением» эксперимента.

Прогрессирующая (дрейфовая) погрешность — непредсказуемая погрешность, медленно меняющаяся во времени. Она представляет собой нестационарный случайный процесс.

Грубая погрешность (промах) — погрешность, возникшая вследствие недосмотра экспериментатора или неисправности аппаратуры (например, если экспериментатор неправильно прочёл номер деления на шкале прибора или если произошло замыкание в электрической цепи).

Надо отметить, что деление погрешностей на случайные и систематические достаточно условно. Например, ошибка округления при определённых условиях может носить характер как случайной, так и систематической погрешности.

3.4.1.4. По способу измерения

Погрешность прямых измерений вычисляется по формуле

$$\Delta X = \sqrt{t^2 + A^2}, \quad (3.5)$$
$$t = S_X t_{\alpha, (N-1)},$$

где S_X — стандартная ошибка среднего (выборочное СКО, деленное на корень из количества измерений N);

$t_{\alpha, (N-1)}$ — квантиль распределения Стюдента для числа степеней сво-

боды $(N - 1)$ и уровня значимости α ;

A — абсолютная погрешность средства измерения (обычно это число, равное половине цены деления измерительного прибора).

Погрешность косвенных воспроизводимых измерений — погрешность вычисляемой (не измеряемой непосредственно) величины. Если $F = F(X_1, X_2, \dots, X_n)$, где X_i — непосредственно измеряемые независимые величины, имеющие погрешность ΔX_i , то

$$\Delta F = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\Delta X_i \frac{\partial F}{\partial X_i} \right)^2} . \quad (3.6)$$

Погрешность косвенных невоспроизводимых измерений вычисляется аналогично вышеизложенной формуле, но вместо X_i ставится значение, полученное в процессе расчётов.

3.4.2. Определение погрешности

В зависимости от характеристик измеряемой величины, для определения погрешности измерений используют различные методы.

1. Метод Корнфельда заключается в выборе доверительного интервала в пределах от минимального до максимального результата измерений, и погрешность равна половине разности между максимальным и минимальным результатом измерения

$$\Delta X = \frac{X_{MAX} - X_{MIN}}{2} . \quad (3.7)$$

2. Средняя квадратическая погрешность

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} . \quad (3.8)$$

3. Средняя квадратическая погрешность среднего арифметического

$$S_X = \frac{S}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n(n - 1)}} . \quad (3.9)$$

3.5. Исключение систематических погрешностей

Исключение систематических погрешностей — одна из главных задач при планировании, подготовке, проведении измерений и обработке их результатов.

На этапе планирования и подготовки принципиальным является:

- а) выбор метода и средства измерений;
- б) определение источников и номенклатуры систематических погрешностей, при необходимости — их профилактика посредством термостатирования, экранирования, виброзащиты и другими способами;
- в) такая постановка эксперимента, которая исключила, уменьшила или позволила бы оценить наиболее существенные систематические погрешности:
 - составление плана эксперимента;
 - определение метрологических характеристик средств измерений;
 - подготовка рабочего места и т.д.

3.5.1. Способы исключения систематических погрешностей

Для исключения систематических погрешностей в процессе измерений применяют ряд способов.

1. Наиболее распространенным из них является **способ замещения**, при котором измеряемый объект заменяют известной мерой.

Например, включив измеряемое сопротивление в мостовую схему и уравневав схему, сопротивление заменяют магазином сопротивлений и, подбирая сопротивление магазина, вновь восстанавливают равновесие цепи. Высокая точность способа обеспечивается за счет исключения остаточной неуравновешенности по знаку. Он заключается в том, что измерения проводят дважды так, чтобы погрешность входила в результаты с противоположными знаками, и берут среднее значение результатов.

2. К способу замещения близок по смыслу **способ противопоставления**, при котором также проводят два наблюдения, но измерения строят так,

чтобы погрешность, подлежащая исключению, входила в результаты наблюдений в виде коэффициента, а не слагаемого.

Так, при измерении сопротивления с помощью равноплечной мостовой схемы после уравнивания моста меняют местами измеряемое и уравнивающее сопротивления и, уравновесив мост, вновь повторяют измерения. При обработке результатов двух наблюдений (до и после перестановки сопротивлений) можно не только повысить точность определения измеряемого сопротивления, но и вычислить действительное отношение плеч моста.

3. Для исключения прогрессирующей систематической погрешности, являющейся линейной функцией времени, применяют **способ симметричных наблюдений**. Он заключается в том, что наблюдения выполняют через одинаковые промежутки времени в течение определенного временного интервала. При обработке результатов наблюдений используется тот факт, что погрешность среднего значения любой пары наблюдений, симметричных относительно середины временного интервала, равна погрешности результата наблюдения, соответствующего средней точке интервала.

Так удастся исключить влияние погрешностей, обусловленных постепенным падением напряжения источника питания (батареи или аккумулятора), уменьшением электронной эмиссии катодов в радиолампах и другими факторами.

4. Эффективным способом уменьшения систематических погрешностей является их **рандомизация**, т.е. перевод в случайные.

Например, если измерить напряжение несколькими вольтметрами разных типов одновременно и усреднить результаты наблюдений, то можно ожидать, что систематические методические и инструментальные погрешности, присущие каждому прибору, вследствие случайного выбора приборов в какой-то мере компенсируются. Того же эффекта добиваются, изменяя случайным образом методику и условия эксперимента или те параметры, от ко-

торых не зависит значение измеряемой величины, но могут зависеть систематические погрешности ее измерения.

3.5.2. Использование поправок

Во время обработки результатов наблюдений обнаруживают и оценивают те систематические погрешности, которые не удалось исключить, и в результат измерения вносят поправки.

Поправкой называется величина, одноименная с измеряемой, добавление которой к результату измерения исключает систематическую погрешность.

Поправочный множитель — это число, на которое умножается результат измерения с целью исключения систематической погрешности.

Поправки (поправочные множители) прилагают к паспорту прибора в виде таблиц, графиков или формул. Они могут быть функциями времени, значения измеряемой величины, частоты, температуры и т.д.

Поправка, прибавляемая к результату измерения, должна быть численно равна систематической составляющей погрешности, но противоположна ей по знаку. Если систематическая погрешность является функцией какого-либо параметра, то поправку представляют в виде обратной функции того же аргумента.

Так как источников систематических погрешностей много, то и поправок может вноситься множество. Некоторые из них, например, определяемые экспериментально, бывают известны неточно.

Нужно следить, чтобы погрешность, для которой известно значение поправки, не увеличивала погрешности измерения.

Следует помнить, что из-за неточного знания поправок систематическая составляющая погрешности измерения компенсируется не полностью.

4. Средства измерений

4.1. Классификация средств измерений

Средство измерений (СИ) — техническое средство, предназначенное для измерений, имеющее нормированные¹ метрологические характеристики, воспроизводящее и (или) хранящее единицу физической величины², размер которой принимают неизменным (в пределах установленной погрешности³) в течение известного интервала времени.

Законом РФ "Об обеспечении единства измерений" N 102-ФЗ от 26 июня 2008 г. [50] средство измерений определено как "техническое средство, предназначенное для измерений". Формальное решение об отнесении технического средства к средствам измерений принимает Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии⁴.

Суть средства измерений заключается, во-первых, в "умении" хранить (или воспроизводить) единицу физической величины; во-вторых, в неизменности размера хранимой единицы. Эти важнейшие факторы и обуславливают возможность выполнения измерения (сопоставление с единицей), т.е. "делают" техническое средство средством измерений. Если размер единицы в процессе измерений изменяется более, чем установлено нормами, таким средством нельзя получить результат с требуемой точностью. Это означает, что измерять можно лишь тогда, когда техническое средство, предназначенное для этой цели, может хранить единицу, достаточно неизменную по размеру (во времени) [51].

¹ Норма — термин для обозначения некоторой характеристики — допустимого диапазона, усреднённой или среднестатистической величины.

² Физическая величина — физическое свойство материального объекта, физического явления, процесса, которое может быть охарактеризовано количественно.

³ Погрешность измерения — отклонение измеренного значения величины от её истинного (действительного) значения. Погрешность измерения является характеристикой точности измерения.

⁴ <http://www.gost.ru/>

Средства измерений обычно классифицируют по различным признакам [52].

а) по техническому назначению:

- мера физической величины;
- измерительный преобразователь;
- измерительный прибор;
- измерительная установка;

б) по степени автоматизации¹:

- автоматические;
- автоматизированные;
- ручные;

в) по стандартизации² средств измерений:

- стандартизированные;
- нестандартизированные;

г) по положению в поверочной схеме³:

- эталоны¹;

¹ Автоматизация — одно из направлений научно-технического прогресса, использующее саморегулирующие технические средства и математические методы с целью освобождения человека от участия в процессах получения, преобразования, передачи и использования энергии, материалов, изделий или информации, либо существенного уменьшения степени этого участия или трудоёмкости выполняемых операций.

² Стандартизация — деятельность по разработке, опубликованию и применению стандартов, по установлению норм, правил и характеристик в целях обеспечения безопасности продукции, работ и услуг для окружающей среды, жизни, здоровья и имущества, технической и информационной совместимости, взаимозаменяемости и качества продукции, работ и услуг в соответствии с уровнем развития науки, техники и технологии, единства измерений, экономии всех видов ресурсов, безопасности хозяйственных объектов с учётом риска возникновения природных и техногенных катастроф и других чрезвычайных ситуаций, обороноспособности и мобилизационной готовности страны.

³ Поверочная схема для средств измерений — нормативный документ, устанавливающий соподчинение средств измерений, участвующих в передаче размера единицы от эталона рабочим средствам измерений (с указанием методов и погрешности при передаче). Различают государственные и локальные поверочные схемы (ПС), ранее существовали также ведомственные ПС.

- рабочие средства измерений;

д) по значимости измеряемой физической величины:

- основные средства измерений той физической величины, значение которой необходимо получить в соответствии с измерительной задачей;
- вспомогательные средства измерений той физической величины, влияние которой на основное средство измерений или объект измерений необходимо учитывать для получения результатов измерений требуемой точности;

е) по измерительным физико-химическим параметрам:

- температуры;
- давления;
- расхода и количества;
- концентрации раствора;
- уровня и др.

4.1.1. Мера физической величины

Мера физической величины – средство измерений, предназначенное для воспроизведения и (или) хранения физической величины одного или нескольких заданных размеров, значения которых выражены в установленных единицах и известны с необходимой точностью.

Различают следующие разновидности мер:

- **однозначная мера** – мера, воспроизводящая физическую величину одного размера (например, гиря 1 кг);
- **многозначная мера** – мера, воспроизводящая физическую величину разных размеров (например, штриховая мера длины);
- **набор мер** – комплект мер разного размера одной и той же физической величины, предназначенных для применения на практике как в отдель-

¹ Эталон (англ. *measurement standard, etalon*, фр. *étalon*) — средство измерений (или комплекс средств измерений), обеспечивающее воспроизведение и (или) хранение единицы, а также передачу её размера нижестоящим по поверочной схеме средствам измерений и утверждённое в качестве образца в установленном порядке.

