

МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ НАДЕЖНОСТЬ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ И ОЦЕНКА РИСКА МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОТКАЗА

В. Ш. Сулаберидзе, А. А. Неклюдова

Научно-исследовательская лаборатория госэталонов в области измерений плотности и вязкости жидкости, A.A.Tsurko@vniim.ru; ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева», Санкт-Петербург, Россия

Ключевые слова: алгоритм анализа технического риска; метрологическая надежность средств измерений; метрологический отказ; надежность технического объекта; риск метрологического отказа; состояние объекта; технический риск.

Аннотация: Показаны особенности метрологической надежности и применимость основных положений теории надежности к метрологической надежности средств измерений. Дано описание схемы состояний объекта (измерительной системы) при метрологическом отказе. Предложен алгоритм анализа риска и указаны ответственные исполнители всех этапов данного алгоритма. Проанализированы особенности метрологического отказа и состояния метрологической исправности средств измерений.

Введение

Согласно РМГ 29–2013 [1] метрологическая надежность средства измерений (СИ) – надежность средства измерений в части сохранения его метрологической исправности (термин 7.48). Метрологическая исправность – состояние средства измерений, при котором все его нормируемые метрологические характеристики (МХ) соответствуют установленным требованиям (термин 7.47).

Таким образом, метрологическая надежность отражает способность СИ сохранять установленное (нормируемое) значение метрологических характеристик в течение заданного времени при определенных режимах и условиях эксплуатации.

Номенклатура показателей надежности СИ и общие принципы их оценивания принципиально не отличаются от общепринятых для технических систем. Однако процедуры оценки и моделирования метрологической надежности СИ имеют ряд особенностей.

Особенности метрологической надежности средств измерений

С позиций надежности техническая система (объект) может находиться в пяти основных состояниях [2]: *исправное, неисправное, работоспособное, неработоспособное и предельное*. Переход объекта из одного состояния в другое происходит вследствие *повреждения* или *отказа*. Взаимосвязь состояний объекта и приводящих к ним событий показана на рис. 1.

Исправное (исправность) – состояние объекта, в котором он соответствует всем требованиям, установленным в документации на него.

Работоспособное – состояние объекта, в котором он способен выполнять требуемые функции.

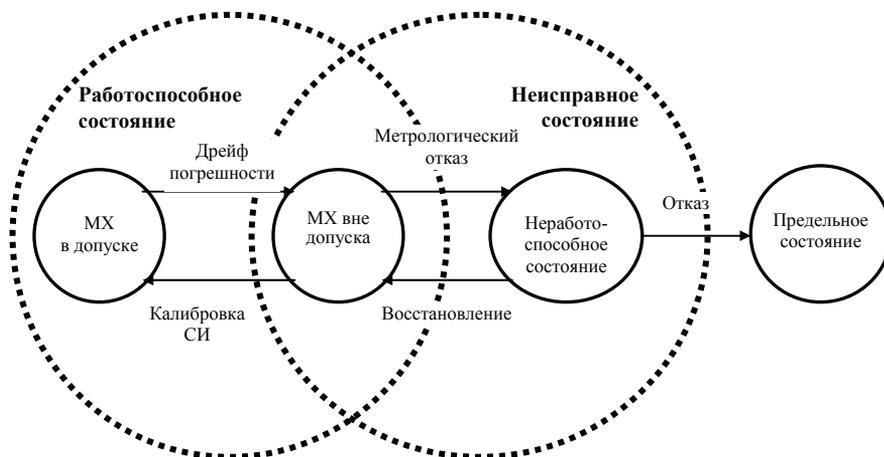


Рис. 1. Модификация состояний объекта в контексте метрологического отказа СИ

Неработоспособное – состояние объекта, в котором он не способен выполнять хотя бы одну требуемую функцию по причинам, зависящим от него или из-за профилактического технического обслуживания.

Для сложных объектов возможно наличие нескольких работоспособных состояний, отличающихся уровнем эффективности применения объекта. Возможно также наличие нескольких неработоспособных состояний, при этом из всего их множества выделяют частично неработоспособные состояния, при которых объект способен частично выполнять требуемые функции.

Понятие *исправное состояние* является более «жестким» по отношению к объему требований, предъявляемых к объекту, чем понятие *работоспособное состояние*.

Исправный объект всегда работоспособен. Работоспособный объект, в отличие от исправного, удовлетворяет не всем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации, а лишь тем, которые обеспечивают его нормальное функционирование. При этом он может не удовлетворять, например, требованиям, относящимся к его внешнему виду (иметь поврежденное покрытие, вмятины на кожухе и т.п.). Работоспособный объект может быть неисправным, однако его повреждения при этом не настолько существенны, чтобы они могли препятствовать его функционированию.

