ТЕМА 2.3 НАДЕЖНОСТЬ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ

Основные понятия теории метрологической надежности

В процессе эксплуатации метрологические характеристики и параметры средства измерений претерпевают изменения. Эти изменения носят случайный монотонный или флуктуирующий характер и приводят к отказам, т.е. к невозможности СИ выполнять свои функции. Отказы делятся на *неметрологические и метрологические*.

Неметрологическим называется отказ, обусловленный причинами, не связанными с изменением МХ средства измерений. Они носят главным образом явный характер, проявляются внезапно и могут быть обнаружены без проведения поверки.

Метрологическим называется отказ, вызванный выходом МХ из установленных допустимых границ. Метрологические отказы происходят значительно чаще, чем неметрологические. Это обусловливает необходимость разработки специальных методов их прогнозирования и обнаружения. Метрологические отказы подразделяются на внезапные и постепенные.

Внезапным называется отказ, характеризующийся скачкообразным изменением одной или нескольких МХ. Эти отказы в силу их случайности невозможно прогнозировать. Их последствия (сбой показаний, потеря чувствительности и т.п.) легко обнаруживаются в ходе эксплуатации прибора, т. е. по характеру проявления они являются явными. Особенность внезапных отказов — постоянство во времени их интенсивности. Это дает возможность применять для анализа этих отказов классическую теорию надежности. В связи с этим в дальнейшем отказы такого рода не рассматриваются.

Постепенным называется отказ, характеризующийся монотонным изменением одной или нескольких МХ. По характеру проявления постепенные отказы являются скрытыми и могут быть выявлены только по результатам периодического контроля СИ.

С понятием "метрологический отказ" тесно связано понятие **метрологической исправности** средства измерений. Под ней понимается состояние СИ, при котором все нормируемые МХ соответствуют установленным требованиям. Способность СИ сохранять его метрологическую исправность в течение заданного времени при определенных режимах и условиях эксплуатации называется **метрологической надежностью.** Специфика проблемы метрологической надежности состоит в том, что для нее основное положение классической теории надежности о постоянстве во времени интенсивности отказов оказывается неправомерным. Современная теория надежности ориентирована на изделия, обладающие двумя характерными состояниями: работоспособное и неработоспособное. Постепенное изменение погрешности СИ

позволяет ввести сколь угодно много работоспособных состояний с различным уровнем эффективности функционирования, определяемым степенью приближения погрешности к допустимым граничным значениям.

Надежность СИ характеризует его поведение с течением времени и является обобщенным понятием, включающим стабильность, безотказность, долговечность, ремонтопригодность (для восстанавливаемых СИ) и сохраняемость.

Стабильность СИ является качественной характеристикой, отражающей неизменность во времени его МХ. Она описывается временными зависимостями параметров закона распределения погрешности. Метрологические надежность и стабильность являются различными свойствами одного и того же процесса старения СИ. *Стабильность несет больше информации о постоянстве метрологических свойств средства измерений. Это как бы его "внутреннее" свойство. Надежность, наоборот, является "внешним" свойством, поскольку зависит как от стабильности, так и от точности измерений и значений используемых допусков.*

Безотказностью называется свойство СИ непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени. Она характеризуется двумя состояниями: работоспособным и неработоспособным. Однако для сложных измерительных систем может иметь место и большее число состояний, поскольку не всякий отказ приводит к полному прекращению их функционирования. Отказ является случайным событием, связанным с нарушением или прекращением работоспособности СИ. Это обусловливает случайную природу показателей безотказности, главным из которых является распределение времени безотказной работы СИ.

Долговечностью называется свойство СИ сохранять свое работоспособное состояние до наступления предельного состояния. **Работоспособное состояние** – это такое состояние СИ, при котором все его МХ соответствуют нормированным значениям. *Предельным* называется состояние СИ, при котором его применение недопустимо.

После метрологического отказа характеристики СИ путем соответствующих регулировок могут быть возвращены в допустимые диапазоны. Процесс проведения регулировок может быть более или менее длительным в зависимости от характера метрологического отказа, конструкции СИ и ряда других причин. Поэтому в характеристику надежности введено понятие "ремонтопригодность". **Ремонтопригодность –** свойство СИ, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, восстановлению и поддержанию его работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта. Оно характеризуется затратами времени и

средств на восстановление СИ после метрологического отказа и поддержание его в работоспособном состоянии.