ности, так и в различных сочетаниях (например, набор концевых мер длины);

- **магазин мер** – набор мер, конструктивно объединенных в единое устройство, в котором имеются приспособления для их соединения в различных комбинациях (например, магазин электрических сопротивлений);

- **стандартный образец** — мера в виде вещества, при помощи которой размер физической величины воспроизводится как свойство или как состав вещества, из которого изготовлен стандартный образец.

Примеры мер:

- гиря — мера массы;
- песочные часы — мера интервалов времени;
- нормальный элемент — мера ЭДС (разности электрических потенциалов);
- измерительный генератор — мера частоты, амплитуды и формы электрического сигнала;
- аттенюатор — мера ослабления электромагнитного сигнала;
- атлас цветов — набор мер в колориметрии (цветовых измерениях).

При оценивании величин по условным (неметрическим) шкалам, имеющим реперные точки, в качестве "меры" нередко выступают вещества или материалы с приписанными им условными значениями величин. Так, для шкалы Мооса мерами твердости являются минералы различной твердости. Приписанные им значения твердости образуют ряд реперных точек условной шкалы.

4.1.2. Измерительный преобразователь

Измерительный преобразователь – техническое средство с нормативными метрологическими характеристиками, служащее для преобразования измеряемой величины в другую величину или измерительный сигнал, удобный для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации или передачи [53].

Измерительный преобразователь или входит в состав какого-либо измерительного прибора (измерительной установки, измерительной системы и др.), или применяется вместе с каким-либо средством измерений.

По характеру преобразования различают аналоговые, цифро-аналоговые, аналого-цифровые преобразователи. По месту в измерительной цепи различают первичные и промежуточные преобразователи. Выделяют также масштабные и передающие преобразователи [54].

Различают следующие измерительные преобразователи:

1) по принципу действия:

- генераторные;
- параметрические;

2) по характеру преобразования:

- аналоговый измерительный преобразователь — измерительный преобразователь, преобразующий одну аналоговую величину (аналоговый измерительный сигнал) в другую аналоговую величину (измерительный сигнал);

- аналого-цифровой измерительный преобразователь — измерительный преобразователь, предназначенный для преобразования аналогового измерительного сигнала в цифровой код [55];

- цифро-аналоговый измерительный преобразователь — измерительный преобразователь, предназначенный для преобразования числового кода в аналоговую величину [56];

3) по месту в измерительной цепи:

- первичный измерительный преобразователь — измерительный преобразователь, на который непосредственно воздействует измеряемая физическая величина. Первичный измерительный преобразователь является первым преобразователем в измерительной цепи измерительного прибора;

- датчик — конструктивно обособленный первичный измерительный

преобразователь [57];

- детектор — датчик в области измерений ионизирующих излучений;
- промежуточный измерительный преобразователь — измерительный преобразователь, занимающий место в измерительной цепи после первичного преобразователя;

4) по другим признакам:

- передающий измерительный преобразователь — измерительный преобразователь, предназначенный для дистанционной передачи сигнала измерительной информации;

- масштабный измерительный преобразователь — измерительный преобразователь, предназначенный для изменения размера величины или измерительного сигнала в заданное число раз.

Примеры измерительных преобразователей:

- термопара в термоэлектрическом термометре;
- измерительный трансформатор тока;
- электропневматический преобразователь.

4.1.3. Измерительный прибор

Измерительный прибор – средство измерений, предназначенное для получения значений измеряемой физической величины в установленном диапазоне [58].

Для измерительных приборов характерен следующий ряд параметров:

Диапазон измерений — область значений измеряемой величины, на которую рассчитан прибор при его нормальном функционировании (с заданной точностью измерения).

Порог чувствительности — некоторое минимальное, или пороговое, значение измеряемой величины, которое прибор может различить.

Чувствительность — связывает значение измеряемого параметра с соответствующим ему изменением показаний прибора.

Точность — способность прибора указывать истинное значение измеряемого показателя (предел допустимой погрешности или неопределённость измерения).

Стабильность — способность прибора поддерживать заданную точность измерения в течение определенного времени после калибровки¹.

Различают следующие измерительные приборы:

1) по способу представления информации:

- показывающий измерительный прибор — измерительный прибор, допускающий только отсчитывание показаний значений измеряемой величины;

- регистрирующий измерительный прибор — измерительный прибор, в котором предусмотрена регистрация показаний. Регистрация значений может осуществляться в аналоговой или цифровой формах. Различают самопишущие и печатающие регистрирующие приборы;

2) по методу измерений:

- измерительный прибор прямого действия — измерительный прибор, например, манометр, амперметр в котором осуществляется одно или несколько преобразований измеряемой величины и значение её находится без сравнения с известной одноимённой величиной;

- измерительный прибор сравнения — измерительный прибор, предназначенный для непосредственного сравнения измеряемой величины с величиной, значение которой известно;

3) по форме представления показаний:

- аналоговый измерительный прибор — измерительный прибор, по-

¹ Калибровка измерительных приборов — установление зависимости между показаниями средства измерительной техники (прибора) и размером измеряемой (входной) величины. Под калибровкой часто понимают процесс подстройки показаний выходной величины или индикации измерительного инструмента до достижения согласования между эталонной величиной на входе и результатом на выходе (с учётом оговоренной точности).

казания которого или выходной сигнал являются непрерывной функцией изменений измеряемой величины;

- цифровой измерительный прибор — измерительный прибор, показания которого представлены в цифровой форме;

4) по другим признакам:

- суммирующий измерительный прибор — измерительный прибор, показания которого функционально связаны с суммой двух или нескольких величин, подводимых к нему по различным каналам;

- интегрирующий измерительный прибор — измерительный прибор, в котором значение измеряемой величины определяются путём её интегрирования по другой величине;

5) по способу применения и конструктивному исполнению:

- стационарные;

- щитовые;

- панельные;

- переносные;

6) по принципу действия с учётом конструкции:

- с подвижными частями;

- без подвижных частей;

- для приборов с механической частью также по способу создания противодействующего момента:

- механическим противодействием;

- магнитным;

- на основе электромагнитных сил;

7) по характеру шкалы и положению на ней нулевой точки:

- равномерная шкала;

- неравномерная;

- с односторонней, двухсторонней (симметричной и несимметричной);

- с безнулевой шкалой;

8) по конструкции отсчётного устройства:

- непосредственный отсчёт;
- со световым указателем — световым зайчиком;
- с пишущим устройством;
- язычковые — вибрационные частотомеры;
- со шкалой на оптоэлектронном эффекте — люминофор, ЖК, СИД¹;

9) по точности измерений:

- нормируемые и ненормируемые — индикаторы или указатели;

10) по виду используемой энергии (физическому явлению):

- электромеханические;
- электротепловые;
- электрокинетические;
- электрохимические;

11) по роду измеряемой величины [59]:

- вольтметры;
- амперметры;
- веберметры (флюксметры)²;
- частотомеры;
- варметры³ и т.д.

4.1.4. Измерительная установка

Измерительная установка — совокупность функционально объединенных мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей и

¹ Светоизлучающий диод.

² Прибор для определения изменений магнитного потока по ЭДС, индуцируемой в измерительной катушке.

³ Прибор для измерения реактивной мощности в электрических цепях переменного тока.

других устройств, предназначенная для измерений одной или нескольких физических величин и расположенная в одном месте.

Измерительную установку, применяемую для поверки, называют поверочной установкой. Измерительную установку, входящую в состав эталона, называют эталонной установкой.

Примеры:

- установка для измерений удельного сопротивления электротехнических материалов;
- установка для испытаний магнитных материалов.

Некоторые большие измерительные установки называют **измерительными машинами**.

Примеры:

- силоизмерительная машина;
- машина для измерения больших длин в промышленном производстве;
- делительная машина;
- координатно-измерительная машина.

4.2. Метрологические характеристики средств измерений

Все средства измерений, независимо от их конкретного исполнения, обладают рядом общих свойств, необходимых для выполнения ими их функционального назначения. Согласно [60], **метрологическими характеристиками** называются технические характеристики, описывающие эти свойства и оказывающие влияние на результаты и на погрешности измерений, предназначенные для оценки технического уровня и качества средства измерений, для определения результатов измерений и расчетной оценки характеристик инструментальной составляющей погрешности измерений.

Метрологические характеристики регламентируются [46, 60].

Характеристики, устанавливаемые нормативно-техническими документами, называются нормируемыми, а определяемые экспериментально — действительными.

Ниже приведена номенклатура метрологических характеристик:

а) Характеристики, предназначенные для определения результатов измерений (без введения поправок):

- функция преобразования измерительного преобразователя, а также измерительного прибора с наименованной шкалой;
- значение однозначной меры;
- цена деления шкалы измерительного прибора или многозначной меры;
- вид выходного кода для цифровых средств измерений;

б) Характеристики погрешностей средств измерений;

в) Характеристики чувствительности средств измерений к влияющим величинам;

г) Динамические погрешности средств измерений (переходная характеристика, АЧХ, АФХ и т.д.).

К основным метрологическим характеристикам СИ относятся:

- чувствительность;
- динамические характеристики;
- класс точности.

Чувствительность СИ — свойство СИ, определяемое отношением изменения выходного сигнала этого средства к вызывающему его изменению измеряемой величины:

$$S = \varphi(X) = dl / dX, \quad (4.1)$$

где l — перемещение указателя;

X — измеряемая величина.

$S = I / X$ – если S не зависит от измеряемой величины, и шкала прибора равномерна.

Величина $C = 1/S$ называется *постоянной прибора*. Например, если $S = 10$ делений/В, то $C = 0,1$ В/деление.

Параметр, эквивалентный чувствительности, называют *крутизной*

$$S(x) = dF(x) / dx . \quad (4.2)$$

Используют также термины: *чувствительность измерительного преобразователя, коэффициент преобразования, коэффициент передачи, коэффициент усиления*, под которыми подразумевают отношение значения сигнала на выходе измерительного преобразователя к значению вызывающего его сигнала на входе преобразователя.

На практике используется такая метрологическая характеристика, связанная с чувствительностью, как **цена деления шкалы** (постоянная прибора) – разность значений величины, соответствующих двум соседним отметкам шкалы СИ.

Для равномерной шкалы $C_{\Pi} = 1/S_{\Pi}$.

Если шкала прибора неравномерная, т.е. в пределах шкалы цена деления меняется, то нормируется минимальная цена деления.

Иногда в качестве характеристики используется **порог чувствительности** (предельная чувствительность) - характеристика СИ в виде наименьшего значения изменения физической величины, начиная с которого может осуществляться ее измерение данным средством.