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта. Сам по себе отказ – состояние детерминированное, а время появления отказа – величина случайная.

Метрологический отказ средства измерений – выход метрологической характеристики средства измерений за установленные пределы ([1], термин 7.49).

Критерий отказа – признак или совокупность признаков неработоспособного состояния объекта, установленные в документации.

Типичные причины метрологического отказа:

- снижение качества функционирования по одной или нескольким характеристикам точности за пределы допускаемого уровня вследствие отклонений выбранной характеристики, превышающих предельно допускаемые значения (состояние «вне допуска»);
- искажение информации на выходе вследствие отказов элементов измерительной системы;
- выход характеристики за пределы допуска вследствие влияния существенно изменяющихся внешних воздействий (шума, вибрации, перегрева и др.).

Неисправное (неисправность) – состояние объекта, в котором он не соответствует хотя бы одному из требований, установленных в документации на него.

Предельное – состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно. Предельное состояние обусловлено физической невозможностью дальнейшей эксплуатации объекта либо недопустимым снижением его эффективности, либо требованиями безопасности и определяется установленным критерием предельного состояния.

Критерий предельного состояния – признак или совокупность признаков предельного состояния объекта, установленные в документации на него.

Детальное рассмотрение сходства и различий метрологической надежности и метрологического отказа с надежностью технической системы и ее параметрического или функционального отказа приведено в работе [3]. Наличие метрологических характеристик определяет специфику надежности СИ. Теория надежности изучает закономерности возникновения отказов – событий, заключающихся в нарушении работоспособного состояния изделий. По своим последствиям отказы подразделяют на полные и частичные. В результате полного отказа происходит полная утрата работоспособности, частичного – частичная. Частичный отказ изделия может быть функциональным, то есть полным отказом по одной или нескольким функциям, выполняемым изделием. Последствия этих отказов в принципе такие же, как и последствия полных отказов: уменьшение объема выполненной работы, невыполнение установленного задания, снижение производительности, незапланированные простои, затраты на ремонт и т.д. Поэтому такие частичные отказы, как и полные, можно назвать отказами функционирования. Но частичные и полные отказы могут иметь и другие последствия, заключающиеся в отклонении хотя бы одного параметра изделия (характеристики или «атрибута» по терминологии NCSLI RP-1 [4]) за пределы, установленные нормативно-технической документацией. В результате такого отказа ухудшается качество функционирования. Таким образом, в отличие от отказов функционирования параметрические отказы ухудшают качественные показатели.

Параметрические отказы СИ, то есть отказы, заключающиеся в выходе одной или нескольких МХ средств измерений за установленные пределы, называются метрологическими отказами. Они наиболее опасны для СИ, так как приводят к искажению измерительной информации. Уже в конце 80-х годов прошлого столетия по ряду номенклатурных групп электроизмерительных приборов были обобщены данные о доле метрологических отказов в общем количестве функциональных отказов, полученные по результатам многолетних наблюдений [3]:

- а) стрелочные щитовые приборы – 70 – 85 %;
- б) лабораторные переносные приборы – 80 %;
- в) образцовые меры – 100 %;
- г) счетчики электрической энергии:
 - индукционные – 90 %;
 - приборы сопротивления – 50 %.

Наличие метрологических отказов, опасность их последствий и вытекающая из этого необходимость их преимущественного рассмотрения при анализе надежности и определяют специфику надежности СИ.

Чем отличаются метрологические отказы от отказов функционирования? *Во-первых*, это отказы скрытые. Обнаружение такого отказа невозможно без проведения специальной операции проверки работоспособности – поверки или калибровки. Так как скрытый отказ внешне никак не проявляется, СИ продолжают применять, получая недостоверную измерительную информацию. *Во-вторых*, два типа отказов обуславливают различные способы обеспечения надежности на этапе проектирования и в процессе эксплуатации. Для отказов функционирования – это сокращение числа элементов, облегчение режимов их работы, введение функциональной, структурной и временной избыточности, повышение ремонтопри-

годности, комплектация запчастями. Для метрологических отказов – повышение стабильности СИ путем оптимизации параметров схемы, метрологического резервирования, применения отрицательных обратных связей, непрерывного или периодического самоконтроля по встроенному опорному элементу, корректировки «нуля» и другие, периодическое проведение проверок и калибровок. Существенным отличием является также то, что текущий ремонт с целью устранения последствий явных отказов проводится через случайные промежутки времени наступления данных отказов, а поверка и калибровка – по достижении заранее установленных календарных сроков или наработки СИ. Эти обстоятельства диктуют необходимость раздельного нормирования надежности по отказам функционирования и метрологическим.