Как будет показано далее, процесс изменения МХ идет непрерывно и независимо от того, используется ли СИ или оно хранится на складе. Свойство СИ сохранять значения показателей безотказности, долговечности и ремонтопригодности в течение и после хранения и транспортирования называется его **сохраняемостью.**

Изменение метрологических характеристик си в процессе эксплуатации

Метрологические характеристики СИ могут изменяться в процессе эксплуатации. Далее будем говорить об изменениях погрешности Δ(t), подразумевая, что вместо нее может быть аналогичным образом рассмотрена любая другая МХ.

Следует отметить, что не все составляющие погрешности подвержены изменению во времени. *Например, методические погрешности зависят только от используемой методики измерения. Среди инструментальных погрешностей есть много составляющих, практически не подверженных старению, например размер кванта в цифровых приборах и определяемая им погрешность квантования.*

Изменение МХ средств измерений во времени обусловлено процессами старения в его узлах и элементах, вызванными взаимодействием с внешней окружающей средой. Эти процессы протекают в основном на молекулярном уровне и не зависят от того, находится ли СИ в эксплуатации или на консервации. Следовательно, основным фактором, определяющим старение СИ, является календарное время, прошедшее с момента их изготовления, т.е. возраст. Скорость старения зависит, прежде всего, от используемых материалов и технологий. Известно, что необратимые процессы, изменяющие погрешность, протекают очень медленно и зафиксировать эти изменения в ходе эксперимента в большинстве случаев невозможно. В связи с этим большое значение приобретают различные математические методы, на основе которых строятся модели изменения погрешностей и производится прогнозирование метрологических отказов.

Задача, решаемая при определении метрологической надежности СИ, состоит в нахождении начальных изменений МХ и построении математической модели, экстраполирующей полученные результаты на большой интервал времени. Поскольку изменение МХ во времени — случайный процесс, то основным инструментом построения математических моделей является теория случайных процессов.