Динамические характеристики – это характеристики инерционных свойств СИ. Они определяют зависимость параметров выходного сигнала СИ от меняющихся во времени величин: параметров входного сигнала, нагрузки, внешних факторов.

Динамические характеристики могут нормироваться:

1) функцией связи между входными и выходными сигналами (переда-

точной функцией, переходной характеристикой и т.п.);

2) графиками (таблицами) амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик;

3) временем установления показаний, или быстродействием СИ – величиной, обратной времени установления показаний.

По ГОСТ 8.401-80 [61] средствам измерения присваиваются определенные классы точности.

Класс точности – это обобщенная характеристика, определяемая пределами допускаемых основной погрешности и погрешностей, вызванных изменением значений влияющих величин.

Класс точности средств измерений характеризует их точностные свойства, но не является непосредственным показателем точности измерений, выполняемых с помощью этих средств, так как точность зависит также от метода измерений и условий их выполнения.

Измерительным приборам, пределы допускаемой основной погрешности которых заданы в виде приведённых основных (относительных) погрешностей, присваивают классы точности, выбираемые из ряда следующих чисел: $(1; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0) \times 10^n$, где показатель степени $n = 1; 0; -1; -2$ и т.д.

Основная приведенная погрешность, выраженная в процентах, не должна превышать значение класса точности (к таким приборам относятся регистрирующие и аналоговые показывающие приборы). Для тех приборов, у которых аддитивная и мультипликативная погрешности соизмеримы, класс точности обозначается двумя цифрами через косую черту, например, 0,1/0,05. Погрешность при этом определяется по формуле

$$\delta_{MAX} = \pm [C + d(|X_K|/X - 1)], \quad (4.3)$$

где **C** и **d** – числа, разделяемые косой чертой (класс точности средства измерения);

X_K – больший (по модулю) из пределов измерений (конечное значение диапазона измерений).

Обозначение класса точности C/d должно быть больше единицы.

Это характерно для цифровых показывающих приборов и приборов сравнения с ручным или автоматическим уравниванием.

4.3. Поверка и сертификация средств измерений

В Российской Федерации средства измерений используются для определения величин, единицы которых допущены в установленном порядке к применению в Российской Федерации и должны соответствовать условиям эксплуатации и установленным требованиям.

Решения об отнесении технического устройства к средствам измерений, внесении его в государственный реестр средств измерений, допущенных к использованию в Российской Федерации, и об установлении интервалов между поверками принимает Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии.

На средство измерений утверждённого типа оформляется свидетельство (ранее – сертификат) об утверждении типа средств измерений.

Поверке подлежат только средства измерений, внесенные в государственный реестр средств измерений, допущенных к использованию в Российской Федерации. После процедуры поверки оформляется свидетельство о поверке. Остальные технические устройства подлежат калибровке. После процедуры калибровки оформляется сертификат калибровки.

Средство измерения также может быть выбрано участниками измерения произвольно в тех случаях, когда средства измерений утверждённого типа недоступны или в них нет необходимости.

Поверкой называется установление пригодности средств измерения к применению на основании экспериментально определенных метрологиче-

ских характеристик и контроля их соответствия установленным требованиям.

Различают государственную и ведомственную поверку, а также первичную (при выпуске из производства, после ремонта, при ввозе из - за границы) и периодически проводимую через установленные промежутки времени. Периодические поверки устанавливаются из расчета исправности СИ между поверками. Возможно проведение внеочередной и инспекционной поверки.

Внеочередная поверка проводится, независимо от срока периодической поверки, когда необходимо убедиться в исправности СИ. Внеочередную поверку проводят при контроле поверочного процесса, при повреждении поверочного клейма.

Инспекционная поверка проводится при метрологической ревизии. Поверка осуществляется метрологической службой. Поверочные измерения выполняются при нормальных условиях, которые регламентируются ГОСТ 8.395-80 [62]. Поверка является одним из звеньев передачи размера единицы от эталона к рабочим средствам измерения.

Органом государственной метрологической службы проводится аккредитация на право проведения поверки. По решению государственного стандарта право поверки может быть предоставлено другим организациям при условии их аккредитации на право поверки. Порядок аккредитации устанавливает Госстандарт России. Поверку проводят лица, аттестованные в качестве поверителей в органе государственной метрологической службы.

Поверка подразделяется на 3 части: метрологическую, техническую и административную.

При метрологической поверке устанавливают:

- основную погрешность прибора;
- стабильность, повторяемость и дрейф;
- чувствительность к электромагнитным помехам, разрешающую спо-

способность считывающих устройств и т.д.

При технической поверке осуществляют: поверку общего состояния средств измерения, обнаружение грязи, износа, правильности установки средств измерения, оценку возможности получения неправильных измерений вследствие умышленного неправильного использования.

При административной поверке проверяют наличие знака поверительного клейма или свидетельства (сертификата) о поверке, дату предыдущей поверки, целостность клейм, замков и других устройств, наличие документов (протоколов поверки, ремонтов).

5. Первичные измерительные преобразователи

Первичный измерительный преобразователь (ИП) – первый элемент измерительной системы – является основным источником электрического сигнала, тогда как остальная часть цепи должна обеспечить передачу, обработку и использование сигнала. Надлежащий выбор первичного преобразователя и правильное построение измерительного канала означают, что в сигнал не вносятся дополнительных погрешностей или ограничений сверх тех, которые были ему присущи изначально. Следовательно, от высокого качества преобразователя в первую очередь зависят как более или менее точное соответствие между истинным значением измеряемой величины и значением, полученным при измерениях, так и пределы вносимых в полученную величину погрешностей.

Все первичные преобразователи реализуют тот или иной принцип измерений.

Принцип измерений – физическое явление или эффект, положенный в основу измерений.

Наиболее распространены три группы первичных ИП [63].

1. ИП, использующие механическое перемещение для измерения какого-либо параметра электрической цепи или генерирования измерительного сигнала. Они состоят из двух частей: чувствительного элемента, преобразующего измеряемую величину в механическое перемещение, и преобразователя перемещения в электрическую величину.

2. ИП, использующие зависимость электрической величины, характеризующей чувствительный элемент, от температуры.

3. ИП, использующие изменение электрических свойств объекта измерения с изменением его неэлектрических параметров.

По виду выходной электрической величины ИП делятся на **параметрические и генераторные**.

Выходной величиной **параметрических ИП** является пассивный параметр электрической цепи – сопротивление, емкость, индуктивность или взаимная индуктивность. Применение таких ИП требует вспомогательных источников питания.

Выходной величиной **генераторных преобразователей** является сила тока, ЭДС или напряжение. Таким образом, они сами являются источниками электрического сигнала.

5.1. Параметрические измерительные преобразователи

5.1.1. Резистивные измерительные преобразователи

Принцип действия резистивных ИП основан на зависимости сопротивления постоянному току от измеряемой неэлектрической величины

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (5.1)$$

где ρ – удельное сопротивление материала проводника;

l – его длина;

S – площадь поперечного сечения.

Первую и наиболее простую группу составляют **контактные ИП**, в которых входная неэлектрическая величина преобразуется в замкнутое или разомкнутое состояние контактов, управляющих электрической цепью. Естественной входной величиной является механическое перемещение, а выходной – сопротивление контакта. Такие ИП применяются при допусковом контроле механических и теплотехнических параметров деталей и процессов.

Основными параметрами контактных ИП можно считать сопротивление между контактами в замкнутом и разомкнутом состоянии и мощность управляющей ими цепи.

Электрический и механический износ контактных групп будут являться источниками погрешностей.

Вторая группа резистивных ИП – это **реостатные ИП**. Они применяются для измерения давления, уровня, массы, а также в следящих системах.

Реостатный ИП представляет собой резистор переменного сопротивления (потенциометр, реостат, реохорд), подвижная щетка которого перемещается под воздействием неэлектрической величины, изменяя его выходное сопротивление.

Входной величиной является угловое или линейное перемещение движка, а выходной – изменение активного сопротивления.

К основным параметрам реостатных ИП относятся номинальное сопротивление, максимальная рассеиваемая на резистивном элементе мощность при номинальном сопротивлении, вид функциональной зависимости, чувствительность, погрешность преобразования.

Реостатные ИП включаются в основном в потенциометрические (делитель напряжения) и мостовые измерительные цепи. Питание измерительной цепи осуществляется постоянным или переменным током.

Источниками погрешностей будут температурное изменение сопротивления ИП; погрешность дискретности, обусловленная скачкообразным изменением сопротивления ИП при переходе движка с одного витка на другой; погрешность из-за гистерезиса, вызванная трением в реостатном ИП.

К **третьей** группе резистивных ИП относятся **тензорезистивные ИП**, основанные на зависимости электрического сопротивления материала проводника от механического напряжения (явление тензоэффекта).

Относительное изменение сопротивления прямо пропорционально величине деформации

$$\frac{\Delta R}{R} = G \cdot \varepsilon, \quad (5.2)$$

где ε - величина деформации,

$G = \text{const}$ – тензометрический коэффициент.

Для большинства материалов он больше нуля, что соответствует росту сопротивления при увеличении деформации.

При измерениях тензорезистивные ИП включаются в мостовые и потенциометрические измерительные цепи.

Источником погрешности является температурная зависимость сопротивления и коэффициента деформации линейного теплового расширения исследуемой детали, вызывающая «ползучесть» характеристики вследствие остаточных деформаций решетки и вследствие старения, а также снижение чувствительности с ростом частоты изменения измеряемой деформации.

Четвертую группу резистивных ИП составляют **терморезистивные (термочувствительные)** преобразователи, в которых используется зависимость сопротивления проводника (или полупроводника) от температуры

$$R_t = R_0(1 + \alpha t + \beta t^2 + \gamma t^3 + \dots), \quad (5.3)$$

где R_t – сопротивление отрезка провода при температуре t °C;

R_0 – его сопротивление при 0 °C;

α, β, γ - коэффициенты температурной чувствительности сопротивления, причем $\alpha > \beta > \gamma$.

Входной величиной терморезистивных преобразователей является температура, а выходной – электрическое сопротивление.

Для большинства металлов сопротивление увеличивается в зависимости от температуры в основном по линейному закону, а коэффициенты β и γ являются коэффициентами более высокого порядка, которые малы, и ими можно пренебречь. Тогда функция преобразования становится линейной

$$R_t = R_0(1 + \alpha t). \quad (5.4)$$

Но такая зависимость справедлива лишь для небольшого частотного диапазона.

В чистых металлах кристаллическая решетка не имеет примесей или искажений, и следовательно, $\alpha > 0$. Сопротивление электрическому току обу-

словлено взаимодействием свободных электронов проводимости с колеблющимися атомами кристаллической решетки, что приводит к росту сопротивления с ростом температуры (температурный коэффициент сопротивления (ТКС) положителен).