Третья особенность метрологических отказов. Отказы функционирования, как правило, являются внезапными, характеризующимися скачкообразным изменением значений одного или нескольких параметров изделия. Метрологические отказы, в отличие от них, как правило, являются постепенными, возникающими вследствие медленного, постепенного изменения значений одной или нескольких МХ.

Быстрое развитие теории надежности во многом вызвано тем обстоятельством, что внезапные отказы систем, состоящих из большого числа электро- и радиоэлементов, удовлетворяют экспоненциальному распределению, а также допущению о взаимной независимости отказов различных элементов изделия. Оба эти допущения, как правило, не выполняются для метрологических отказов. Такие отказы являются следствием закономерно протекающих во всех элементах и соединениях СИ процессов износа, старения и разрегулировки.

Различная физическая природа отказов функционирования и метрологических отказов – основная причина того, что классическая теория надежности, ориентирующаяся на отказы функционирования, оказывается неэффективной для оценки надежности СИ.

Таким образом, проблема обеспечения надежности СИ не может быть решена в рамках классической теории надежности и требует разработки специального подхода, учитывающего их специфику. Впервые эта задача поставлена в 1969 году. В начале 80-х годов прошлого столетия сформулирована проблема обеспечения метрологической надежности СИ как одна из важнейших проблем метрологии и измерительной техники. А уже в конце 80-х годов вышла книга [5] на данную тему, и в последующие годы проблеме метрологической надежности СИ (параметрической надежности изделий) было посвящено значительное число работ.

О применимости основных положений теории надежности к метрологической надежности средств измерений [3]

В основу теории надежности положено допущение о том, что длительность эксплуатации или наработка, измеряемая числом циклов, объемом работ (или продолжительностью функционирования изделия) до наступления отказа, является случайной величиной.

Как любая случайная величина, она имеет функцию распределения, плотность распределения $f(t) = dF(t)/dt$ и, разумеется, моменты этого распределения.

Аналитическая оценка параметрической надежности заключается в последовательном решении трех задач:

1. Определение математической модели схемы – функциональной связи параметров элементов, входных и выходных параметров;
2. Нахождение с учетом математической модели схемы функции распределения $F(y)$ выходного параметра по известным функциям распределения параметров элементов и входных параметров;

3. Решение задачи о выбросах – нахождение вероятности того, что за заданный интервал времени случайный процесс $Y(t)$ ни разу не пересечет установленных границ $[a(x), b(x)]$.

Автор работы [3] считал, что перечисленные методы не могли найти широкого применения в проектировании из-за своей сложности. Реализация этих методов, по его мнению, доступна только сильным научным коллективам. Она может окупиться только при разработке сложной наукоемкой продукции с высокой ценой ее параметрических отказов. Обычно в практике проектирования применяется следующий подход.

Принимается допущение о монотонном характере дрейфа выходного параметра изделия. При этом условии вероятность безотказной работы за заданный интервал времени становится равной вероятности нахождения выходного параметра в заданных границах в конечный момент этого интервала

$$P(t) = \int_a^b f(t, \xi) d\xi,$$

где $f(t, \xi)$ – плотность распределения выходного параметра в момент t .

Тогда плотность распределения до отказа

$$f(t) = -\frac{dP(t)}{dt} = -\int_a^b \frac{df(t, \xi)}{dt} d\xi.$$

Автор работы [3] отмечает, что первую теорию, базирующуюся на принципиально новых подходах к оценке метрологической надежности СИ, разработал коллектив ученых под руководством профессора П. В. Новицкого.

На основании анализа статистического материала об изменении погрешностей электроизмерительных приборов 15 типов за 10 – 15 лет авторами было предложено несколько последовательно усложняющихся математических моделей возрастания погрешности СИ (прогрессирующей погрешности, по терминологии авторов). Первой моделью был нестационарный случайный процесс с постоянной дисперсией σ^2 и линейно возрастающим математическим ожиданием $m(t) = m(0) + vt$ (v – постоянная скорость дрейфа погрешности). При этом верхняя 95%-я квантиль распределения погрешности СИ в момент i равна $\gamma_{0,95}(t) = m(0) + 1,6\sigma + vt$ (доверительная вероятность, равная 0,95, рекомендуется в связи с тем, что при ней квантильный коэффициент $K_{0,95} = 1,6$ не зависит от вида распределения для большой группы одномодальных распределений).

Однако проведенные статистические исследования и физические эксперименты не подтвердили данную гипотезу. Поэтому была разработана экспоненциальная модель

$$\gamma_{0,95}(t) = \gamma_0 + \gamma_3 \frac{\omega_0}{a} (e^{at} - 1),$$

где γ_0 – начальное значение погрешности; γ_3 – эксплуатационный запас погрешности, базируемый при калибровке СИ (разность между пределом допускаемой погрешности СИ и контрольным допуском, выдерживаемым при поверке); ω_0 – начальная частота метрологических отказов СИ; a – скорость изменения логарифма частоты метрологических отказов.