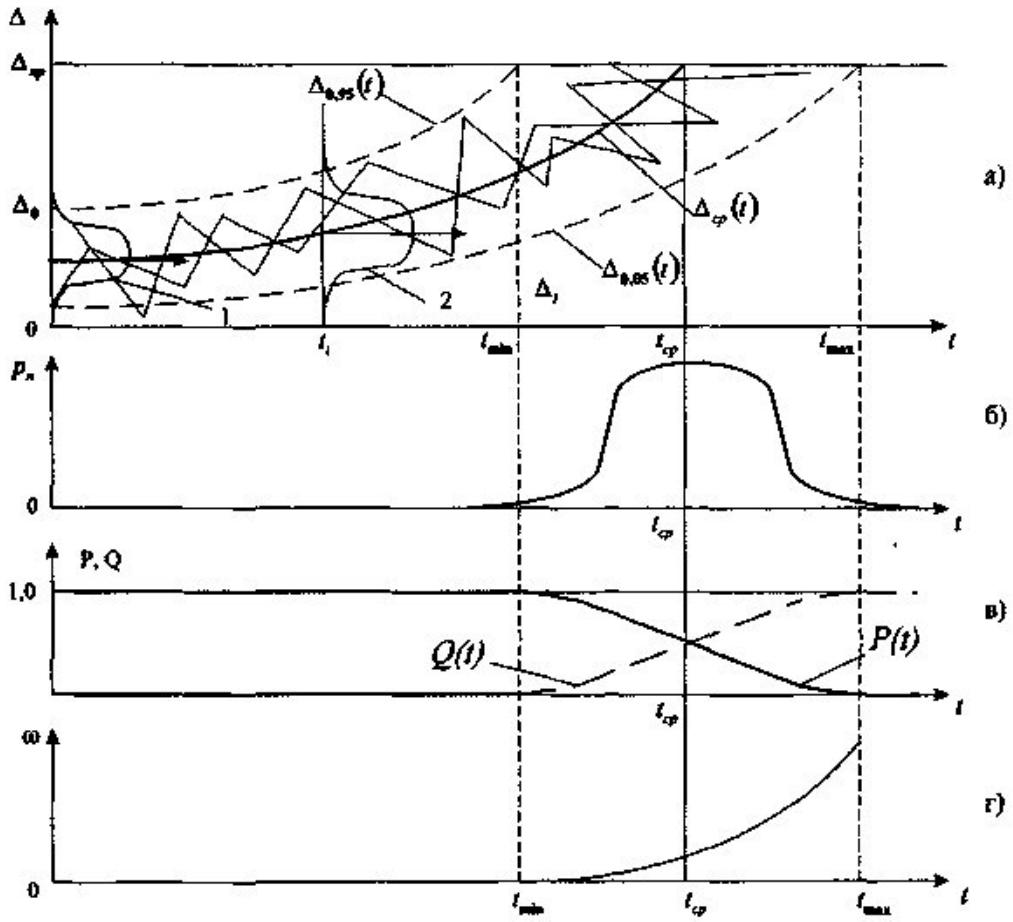


Рисунок 6.1 –Модель изменения погрешности во времени (а), плотность распределения времени наступления метрологических отказов *(б),* вероятность безотказной работы *(в)* и зависимость интенсивности метрологических отказов от времени (г)

Изменение погрешности СИ во времени представляет собой случайный нестационарный процесс. Множество его реализаций показаны на рис. 6.1 в виде кривых Δ_i модулей погрешности. В каждый момент t_i они характеризуются некоторым законом распределения плотности вероятности $p(\Delta, t_i)$ (кривые 1 и 2 на рис. 6.1,а). В центре полосы кривая $\Delta_{ср}(t)$ наблюдается наибольшая плотность появления погрешностей, которая постепенно уменьшается к границам полосы, теоретически стремясь к нулю при бесконечном удалении от центра. Верхняя и нижняя границы полосы погрешностей СИ могут быть представлены лишь в виде некоторых квантильных границ, внутри которых заключена большая часть погрешностей, реализуемых с доверительной вероятностью P. За пределами границ с вероятностью (1 – P)/2 находятся погрешности, наиболее удаленные от центра реализации.

Для применения квантильного описания границ полосы погрешностей в каждом ее сечении t необходимо знать оценки математического ожидания $\Delta_{ср}(t_i)$ и СКО $\sigma_\Delta(t_i)$ отдельных реализаций Δ_i Значение погрешности на границах в каждом сечении t_i равно

$\Delta_r(t_i) = \Delta_{ср}(t) \pm k\sigma_\Delta t_i$, где k – квантильный множитель, соответствующий заданной доверительной вероятности P, значение которого существенно зависит от вида закона распределения погрешностей по сечениям. Определить вид этого закона при исследовании процессов старения СИ практически не представляется возможным. Это связано с тем, что законы распределения могут претерпевать значительные изменения с течением времени.

Для решения данной проблемы предлагается [12; 29] использовать общее для высокоэнтропийных симметричных законов распределения свойство, состоящее в том, что при доверительной вероятности P = 0,9 соответствующие 5%- и 95%-ный квантили отстоят от центра распределения $\Delta_{ср}(t)$ на $\pm 1{,}6\sigma_\Delta(t_i)$. Если предположить, что закон распределения погрешностей, деформируясь со временем, остается высокоэнтропийным и симметричным, то 95%-ный квантиль случайного нестационарного процесса изменения погрешности во времени может быть описан уравнением $\Delta_{95}(t) = \Delta_{ср}(t) \pm 1{,}6\sigma_\Delta(t_i)$.

Метрологический отказ наступает при пересечении кривой Δ_i прямых $\pm \Delta_{пр}$. Отказы могут наступать в различные моменты времени в диапазоне от t_{min} до t_{max} (см. рис. 6.1, b), причем эти точки являются точками пересечения 5%- и 95%-ного квантилей с линией допустимого значения погрешности. При достижении кривой $\Delta_{0,95}(t)$ допустимого предела $\Delta_{пр}$ у 5% приборов наступает метрологический отказ. Распределение моментов наступления таких отказов будет характеризоваться плотностью вероятности $P_н(t)$, (см. рис. 8.1, *б)*. Таким образом, в качестве модели нестационарного случайного процесса изменения во времени модуля погрешности СИ целесообразно использовать зависимость изменения во времени 95%-ного квантиля этого процесса.