В полупроводниковых материалах этот эффект скрыт более сильным эффектом: число свободных носителей заряда зависит от абсолютной температуры. Чем выше температура, тем больше электронов из валентной зоны преодолевает запрещенную зону и попадает в зону проводимости (в случае чистых полупроводников) или возрастает количество активированных донорных или акцепторных атомов (в случае примесных полупроводников). Число свободных носителей заряда увеличивается согласно соотношению

$$n = n_0 \cdot e^{\frac{E_g}{2kt}}, \quad (5.5)$$

где E_g – энергия, необходимая для преодоления запрещенной зоны;

k – постоянная Больцмана.

Следовательно, сопротивление полупроводника уменьшается с повышением температуры, в температурный коэффициент сопротивления (ТКС) отрицателен.

ТКС терморезистивных преобразователей определяется по формуле

$$\alpha_t = \frac{\Delta R}{R_0 \cdot \Delta t}, \quad (5.6)$$

где R_0 – сопротивление при начальной температуре (обычно это ноль или температура нормальных условий),

Δt может выражаться либо в °С, либо в Кельвинах.

Зависимость ТКС от температуры может быть линейной, квадратичной или более сложной, но ТКС может и не зависеть от температуры.

Металлические терморезистивные преобразователи получили название терморезисторов, а полупроводниковые – термисторов.

Материалы для терморезистивных ИП должны иметь высокостабильный и большой ТКС, линейную зависимость сопротивления от температуры, хорошую воспроизводимость свойств и инертность к воздействию окружающей среды. К таким материалам относятся медь, платина, вольфрам, никель, полупроводники на основе окислов переходных металлов (титана, кобальта, никеля), титанат натрия, двуокись ванадия и т.п.

Терморезистивные ИП применяются для измерения температуры, скорости потоков, плотности, состава, теплопроводности газов и жидкостей, вакуума.

Источниками погрешностей являются:

- нестабильность во времени начального сопротивления и температурного коэффициента сопротивления;
- сопротивление проводов, соединяющих ИП с измерительным устройством;
- нелинейность функции преобразования;
- тепловая инерционность;
- нагрев ИП измерительным током.

К **пятой** группе резистивных преобразователей относятся **фоторезистивные ИП**. Принцип их действия основан на явлении внутреннего фотоэффекта, т.е. освобождения электрических зарядов в материале преобразователя под действием света, и обусловленным этим увеличением проводимости (соответственно, уменьшением электрического сопротивления). Этот эффект присущ только полупроводниковым материалам, таким, как сернистый свинец, селенид кадмия, монокристаллический сернистый кадмий. Наиболее часто используется сернистый кадмий CdS, так как его чувствительность к цветовому спектру очень близка к спектральной чувствительности человеческого глаза. При этом максимальная чувствительность реализуется на длине волны порядка 0,6 мкм, а сопротивление изменяется от мегомов в условиях

темноты до нескольких сотен Ом при ярком свете. Время отклика на световой импульс обычно близко к 50 мс. Функция преобразования фоторезистивного ИП представлена на рис. 5.1.

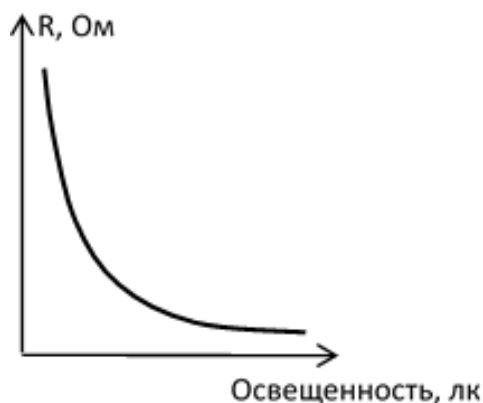


Рис. 5.1. Функция преобразования фоторезистивного преобразователя

Как видно, функция преобразования нелинейна, но ее можно линеаризовать в ограниченном диапазоне с помощью постоянного резистора, включенного параллельно фоторезистору (шунтирование фоторезистора).

Сопrotивление освещенного фоторезистора зависит от температуры, однако чувствительность к температуре с ростом освещенности ослабевает.

Фоторезистивные ИП находят применение в таких исследованиях, когда не требуется прецизионных измерений, а делается оценка уровня принимаемого поля (регистрируется свет – темнота или наличие светового импульса).

При использовании фоторезистора в качестве приемника оптических сигналов сам фоторезистор и его схема преобразуют в форму электрических импульсов оптические импульсы, которые получаютс я, когда световой поток попеременно пропускается или прерывается в ритме, несущем требуемую информацию (например, счет предметов, измерение скорости вращения диска и т.п.).

5.1.2. Емкостные измерительные преобразователи

Принцип действия емкостных ИП основан на зависимости емкости конденсатора от размеров и взаимного расположения его обкладок, а также от диэлектрической проницаемости среды между ними.

Зависимость емкости конденсатора от размеров его обкладок и от вза-

имного расположения пластин используется для измерения перемещений и величин, которые могут быть преобразованы в перемещение, а зависимость емкости от диэлектрической проницаемости среды между обкладками – для измерения уровня жидкости, влажности, толщины материалов из диэлектрика.

Конденсатор, образованный двумя параллельными пластинами, разделенными диэлектриком, имеет емкость

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}, \quad (5.7)$$

где S – площадь поперечного сечения в перекрывающемся пространстве между двумя пластинами;

d – расстояние между пластинами;

$\varepsilon, \varepsilon_0$ – соответственно, диэлектрическая проницаемость среды между обкладками и вакуума.

Основным принципом построения емкостных ИП является изменение расстояния между пластинами и вариация диэлектрических свойств изолятора. Соответственно этому и имеется ряд различных конструкций емкостных ИП.

5.1.2.1. Емкостный ИП с изменяемым расстоянием между пластинами

Если одна пластина конденсатора зафиксирована, то изменение положения подвижной пластины ведет к изменению величины емкости (рис. 5.2).

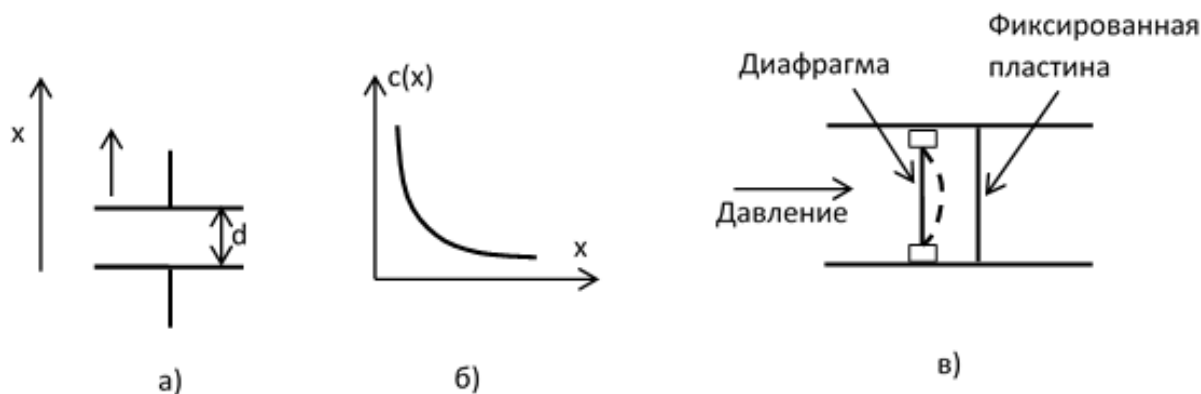


Рис. 5.2. Емкостные измерительные преобразователи с переменным расстоянием между пластинами

Если одна пластина конденсатора зафиксирована (рис. 5.2а), то изменение положения подвижной пластины ведет к изменению величины емкости. Такой преобразователь можно применять для измерения малых приращений смещения без контакта с измеряемым объектом. На рис. 5.2в изображен преобразователь, с помощью которого можно измерять давление.

Функция преобразования обоих преобразователей изображена на рис. 5.2б.

5.1.2.2. Емкостный ИП с переменной площадью пластин

Такая конструкция применяется в качестве выходного преобразователя для измерения электрических напряжений (емкостный потенциометр) (рис. 5.3).

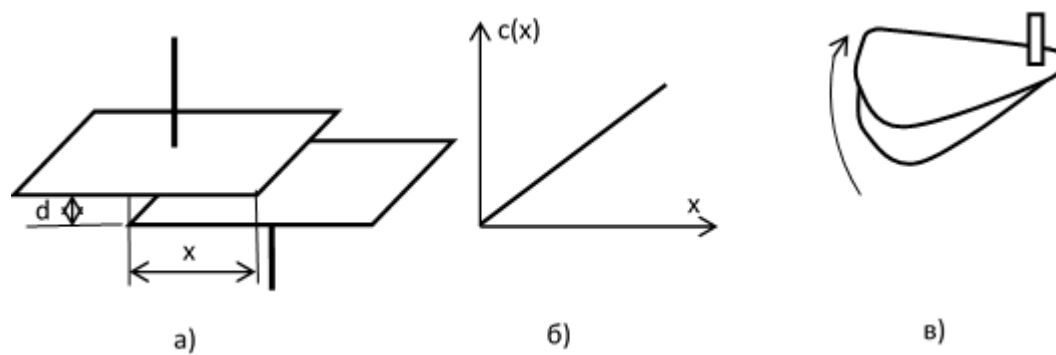


Рис. 5.3. Емкостный ИП с переменной площадью пластин

5.1.2.3. Емкостный ИП с изменяющимся положением диэлектрика

Действие емкостного ИП с изменяющимся положением диэлектрика основано на изменении относительного количества двух различных диэлектриков между пластинами конденсатора (рис. 5.4).

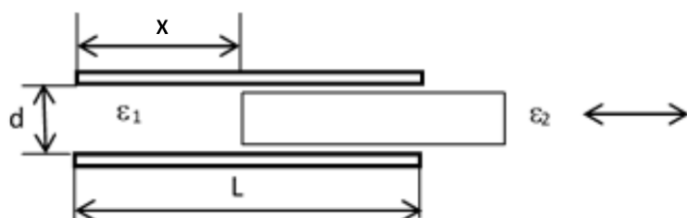


Рис. 5.4. Емкостный ИП с изменяющимся положением диэлектрика

Такое устройство может рассматриваться как параллельное соединение двух конденсаторов. Следовательно, их общая емкость будет

равна сумме емкостей двух конденсаторов, образованных диэлектриками

$$C = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_0 b x}{d} + \frac{\varepsilon_2 \varepsilon_0 b (L - x)}{d} = \frac{\varepsilon_0 b}{d} [\varepsilon_2 L - (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) x]. \quad (5.8)$$

Таким образом, емкость конденсатора зависит от смещения x и может быть использована для измерения перемещения x . Функция преобразования такого преобразователя линейна.

Разновидностью такого преобразователя является преобразователь для измерения уровня жидкости, в котором пластины конденсатора образованы двумя проводящими концентрическими цилиндрами с двумя диэлектриками между ними.