Показатели точности, метрологической надежности и стабильности СИ соответствуют различным функционалам, построенным на траекториях изменения его МХ $\Delta_i(t)$. Точность СИ характеризуется значением МХ в рассматриваемый момент времени, а по совокупности средств измерений – распределением этих значений, представленных кривой 1 для начального момента и кривой 2 для момента t_i. Метрологическая надежность характеризуется распределением моментов времени наступления метрологических отказов (см. рис. 4.1,6). Стабильность СИ характеризуется распределением приращений МХ за заданное время.

В реальности для одних приборов межремонтные интервалы уменьшаются, для других – увеличиваются. Это может быть объяснено тем, что погрешность СИ с течением времени экспоненциально возрастает или убывает. При ускоряющемся возрастании погрешности (рис. 6.2,6) каждый последующий межремонтный интервал короче предыдущего и частота метрологических отказов $\omega(t)$ с течением времени возрастает. При замедленном

возрастании погрешности (рис. 6.2,в) каждый последующий межремонтный интервал длиннее предыдущего и частота метрологических отказов ω(t) с течением времени убывает вплоть до нуля.

Выбор си. Понятие об испытании и контроле

При выборе СИ учитывают совокупность метрологических (цена деления, погрешность, пределы измерений, измерительное усилие), эксплуатационных и экономических показателей, к которым относятся:

- массовость (повторяемость измеряемых размеров) и доступность их для контроля; стоимость и надежность СИ;
- метод измерения;
- время, затрачиваемое на настройку и процесс измерения;
- масса, габаритные размеры, рабочая нагрузка;
- жесткость объекта контроля, шероховатость его поверхности;
- режим работы и т. д.

Основная трудность технико-экономического подхода при выборе СИ заключается в том, что сам процесс измерения не сопровождается непосредственным созданием материальных ценностей. Учитывая также различные цели контрольно-измерительных операций и их различную принадлежность к этапам жизненного цикла ТС (производство, эксплуатация, ремонт), очевидно, невозможно предложить единую методику выбора СИ. Однако некоторые общие принципы выбора на основании накопленного опыта сводятся к следующим положениям:

1. Для гарантирования заданной или расчетной относительной погрешности измерения $\delta_и$ (например, методами, предложенными в гл. 2) относительная погрешность СИ $\delta_{си}$ должна быть на 25—30% ниже, чем $\delta_и$, (т. е. $\delta_{си} = 0{,}7\delta_и$). Если известна приведенная погрешность $\underline{\gamma}_и$ измерения, то приведенная погрешность СИ

где x и $x_и$ – результат измерения и нормированное значение шкалы СИ.

2. Выбор СИ зависит от масштаба производства или количества находящихся в эксплуатации однотипных (одноименных) ТС.

Например, в массовом производстве с отработанным технологическим процессом, включая контрольные операции, используют высокопроизводительные механизированные и автоматизированные средства измерения и контроля. Универсальные СИ применяются преимущественно для наладки оборудования.

В серийном производстве основными средствами контроля должны быть жесткие предельные калибры, шаблоны, специальные контрольные приспособления. Возможно применение универсальных СИ.

В мелкосерийном и индивидуальном производстве основными являются универсальные СИ, поскольку применение других организационно и экономически невыгодно: неэффективно будут использоваться специальные контрольные приспособления или потребуется большое количество калибров различных типоразмеров.

3. Метод измерения, определяемый целью контроля, выдвигает требования к СИ по базировке: если контролируется точность технологического процесса, то выбирают СИ для технологических баз; если ТС контролируется с точки зрения эксплуатации, то СИ выбирается под эксплуатационные базы.