При большом числе промежуточных преобразований в приборах прямого преобразования существенно возрастает суммарная погрешность. Для ее снижения применяют **дифференциальные ИП**, которые имеют меньшую аддитивную погрешность, меньшую нелинейность функции преобразования и повышенную чувствительность по сравнению с аналогичными недифференциальными ИП. Особенностью таких преобразователей является наличие двух каналов – преобразования и дифференциального звена, имеющего один вход и два выхода (рис. 5.5).

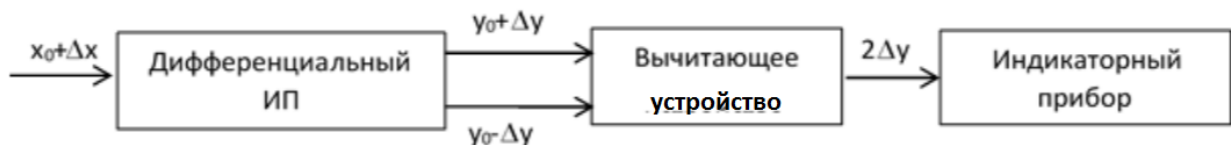


Рис. 5.5. Структурная схема дифференциального ИП

При изменении входной величины x относительно начального значения x_0 выходные величины Y дифференциального ИП получают приращения с разными знаками относительно начального значения Y .

Дифференциальный вариант емкостного ИП представлен на рис. 5.6.

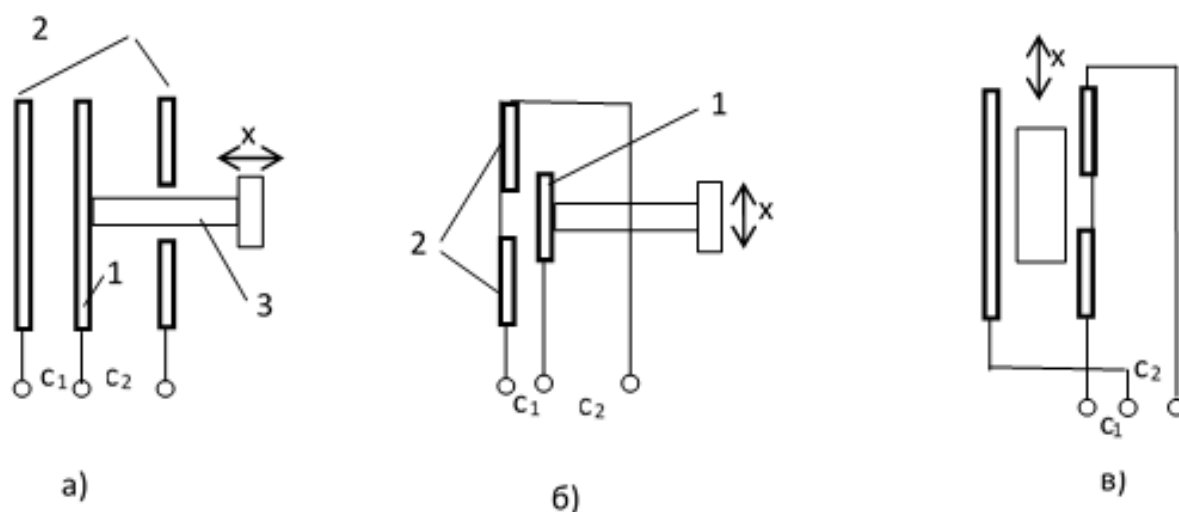


Рис. 5.6. Дифференциальные емкостные преобразователи:

а – с изменяемым расстоянием между пластинами;

б – с изменяемой площадью перекрытия пластин;

в – с изменяемым положением диэлектрика;

1 – подвижные пластины; 2 – неподвижные пластины; 3 – шток

Благодаря повышенной чувствительности дифференциальные емкостные ИП могут использоваться для измерения малых (менее 1,0 мм) перемещений.

Погрешности преобразования емкостных ИП могут вызываться колебаниями температуры, влияющими как на линейные размеры, так и на диэлектрическую проницаемость; паразитными реактивностями; неточностью изготовления, особенно электродов сложной формы.

5.1.3. Индуктивные измерительные преобразователи

Действие индуктивных ИП основано на зависимости индуктивности или взаимной индуктивности обмоток преобразователя от положения отдельных элементов магнитопровода, на котором они расположены и перемещение которых определяется чувствительным элементом, воспринимающим измеряемую величину. Такие преобразователи используются для измерения механических перемещений, давлений, усилий, моментов, расходов и других величин, преобразуемых в механические перемещения (рис. 5.7).

Величина магнитного потока в последовательной цепи зависит от магнитного сопротивления элементов этой цепи. Слой воздуха между ферромагнитной пластиной и ферромагнитным сердечником также является частью цепи. Величина зазора изменяется с перемещением пластины относительно магнитопровода. Следовательно, изменяется магнитный поток в цепи, а с ним и индуктивность катушки на сердечнике. Таким образом, величину перемещения можно определить по изменению индуктивности катушки.

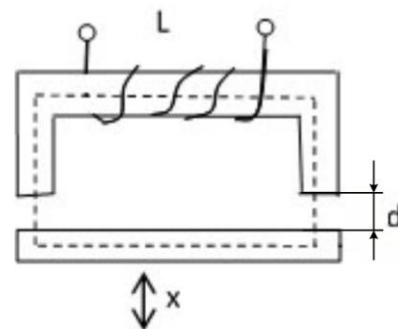


Рис. 5.7. Индуктивный измерительный преобразователь. Пунктиром показан путь магнитного потока

Общее магнитное сопротивление A последовательной цепи равно сумме магнитных сопротивлений сердечника, пластины и воздушных зазоров. Если зазор равен нулю ($d = 0$), а магнитное сопротивление сердечника и пластины в сумме равно A_0 , то общее магнитное сопротивление цепи можно найти по формуле

$$A = A_0 + \frac{2 \cdot d}{\mu_0 \cdot S}, \quad (5.9)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума;

S – площадь поперечного сечения зазора.

Учитывая, что индуктивность катушки $L = N^2 / A$, и обозначив отношение

$$\frac{2}{\mu_0 \cdot A_0 \cdot S}, \quad (5.10)$$

через $k = \text{const}$, получим функцию преобразования индуктивного ИП

$$L = \frac{L_0}{1 + k \cdot d}, \quad (5.11)$$

где L_0 – индуктивность катушки в случае, когда величина зазора d равна нулю.

Как видно функция преобразования нелинейна.

Индуктивные ИП можно также конструировать как дифференциальные. Здесь, так же, как и в случае емкостных ИП, имеется три возможности построения: с переменной величиной зазора магнитопровода, с переменной площадью зазора магнитопровода и с переменной магнитной проницаемостью зазора. Все эти меры позволяют увеличить чувствительность преобразователя.

Действие взаимоиндуктивных (трансформаторных) ИП основано на изменении взаимной индуктивности катушек под действием механических перемещений. При этом может перемещаться как сердечник или его часть, так и одна из катушек индуктивности.

Взаимоиндуктивный ИП, предназначенный для измерения линейных перемещений, состоит из двух обмоток с разным количеством витков. Одна обмотка питается от источника переменного тока, и ЭДС, наведенная во второй обмотке, является функцией зазора d .

Для измерения угловых перемещений вторую обмотку выполняют в виде цилиндра, который может вращаться в кольцевом зазоре, образованном магнитопроводом и магнитным сердечником. Такой ИП позволяет измерять большие угловые перемещения.

Источником погрешностей индуктивных и взаимоиндуктивных ИП будет температурная зависимость активной составляющей сопротивления.

5.2. Генераторные измерительные преобразователи

Выходной величиной генераторных ИП является сила тока либо напряжение.

Генераторные ИП применяются для:

- преобразования магнитных величин в свободном пространстве и в магнитных материалах;
- определения характеристик магнитных материалов;
- неразрушающего контроля качества материалов методами магнит-

ного, структурного анализа и магнитной дефектоскопии;

- исследования электромагнитных механизмов приборов и устройств и их отдельных узлов;
- физических исследований атомов и элементарных частиц;
- исследования магнитного поля Земли, космического пространства, планет;
- геологических исследований земной коры;
- медицинских исследований.

Для преобразования магнитных величин в электрические используются различные проявления магнитного поля: электрическое, механическое, оптическое и др.

5.2.1. Индукционные магнитоизмерительные преобразователи

Действие индукционных магнитоизмерительных преобразователей основано на явлении электромагнитной индукции. Измерительная катушка является ИП, посредством которого магнитные величины могут быть преобразованы в ЭДС.

При изменении магнитного потока Φ в катушке возникает ЭДС

$$E = -w_{\kappa} \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\Psi}{dt}, \quad (5.12)$$

где w_{κ} – количество витков в катушке;

$\Psi = w_{\kappa} \Phi$ – потокосцепление магнитного поля с измерительной катушкой.

Если магнитное поле однородно в пределах катушки и ориентировано вдоль оси катушки, то

$$E = -w_{\kappa} \cdot S_{\kappa} \frac{dB}{dt} = -\mu \cdot w_{\kappa} \cdot S_{\kappa} \frac{dH}{dt}, \quad (5.13)$$

где S_{κ} – площадь каждого из витков;

μ – магнитная проницаемость среды;

H – напряженность магнитного поля.

Если ось катушки составляет с вектором напряженности угол α , то

$$E = -w_k \cdot S_k \frac{d}{dt} (H \cdot \mu \cdot \cos \alpha). \quad (5.14)$$

Следовательно, можно выделить три разновидности магнитоизмерительных преобразователей в виде индукционных катушек:

- преобразователи, у которых изменение магнитного потока Φ осуществляется за счет изменения напряженности магнитного поля H ;
- преобразователи, у которых изменение магнитного потока Φ осуществляется за счет изменения $\cos \alpha$;
- преобразователи, у которых изменение магнитного потока Φ осуществляется за счет изменения магнитной проницаемости μ среды, в которой действует магнитное поле.

Последний тип преобразователей получил название ферроиндукционных измерительных преобразователей.

Размеры, форма и конструкция катушек определяются назначением. При измерениях в воздушных средах применяются цилиндрические или плоские прямоугольного сечения катушки, размеры которых тем меньше, чем больше неоднородность поля. Для измерения напряженности магнитного поля у поверхности постоянных магнитов и намагниченных тел применяются миниатюрные плоские катушки прямоугольного сечения, а у поверхности листовых ферромагнитных материалов – длинные плоские катушки, выполненные на очень тонком (узком) каркасе. При измерениях внутри магнитных материалов катушки наматываются непосредственно на образец. При измерениях в переменных магнитных полях применяются неподвижные катушки.

5.2.2. Сверхпроводниковые преобразователи

Сверхпроводниковые преобразователи применяются для преобразования параметров постоянных и переменных полей в электрический ток или напряжение, частота которого пропорциональна изменению измеряемой

магнитной величины (магнитного потока или магнитной индукции).

В основу действия сверхпроводниковых преобразователей положены два эффекта, имеющих место в сверхпроводящих материалах при низких температурах.

Первый – это явление квантования магнитного потока, заключающееся в том, что магнитный поток, пересекающий сверхпроводящее кольцо, может принимать значения, кратные кванту магнитного потока

$$\Phi_0 = \frac{h}{2e} = 2,1 \cdot 10^{-5} \text{ Вб} , \quad (5.15)$$

где h – постоянная Планка,

e – заряд электрона.

Второй – это эффект Джозефсона, имеющий место в переходе «сверхпроводник – диэлектрик – сверхпроводник»: в сверхпроводящем состоянии через переход протекает ток без падения напряжения на диэлектрике. Если ток превысит некоторое критическое значение I_k , то на переходе возникнет падение напряжения и в переходе потечет ток с частотой

$$f = U \frac{2 \cdot e}{h} = \frac{U}{\Phi_0} . \quad (5.16)$$

Сверхпроводниковый ИП представляет собой сверхпроводящее кольцо с одним или двумя джозефсоновскими переходами. Такая конструкция получила название сверхпроводящего квантового интерферометра (СКВИД¹). Он преобразует изменения магнитного потока или магнитной индукции в количество периодических изменений напряжения, снимаемого с преобразователя. Структурная схема прибора для измерения магнитного потока представлена на рис. 5.8.

¹ От англ. SQUID, Superconducting Quantum Interference Device — «сверхпроводящий квантовый интерферометр».

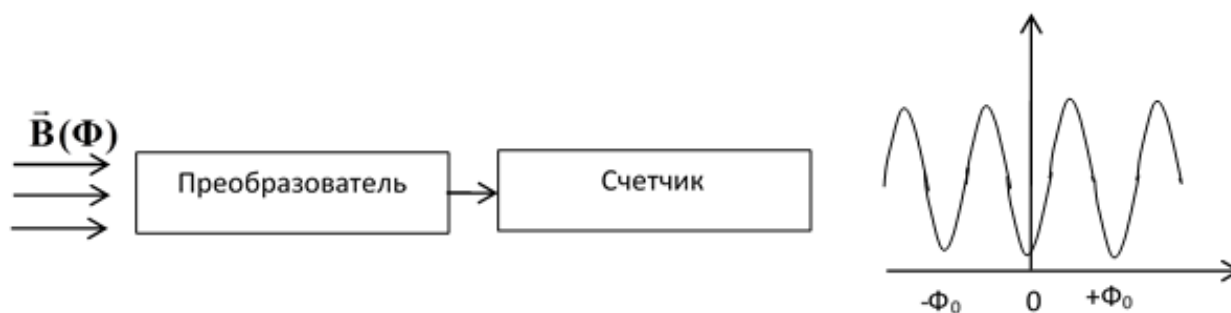


Рис. 5.8. Структурная схема тесламетра на основе сверхпроводящего преобразователя

5.2.3. Измерительные преобразователи Холла

Действие измерительных преобразователей Холла основано на эффекте возникновения поперечной разности потенциалов (так называемой ЭДС Холла) на боковых гранях полупроводниковой пластины при помещении ее в поперечное магнитное поле и пропускании через нее электрического тока в продольном направлении (рис. 5.9).

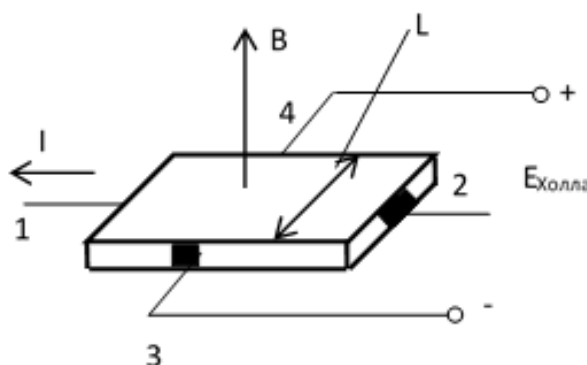


Рис. 5.9. Преобразователь Холла

ЭДС Холла можно определить из следующего выражения

$$E_{\text{Холла}} = R_{\text{Холла}} \cdot \varphi(\kappa_{\text{геом}}, \Theta) \cdot I \cdot B \cdot \cos(\alpha/d), \quad (5.17)$$

где $R_{\text{Холла}}$ – постоянная Холла, зависящая от свойств материала преобразователя;

$\varphi(\kappa_{\text{геом}}, \Theta)$ – величина, зависящая от геометрии преобразователя и так называемого угла Холла α между векторами плотности тока и напряженности вызывающего его электрического поля;

d – толщина пластинки.

5.2.4. Преобразователи Гаусса

В основу принципа работы преобразователей Гаусса положен эффект изменения внутреннего сопротивления некоторых материалов в магнитном поле вследствие изменения подвижности носителей заряда. Под действием магнитного поля траектории носителей искривляются, вследствие чего скорость их движения в направлении электрического поля уменьшается.

Такие преобразователи используются в приборах для измерения магнитной индукции в постоянных и переменных магнитных полях (особенно в сильных).

5.2.5. Пьезоэлектрические преобразователи

В пьезоэлектрических ИП используются так называемые прямой и обратный пьезоэлектрические эффекты.

При прямом пьезоэффекте под воздействием механических напряжений на поверхностях кристаллов возникает электрический заряд, прямо пропорциональный приложенной силе

$$q = C \cdot F, \quad (5.18)$$

где F – сила;

C – чувствительность преобразователя.

К пьезоэлектрикам можно отнести такие материалы, как кварц, сегнетова соль, турмалин, пьезоэлектрическая керамика (цирконат и титанат свинца).

При обратном пьезоэффекте разность потенциалов, приложенная к поверхностям кристалла, вызывает его деформацию. Если при этом использовать переменный ток высокой частоты, то кристалл будет создавать высокочастотные механические колебания, и таким образом мы получим ультразвуковой генератор.

5.2.6. Термоэлектрические преобразователи

Действие термоэлектрических преобразователей основано на термоэлектрическом эффекте в цепи термопары (явлении Зеебека). Если в месте соединения двух разнородных проводников (термопары) изменилась температура, то между свободными концами термопары возникает ЭДС, определяемая следующим выражением

$$E = \alpha_1 E + \alpha_2 T^2 + \alpha_3 T^3 + \dots, \alpha_1 > \alpha_2 > \alpha_3. \quad (5.19)$$

Величина ЭДС зависит от типа двух металлов и температур места соединения. Обычно одно соединение поддерживается при температуре 0 °С.

Функцию преобразования термопары определяют в результате градуировки. Для большинства термопар функция преобразования имеет вид, представленный на рис. 5.10.

В большинстве случаев применяются следующие типы термопар: хромель – константан, железо – константан, хромель – алюмель, платина – (родий + платина), платина – палладий и др. Источниками погрешностей являются несоответствие температур свободного спая термопары температуре, при которой проводилась градуировка; изменение сопротивления термопары вследствие изменения измеряемой температуры.

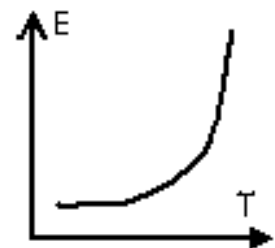


Рис. 5.10. Функция преобразования термопары

5.2.7. Фотоэлектрические преобразователи

Действие фотоэлектрических преобразователей основано на преобразовании информации, содержащейся в видимом свете, или излучении соседних длин волн – ультрафиолетовом и инфракрасном, в электрические сигналы.

Можно выделить три типа преобразователей:

- преобразователи с внешним фотоэффектом;
- преобразователи с внутренним фотоэффектом;

– фотогальванические преобразователи.

К **преобразователям с внешним фотоэффектом** относятся вакуумные и газонаполненные фотоэлементы и фотоумножители.

Вакуумные фотоэлементы представляют собой стеклянную колбу со встроенными анодом и фотокатодом, из которой откачан воздух. При освещении фотокатода под влиянием фотонов света происходит эмиссия электронов. Если между анодом и фотокатодом приложено электрическое напряжение, то возникает электрический ток (фототок). Величина фототока определяется интенсивностью света, падающего на фотокатод. Материалы фотокатода (двойные щелочи на основе калия и цезия, натрия и калия) определяют чувствительность прибора и длины волн, на которые он реагирует (от 200 до 700 нм).

Газонаполненные фотоэлементы заполнены инертными газами (неоном, аргоном, криптоном, ксеноном). Благодаря ионизации газа происходит усиление тока фотоэмиссии и, как следствие, увеличение чувствительности (до 100 – 250 мкА / лм). Чувствительность сильно зависит от напряжения питания, следовательно, напряжение питания должно стабилизироваться и не превышать значений 200 – 240 В, так как при больших напряжениях начинается область самостоятельного разряда.

В газонаполненных фотоэлементах максимальная амплитуда фототока достигается лишь через некоторое время после начала освещения (по мере развития газового разряда), следовательно, их возможно применять на частотах, не превышающих нескольких сотен герц.

Фотоэлектронные умножители (ФЭУ) представляют собой вакуумный фотоэлемент, снабженный системой электродов для усиления тока фотоэмиссии за счет использования вторичной фотоэмиссии. Коэффициент усиления может достигать 100000. Используются для определения очень низких уровней освещенности.

Фотогальванические ИП – это фотоэлектронные приборы с р-п-переходом: фотодиоды и фототранзисторы.

Фотодиод представляет собой обычный диод в корпусе, в котором имеется окошко, позволяющее свету попадать в полупроводниковое соединение. Схема включения фотодиода в электрическую цепь представлена на рис. 5.11.

Ток, протекающий через фотодиод, прямо пропорционален интенсивности света. Выходной сигнал снимается в виде разности потенциалов на резисторе, включенном последовательно с диодом.

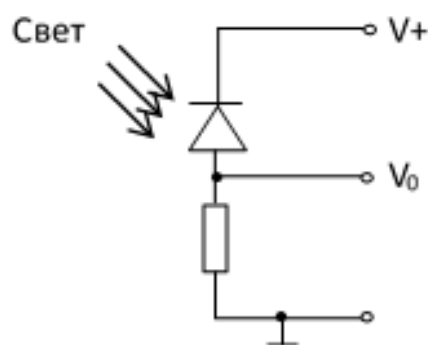


Рис. 5.11. Схема включения фотодиода в электрическую цепь

5.2.8. Гальванические преобразователи

Действие гальванических ИП основано на зависимости потенциала электрода от концентрации ионов в растворе. Преобразователь состоит из двух полуэлементов, заполненных электролитом и соединенных с помощью гальванического ключа, представляющего собой трубку с KCl , закрытую с двух сторон полупроницаемыми пробками. Один полуэлемент заполнен электролитом с известной концентрацией, а другой – электролитом, концентрация которого измеряется. Металлические электроды, погруженные в раствор электролита, частично в нем растворяются, и положительные ионы металла переходят в раствор, а электрод получает положительный заряд. При равновесии электрический потенциал электрода зависит от концентрации ионов в растворе и может служить для определения их концентрации. ЭДС на выходе преобразователя определяется неизвестной концентрацией.