4.При выборе СИ по метрологическим характеристикам необходимо учитывать следующее:

если технологический процесс неустойчив, т. е. возможны существенные отклонения измеряемого параметра за пределы поля допуска, то нужно, чтобы пределы шкалы СИ превышали диапазон рассеяния значений параметра;

цена деления шкалы должна выбираться с учетом заданной точности измерения. Например, если размер необходимо контролировать с точностью до 0,01 мм, то и СИ следует выбирать с ценой деления 0,01 мм, так как СИ с более грубой шкалой внесет дополнительные субъективные погрешности, а с более точной – выбирать не имеет смысла из-за удорожания СИ. При контроле технологических процессов должны использоваться СИ с ценой деления не более 1/6 допуска на изготовление;

поскольку качество измерения определяется величиной относительной погрешности $\delta = \pm(\Delta/x)100\%$, т. е. с уменьшением x величина δ увеличивается (качество измерения ухудшается). Следовательно, качество измерений на разных участках шкалы неодинаково.

Поэтому при измерениях рабочий участок шкалы СИ должен выбираться по правилу: относительная погрешность в пределах рабочего участка шкалы СИ не должна превышать приведенную погрешность более чем в 3 раза ($\delta<3\gamma$). Из этого правила следует: а) при односторонней равномерной шкале с нулевой отметкой в ее начале рабочий участок занимает последние две трети длины шкалы; б) при двусторонней шкале с нулевой отметкой посредине – последнюю треть каждого сектора; в) при шкале без нуля рабочий участок может распространяться на всю длину шкалы.

В пределах рабочего участка шкалы наибольшая возможная абсолютная погрешность равновероятна на всех отметках. Таким образом, при выборе СИ важно определить рабочий участок шкалы и ее цену деления. Последняя зависит от класса точности СИ и числа $n_ш$ делений шкалы.

Если класс точности СИ определяет наибольшую допустимую погрешность с заданной вариацией, то цена деления должна учитывать эту вариацию, а именно – должна быть равна удвоенному значению приведенной погрешности СИ: $C = 2\gamma$ или $n_{щ} = 100/2\gamma$.

Исходя из требований удобства считывания показаний, допускается использование более крупных делений шкалы, но обязательно кратных $n_{ш}$ (в пределах 2–10). Кроме того, цена деления должна составлять целое число единиц измеряемой величины (1, 2,5, 10 и т. д.).

5. К регистрирующей аппаратуре предъявляются следующие основные требования:

- сигнал, проходящий через СИ, должен сохранять необходимую информацию, не подвергаться искажению и отделяться от помех;
- первичные преобразователи (датчики) должны потреблять минимум энергии от объекта измерения, и их подключение не должно нарушать его нормальной работы. Особые требования предъявляются к точности и чувствительности датчиков, так как эти низкие показатели сведут на нет все усилия по повышению точности измерений;
- носитель информации должен иметь достаточный объем для регистрации всех необходимых сведений;
- регистрирующая аппаратура должна обеспечивать получение информации в возможно сжатые сроки.

Если аппаратура не может одновременно удовлетворять всем предъявляемым требованиям, то выбираются наиболее важные из них, позволяющие наилучшим образом справиться с выполнением поставленной задачи.

Оценка погрешности измерений и выбор СИ зависят также от цели измерений. При этом понятие измерения является общим для таких специфических операций, как испытание, контроль, диагностирование и прогнозирование технического состояния объекта (продукции).

Диагностирование – процесс распознавания состояния системы в настоящий момент. Прогнозирование есть определение признаков технического состояния объекта на будущий момент или интервал времени.

Изучение принципов диагностирования и прогнозирования является предметом специальных дисциплин. Поэтому остановимся лишь на соотнесении понятий испытания, контроля и измерения.

Испытанием называется экспериментальное определение количественных и (или) качественных характеристик свойств объекта испытаний как результата воздействия на него при его функционировании, а также моделировании объекта и/или воздействий (ГОСТ 16504—81). Экспериментальное определение характеристик свойств объекта при испытаниях может проводиться путем использования измерений, оценивания и контроля.

Объектом испытаний является продукция или процессы ее производства и функционирования. В зависимости от вида продукции и программы испытаний объектом может быть как единичное изделие, так и их партия. Объектом испытания может также быть макет или модель изделия.

Важнейшим при проведении любых испытаний является задание требуемых реальных или моделируемых условий испытаний.

Под **условиями испытаний** понимается совокупность воздействующих факторов и (или) режимов функционирования объекта при испытаниях. В нормативно-технических документах на испытания конкретных объектов должны быть определены нормированные условия испытаний.

Существует большое число разновидностей испытаний. Они классифицируются по различным признакам. По **назначению** испытания делятся на исследовательские, контрольные, сравнительные и определительные. По **уровню проведения** различают следующие категории испытаний: государственные, межведомственные и ведомственные. По **виду этапов разработки испытуемой продукции** различают предварительные и приемочные испытания. В зависимости от **вида испытаний готовой продукции** их подразделяют на квалификационные, приемосдаточные, периодические и типовые.

Целью испытаний следует считать оценку истинного значения параметра (характеристики) в заданных номинальных условиях испытания. Условия испытаний практически всегда отличаются от реальных. Следовательно, результат испытания всегда имеет погрешность, возникающую не только из-за погрешности определения искомой характеристики, но и из-за неточности установления номинальных условий испытания.

Результатом испытаний называется оценка характеристик свойств объекта, установления соответствия объекта заданным требованиям, данные анализа качества функционирования объекта в процессе испытаний. Результат испытаний характеризуется **точностью** – свойством испытаний, показывающим близость их результатов к действительным значениям характеристик объекта в определенных условиях испытаний.

Между измерением и испытанием существует большое сходство: во-первых, результаты обеих операций выражаются в виде чисел; во-вторых, погрешности и в том, и в другом случае могут быть выражены как разности между результатами измерений (испытаний) и истинными значениями измеряемой величины (или определяемой характеристики при номинальных условиях эксплуатации).

Однако с точки зрения метрологии между этими операциями имеется значительная разница: погрешность измерения является только одной из составляющих погрешности

испытания. Поэтому можно сказать, что испытание – это более объемная операция, чем измерение. Измерение можно считать частным случаем испытания, при котором условия испытаний не представляют интереса.

Контроль – это процесс определения соответствия значения параметра изделия установленным требованиям или нормам. Сущность всякого контроля состоит в проведении двух основных этапов. На первом этапе получают информацию о фактическом состоянии некоторого объекта, о признаках и показателях его свойств. Эта информация называется **первичной.** На втором этапе первичная информация сопоставляется с заранее установленными требованиями, нормами, критериями. При этом выявляется соответствие или несоответствие фактических данных требуемым. Информация об их расхождении называется **вторичной.** Она используется для выработки соответствующих решений по поводу объекта контроля. В ряде случаев граница между этапами контроля неразличима. При этом первый этап может быть выражен нечетко или практически не наблюдаться. Характерным примером такого рода является контроль размера детали калибром, сводящийся к операции сопоставления фактического и предельно допустимого значений параметра.

Контроль состоит из ряда элементарных действий: измерительного преобразования контролируемой величины; воспроизведения установок контроля; сравнения и получения результата контроля.

Измерения и контроль тесно связаны друг с другом, близки по своей информационной сущности и содержат ряд общих операций (например, сравнение, измерительное преобразование). В то же время процедуры во многом различаются:

• результатом измерения является количественная характеристика, а контроля – качественная;

• измерение осуществляется в широком диапазоне значений измеряемой величины, а контроль – обычно в пределах небольшого числа возможных состояний;

• контрольные приборы, в отличие от измерительных, применяли для проверки состояния изделий, параметры которых заданы и изменяются в узких пределах;

• основной характеристикой качества процедуры измерения является точность, а процедуры контроля — достоверность.

Контроль может быть классифицирован по ряду признаков.

В зависимости от **числа контролируемых параметров** он подразделяется на **однопараметрический,** при котором состояние объекта определяется по размеру одного параметра, и **многопараметрический,** при котором состояние объекта определяется размерами многих параметров.

По **форме сравниваемых сигналов** контроль подразделяется на *аналоговый,* при котором сравнению подвергаются аналоговые сигналы, и **цифровой,** при котором сравниваются цифровые сигналы. В зависимости от **вида воздействия на объект** контроль подразделяется на **пассивный**, при котором воздействие на объект производится, и **активный**, при котором воздействие на объект осуществляется посредством специального генератора тестовых сигналов.