Гальванические ИП применяются в химической, нефтяной, пищевой промышленности при измерении концентраций ионов в растворах, газах, при измерении влажности.

6. Измерительные системы

6.1. Классификация измерительных систем

Измерительная система (ИС) – совокупность измерительных, связующих, вычислительных компонентов, образующих измерительные каналы, и вспомогательных устройств (компонентов измерительной системы), функционирующих как единое целое [64], предназначенная для:

- получения информации о состоянии объекта с помощью измерительных преобразований в общем случае множества изменяющихся во времени и распределенных в пространстве величин, характеризующих это состояние;
- машинной обработки результатов измерений;
- регистрации и индикации результатов измерений и результатов их машинной обработки;
- преобразования этих данных в выходные сигналы системы в разных целях.

Измерительный канал ИС – конструктивно или функционально выделяемая часть ИС, выполняющая законченную функцию от восприятия измеряемой величины до получения результата ее измерений, выражаемого числом или соответствующим ему кодом, или до получения аналогового сигнала, один из параметров которого — функция измеряемой величины.

Измерительные каналы ИС могут быть простыми и сложными. В простом измерительном канале реализуется прямой метод измерений путем последовательных измерительных преобразований. Сложный измерительный канал в первичной части представляет собой совокупность нескольких простых измерительных каналов, сигналы с выхода которых используются для получения результата косвенных, совокупных или совместных измерений или для получения пропорционального ему сигнала во вторичной части сложного измерительного канала ИС.

Компонент ИС – входящее в состав ИС техническое устройство, выпол-

няющее одну из функций, предусмотренных процессом измерений.

В соответствии с этими функциями компоненты подразделяют на измерительные, связующие, вычислительные, комплексные и вспомогательные.

Измерительный компонент ИС – средство измерений, для которого отдельно нормированы метрологические характеристики, например измерительный прибор, измерительный преобразователь (первичный, включая устройства для передачи воздействия измеряемой величины на чувствительный элемент; промежуточный, в том числе модуль аналогового ввода-вывода, измерительный коммутатор, искробезопасный барьер, аналоговый фильтр и т.п.), мера.

К измерительным компонентам относят и так называемые аналоговые «вычислительные» устройства, выполняющие, по существу, не вычисления (операции над числами), а измерительные преобразования. Такие устройства относят к группе аналоговых функциональных преобразователей или приборов с одним или несколькими входами.

Связующий компонент ИС – техническое устройство или часть окружающей среды, предназначенное или используемое для передачи с минимально возможными искажениями сигналов, несущих информацию об измеряемой величине от одного компонента ИС к другому (проводная линия связи, радиоканал, телефонная линия связи, высоковольтная линия электропередачи с соответствующей каналообразующей аппаратурой, а также переходные устройства — калымные колодки, кабельные разъемы и т.п.).

Вычислительный компонент ИС – цифровое вычислительное устройство (или его часть) с программным обеспечением, выполняющее вычисления результатов прямых, косвенных, совместных или совокупных измерений (выражаемых числом или соответствующим ему кодом) по результатам первичных измерительных преобразований в ИС, а также логические операции и управление работой ИС.

В отдельных случаях вычислительный компонент может входить в состав измерительного компонента, метрологические характеристики которого нормированы с учетом программы, реализуемой вычислительным компонентом.

Комплексный компонент ИС – конструктивно объединенная или территориально локализованная совокупность компонентов, составляющая часть ИС, завершающая, как правило, измерительные преобразования, вычислительные и логические операции, предусмотренные процессом измерений и алгоритмами обработки результатов измерений в иных целях, а также выработки выходных сигналов системы.

Комплексный компонент ИС — это вторичная часть ИС, воспринимающая, как правило, сигналы от первичных измерительных преобразователей.

Примерами комплексных компонентов ИС могут служить контроллеры, программно-технические комплексы, блоки удаленного ввода-вывода и т. п.

Комплексный компонент ИС, а также некоторые измерительные и связующие компоненты ИС могут представлять собой многоканальные устройства. В этом случае различают измерительные каналы указанных компонентов.

Вспомогательный компонент ИС – техническое устройство (блок питания, система вентиляции, устройства, обеспечивающие удобство управления и эксплуатации ИС и т. п.), обеспечивающее нормальное функционирование ИС, но не участвующее непосредственно в измерительных преобразованиях.

ИС являются разновидностью средств измерений и на них распространяются все общие требования к средствам измерений.

Измерительную систему, перестраиваемую в зависимости от изменения измерительной задачи, называют *гибкой измерительной системой* (ГИС).

Измерительная система, в которой предусмотрена возможность предоставления информации оператору, называется *информационно-измерительной системой* (ИИС) [65, 66].

ИИС используются в тех случаях, когда в системе требуется организация большого массива измерений различных физических величин. Например, турбогенератор мощностью 1200 МВт при испытаниях контролируется с помощью 1500 первичных измерительных преобразователей. На Саяно-Шушенской ГЭС контроль за состоянием сооружений и работой агрегатов осуществлялся посредством 3000 первичных измерительных преобразователей. В этих условиях оператору невозможно отслеживать показания непосредственно. Кроме того, если преобразователей немного, но процессы – быстропротекающие, оперативный контроль тоже практически невозможен.

ИИС подразделяются на:

- 1) системы сбора измерительной информации, их называют измерительными системами;
- 2) системы автоматического контроля, предназначенные для контроля за работой разного рода машин, агрегатов или технологических процессов;
- 3) системы технического диагностирования, служащие для выявления технической неисправности различных изделий;
- 4) телеизмерительные системы, предназначенные для сбора измерительной информации с удаленных на большие расстояния объектов.

Современные ИИС строятся на основе агрегатного принципа, т.е. на основе выпускаемых функциональных узлов, объединенных общим алгоритмом функционирования. Унифицированные функциональные узлы (блоки и модули), предназначенные для построения ИИС, образуют агрегатные комплексы Государственной системы промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП). В СССР к 1985 г. было создано около 20 агрегатных комплексов (АСЭТ, АСВТ, АСКР и др.).

Изделия, входящие в агрегатный комплекс, должны легко сопрягаться друг с другом без дополнительных устройств, т.е. обладать так называемой совместимостью. Различают шесть видов совместимости:

1. Энергетическая совместимость по трём видам используемой энергии: электрической, пневматической, гидравлической.

2. Функциональная. Изделия должны быть взаимоувязаны для совместной работы.

3. Метрологическая. Должна быть обеспечена сопоставимость метрологических характеристик в измерительном тракте, составленном из нескольких приборов.

4. Конструктивная. Должны быть обеспечены единая форма и стиль конструктива и механических соединений.

5. Эксплуатационная. Должны быть сопоставимы характеристики надёжности, стабильности, степени влияния внешних факторов.

6. Информационная. Должна быть обеспечена согласованность входных и выходных сигналов по виду, диапазону изменения, порядку обмена сигналами между узлами и внешней средой.

Информационная совместимость достигается унификацией измерительных сигналов, применением стандартных интерфейсов. Например, для измерительных преобразователей с токовым выходом стандарт ГСП нормирует диапазон изменения выходного тока от 0 до 5 мА или от 4 до 20 мА, а для преобразователей с выходом по напряжению – от 0 до 10 В.

Понятие «интерфейс» охватывает электрические, логические и конструктивные условия, устанавливающие требования к соединяемым функциональным узлам и связям между ними.

Электрические условия определяют требования к параметрам сигналов взаимодействия и способу их передачи, а логические условия – номенклатуру сигналов, пространственные и временные соотношения между ними.

Конструктивные условия устанавливают конкретные требования к элементам интерфейса: вид разъема, его месторасположение, порядок распайки контактов (цоколевка) и т.д.

Важной разновидностью ИИС являются измерительно-вычислительные комплексы (ИВК).

Измерительно-вычислительный комплекс – функционально объединенная совокупность средств измерений, ЭВМ и вспомогательных устройств, предназначенная для выполнения в составе измерительной системы конкретной измерительной задачи.

Так же, как и ИИС, ИВК представляют собой автоматизированные средства измерения и обработки измерительной информации, предназначенные для применения на сложных объектах.

Их отличительная черта – наличие в системе свободно программируемой ЭВМ, используемой не только для обработки результатов измерения, но и для управления самим процессом измерения, а также для диагностики и управления воздействиями на объект.

Для ИИС и ИВК были распространены (1985 г.) интерфейс КАМАК (CAMAC – Computer Application for Measurement Automation and Control) и приборный интерфейс, рекомендованный МЭК¹. Изделия агрегатных комплексов позволяют строить ИИС методом проектной компоновки, что сокращает сроки создания систем.

6.2. Структуры ИИС

Один из признаков классификации структур – способ обмена сигналами взаимодействия (согласованное преобразование информации всеми функциональными узлами системы).

Структура ИИС зависит от способа управления – децентрализованного или централизованного, а также определяется способом соединения узлов между собой и с управляющим устройством. Различают три основных вида соединений: цепочечное, радиальное, магистральное соединение (рис. 6.1-6.3).

¹ Международная электротехническая комиссия.

Могут быть комбинации рассмотренных структур: радиально-цепочечные, радиально-магистральные.

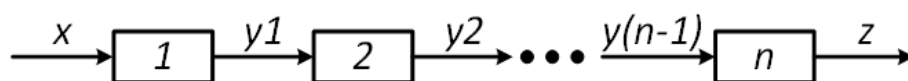


Рис. 6.1. Цепочечное соединение функциональных узлов в системе

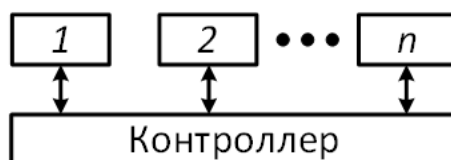


Рис. 6.2. Радиальная структура системы контроля и управления

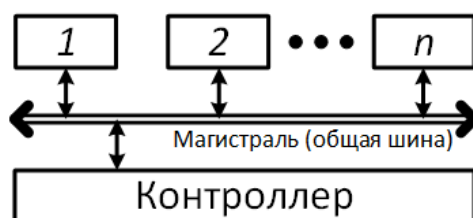


Рис. 6.3. Магистральная структура системы контроля и управления

В схеме обобщенной структуры ИИС (рис. 6.4) обозначено:

- 1 - средства измерения и преобразования информации;
- 2 - средства обработки и хранения информации;
- 3 - средства отображения, индикации или регистрации информации;
- 4 - устройство управления потоками информации;
- 5 - устройство формирования управляющих воздействий;
- 6 - исполнительные устройства;
- 7 - управляемый объект;
- 8 - первичные измерительные преобразователи.

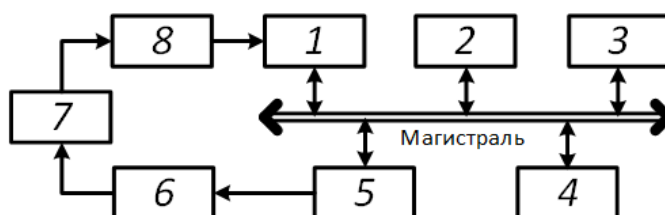


Рис. 6.4. Обобщенная структура ИИС

Информация о состоянии объекта 7 с помощью первичных измерительных преобразователей 8 попадает в средства измерения и преобразования 1, где выходные сигналы первичных преобразователей подвергаются таким операциям, как: фильтрация, масштабирование, линеаризация, аналого-цифровое преобразование.

Затем сигналы в цифровой форме передаются через магистраль на цифровые средства обработки и хранения информации для обработки по определенным программам или накопления, а также на средства отображения информации (СОИ) для индикации и регистрации.

Устройство формирования управляющих воздействий 5 через исполнительные устройства 6 воздействует на объект 7 для регулирования, контроля, тестирования и т.п.

В качестве средства измерения и преобразования информации в ИИС применяются различные устройства: специализированные вычислительные устройства, микропроцессоры, универсальные ЭВМ.

В последнем случае на ЭВМ возлагаются и функции устройства управления.

Библиографический список

1. КРАВЧЕНКО В.М., СИДОРОВ В.А., СЕДУШ В.Я. Техническое диагностирование механического оборудования: учебник. – Донецк: ООО «ЮгоВосток, Лтд», 2009.
2. ГРЕБЕНИК В.М., ЦАПКО В.К. Надежность металлургического оборудования (оценка эксплуатационной надежности и долговечности): Справочник. – М.: Металлургия, 1989.
3. СЕДУШ В.Я. И др. Организация технического обслуживания металлургического оборудования. – Киев: Техника, 1986.
4. СОПИЛКИН Г.В. и др. Диагностика механического оборудования трубопрессового цеха // Металлург. – 1991. – № 5. – С. 18.
5. СЕДУШ В.Я. и др. Опыт диагностирования приводов трубопрокатных станов // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1993. – № 4. – С. 67–69.
6. ШИРМАН А.Р., СОЛОВЬЕВ А.Д. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. – М.: Наука, 1996.
7. БИРГЕР И.А. Техническая диагностика. – М.: Машиностроение, 1978.
8. ГОЛУБ Е.С., МАДОРСКИЙ Е.З., РОЗЕНБЕРГ Г.Ш. Диагностирование судовых технических средств: справочник. – М.: Транспорт, 1993.
9. ГОСТ 27002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Госстандарт СССР, 1990.
10. ГОСТ 18322-78. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. – М.: Госстандарт СССР, 1978.
11. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1987.
12. ГОСТ ISO 9000-2011. Межгосударственный стандарт. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. – М.: Стандартинформ, 2012.

13. Гражданский кодекс Российской Федерации. Части 1, 2, 3 и 4. – М.: Эксмо, 2015.
14. МАРЕНКОВ Н.А. Обнаружение и устранение дефектов судовых дизелей. – М.: Транспорт, 1975.
15. Философский словарь. / под ред. И.Т.Фролова. – 5-е изд. – М.: Политиздат, 1986.
16. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1989.
17. ЕФРЕМОВА Т.Ф. Современный словарь русского языка три в одном. Орфографический. Словообразовательный. Морфемный. – М.: АСТ, 2010.
18. Большой энциклопедический словарь / ред. А. М. Прохоров. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Большая Российская энциклопедия, 2002.
19. Техническая диагностика. Труды 1-го Всесоюзного совещания по технической диагностике. – М.: Наука, 1972.
20. КЛЮЕВ В.В., ПАРХОМЕНКО П.П., АБРАМЧУК В.Е. и др. Технические средства диагностирования: справочник; под общ. ред. В.В. Ключева. – М.: Машиностроение, 1989.
21. МОЗГАЛЕВСКИЙ А.В., ГАСКАРОВ Д.В. Техническая диагностика (непрерывные объекты): учеб. пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1975.
22. ПРОНИКОВ А.С. Надежность машин. – М.: Машиностроение, 1978.
23. АЛЕКСЕЕВА Т.В. и др. Техническая диагностика гидравлических приводов / под общ. ред. Т.М. Башты. – М.: Машиностроение. 1989.
24. ШЕЙНИН А.М., ФИЛИППОВ Б.И., ЗОРИН В.А. Эксплуатация дорожных машин: учебник для вузов / под ред. А.М. Шейнина. – М.: Транспорт, 1992.
25. ЛОКШИН Е.С. и др. Эксплуатация и техническое обслуживание дорожных машин, автомобилей и тракторов: учебник / под ред. Е.С. Локшина. – М.: Мастерство, 2002.
26. КОСЕНКОВ А.А. Диагностика неисправностей автоматических коро-

бок передач и трансмиссий. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2003.

27. ХАРАЗОВ А.М. Техническая диагностика гидроприводов машин. – М.: Машиностроение, 1979.

28. ГОСТ Р 56542-2015. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. – М.: Стандартиформ, 2015.

29. ВОЛЧЕНКО В.Н. и др. Контроль качества сварки: учебное пособие для машиностр. вузов / под ред. В.Н. Волченко. – М.: Машиностроение, 1975.

30. ВЕНТЦЕЛЬ Е.С. Теория вероятностей: учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1999.

31. ГНЕДЕНКО Б.В. Курс теории вероятностей. – М.: Наука, 2005.

32. ГОРЕЛИК А.Л., СКРИПНИК В.А. Методы распознавания. – М.: Высшая школа, 2004.

33. ЛЕДЛИ Р. Программирование и использование вычислительных машин. – М.: Мир, 1966.

34. Надежность и эффективность в технике: справочник под ред. В.В. Ключева, П.П. Пархоменко. Т.9. Техническая диагностика. – М.: Машиностроение, 1987.

35. СИНДЕЕВ И.М. и др. Диагностирование и прогнозирование технического состояния авиационного оборудования: учеб. пособие для вузов гражданской авиации / под ред. И.М. Синдеева. – М.: Транспорт, 1984.

36. БОЛОТИН В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1984.

37. МОЗГАЛЕВСКИЙ А.В., КАЛЯВИН В.П. Системы диагностирования судового оборудования: учеб. пособие. – Л.: Судостроение, 1987.

38. ОРДЫНЦЕВ В.М. Математическое описание объектов автоматизации. – М.: Машиностроение, 1965.

39. ГАСКАРОВ Д.В. Вопросы прогнозирования изменения состояния технических объектов. – Л.: Знание, 1968.

40. РАСТРИГИН Л.А. Статистические методы поиска. – М.: Наука, 1968.
41. СВЕШНИКОВ А.А. Прикладные методы теории случайных функций. – М.: Наука, 1968.
42. ГУМБЕЛЬ Э. Статистика экстремальных значений. – М.: Мир, 1965.
43. ЖУКОВ С.Т. Химия 8-9 класс: экспериментальный электронный учебник химии. – 2002. (<http://www.chem.msu.ru/rus/school/zhukov1/01.html>)
44. РМГ 29-2013. ГСИ. Метрология. Основные термины и определения. – М.: Стандартиформ, 2014
45. ГОСТ 8.417-2002. ГСИ. Единицы величин. – М.: Стандартиформ, 2010.
46. ГОСТ 22261-94. Средства измерений электрических и магнитных величин. Общие технические условия. – М.: Стандартиформ, 2008.
47. ЯКУШЕВ А.И., ВОРОНЦОВ Л.Н., ФЕДОТОВ Н.М. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения: учеб. пособие. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1987.
48. ГОЛЬДИН Л.Л. и др. Лабораторные занятия по физике / под ред. Л.Л. Гольдина. – М.: Наука, 1983.
49. НАЗАРОВ Н.Г. Метрология. Основные понятия и математические модели. – М.: Высшая школа, 2002.
50. ФЗ РФ № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» от 26.06.2008.
51. ЛЕВШИНА Е.С, НОВИЦКИЙ П.В. Электрические измерения физических величин (измерительные преобразователи). – Л.: Энергоатомиздат, 1983.
52. ИЛЮНИН К.К. и др. Справочник по электроизмерительным приборам / под ред. К.К. Илюнина. – Л.: Энергоатомиздат, 1983.
53. ДУБОВОЙ Н. Д. Автоматические многофункциональные измерительные преобразователи. – М.: Радио и связь, 1989.
54. БРИНДЛИ К. Измерительные преобразователи: справочное пособие / пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1991.

55. ГОСТ 30605-98. Преобразователи измерительные напряжения и тока цифровые. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 2003.
56. ГОСТ 30606-98. Преобразователи цифрового кода в напряжение или ток измерительные. Основные параметры. Общие технические требования. Методы испытаний. – М.: Изд. стандартов, 2003.
57. ГОСТ Р 51086-97. Датчики и преобразователи физических величин электронные. Термины и определения. – М.: Стандартиформ, 2005.
58. ЮДИН М.Ф. и др. Основные термины в области метрологии. Словарь-справочник – М.: Изд-во стандартов, 1989.
59. ШАБАЛИН С.А. Ремонт электроизмерительных приборов: справочная книга метролога. – М.: Изд-во стандартов, 1989.
60. ГОСТ 8.009-84. ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. – М.: Стандартиформ, 2006.
61. ГОСТ 8.401-80. ГСИ. Классы точности средств измерений. Общие требования. – М.: Стандартиформ, 2010.
62. ГОСТ 8.395-80. ГСИ. Нормальные условия измерений при поверке. Общие требования. – М.: Стандартиформ, 2008.
63. ДЕРЯБИНА М.Ю. Метрология и физические основы измерений. – Минск: БГУИР, 2007.
64. ГОСТ Р 8.596-2002. ГСИ. Метрологическое обеспечение измерительных систем. Основные положения. – М.: Стандартиформ, 2006.
65. БИККЕНИН Р.Р., ЧЕСНОКОВ М.Н. Теория электрической связи. – М.: Академия, 2010.
66. СКЛЯР Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / пер. с англ. – М.: Вильямс, 2003.

Учебное издание

Юрий Витальевич Волков

СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ, АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ

Часть 1

Учебное пособие

Редактор и корректор Н.П.Новикова
Техн. редактор Л.Я. Титова

Темплан 2016 г., поз. 55

Подп. к печати 06.09.16.

Формат 60x84/16.

Бумага тип. № 1

Печать офсетная.

Печ.л. 7,5.

Уч.-изд. л. 7,5

Тираж 50 экз.

Изд. № 55.

Цена "С".

Заказ

Ризограф Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД,
198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.