В качестве основного показателя метрологической надежности СИ принят показатель $\omega(t)$, названный частотой метрологических отказов (в теории надежности технических систем аналогичный показатель называется параметром потока отказов).

Дальнейшие исследования показали невозможность использования экспоненциальной и логистической моделей на малых (менее года) интервалах времени. Наиболее вероятное объяснение этого факта авторы видят в том, что исходные данные, полученные по результатам проверок с периодом один год, не позволяют получить достоверное описание начального участка кривой $\gamma_{0,95}(t)$. Данное обстоятельство привело их к выводу о недостаточности классификации погрешностей на систематические, постоянные во время эксплуатации; прогрессирующие во время эксплуатации, то есть низкочастотные, и случайные (высокочастотные). Поэтому было предложено более полное спектральное описание нестационарного случайного процесса изменения погрешности СИ, как процесса с широким и непрерывным спектром частот.

В качестве характеристики изменения погрешности СИ во времени принята зависимость $Q(t)$, названная логарифмическим спектром амплитуд погрешности. Использование спектрального описания позволяет получить кривую $\gamma_{0,95}(t)$, описывающую все изменения наблюдаемой у СИ погрешности с периодами 4...50 с, 10... 60 мин, одни сутки и так далее, до года и более. Затем начинается увеличение погрешности, обусловленное процессами старения и износа элементов СИ.

Таким образом, в работе [5] предложено единое описание дрейфа погрешности СИ от долей секунды до десятков лет с помощью набора математических моделей – спектральной, экспоненциальной и логистической. Такое описание позволяет по имеющемуся статистическому материалу об изменении погрешности СИ, находившихся в эксплуатации, построить кривые $\gamma_{0,95}(t)$, пригодные для сравнительной оценки метрологической надежности СИ, созданных разными предприятиями, а также помогает выявить причины недостаточной стабильности СИ и определить способы ее повышения.

Однако следует признать, что возможности данного описания весьма ограничены. Во-первых, они представляют дрейф погрешности СИ не в виде случайного процесса, а некоторой функцией времени с постоянными коэффициентами, характеризующей усредненный экземпляр СИ. Плотность распределения погрешности СИ в произвольный момент времени в рамках данной теории не определяется, а без нее невозможно обоснование мероприятий по повышению метрологической надежности в процессе эксплуатации.

Во-вторых, предложенные модели не предусматривают возможность изменения направления дрейфа, что характерно для многих видов СИ.

В-третьих, практическая реализация таких моделей для СИ, построенных на элементной базе нового поколения или новых физических принципах, возможна не ранее чем через 5 – 10 лет после начала их эксплуатации, то есть когда возможности кардинальных усовершенствований конструкции данного типа СИ практически исчерпаны. Предлагаемые модели не позволяют провести расчет метрологической надежности на этапе проектирования СИ, найти оптимальные технические решения.

Исходные понятия теории надежности – работоспособное состояние изделия и его отказ. При оценке метрологической надежности рассматриваются не все параметры СИ, характеризующие его работоспособность, а только те из них, которые оказывают влияние на точность измерительной информации. Эти параметры называются метрологическими характеристиками СИ.

Нормирование МХ первого вида не вызывает затруднений – эти характеристики закладываются при проектировании СИ и затем указываются в нормативно-технической документации. Они не меняются в процессе эксплуатации и поэтому не нуждаются в периодическом контроле. Нормирование МХ второго вида является весьма сложным. Традиционно оно выполнялось следующим образом – нор-

мировалась основная погрешность СИ, то есть погрешность СИ при нормальных условиях измерений, обусловленная только неидеальностью его внутренних свойств, и дополнительные погрешности, обусловленные отклонениями влияющих величин от их номинальных значений или их выходом за пределы нормальной области значений.

Метрологические характеристики являются постоянными у конкретных экземпляров СИ в определенный момент времени. Но они меняются с течением времени из-за протекающих в них процессов износа и старения, а по совокупности СИ данного типа являются случайными также и из-за разброса параметров технологического процесса изготовления и различий в условиях их эксплуатации.

1. Метрологическая исправность СИ (работоспособность в части метрологических свойств) зависит от состояния всех его нормируемых МХ, каждая из которых характеризует какое-то одно свойство СИ.

2. Любая МХ конкретного экземпляра СИ в определенный момент времени является детерминированной величиной, даже если она связана со случайной составляющей инструментальной погрешности измерений. Например, случайная погрешность СИ характеризуется средним квадратическим отклонением (СКО) – числом, постоянным для конкретного экземпляра СИ в конкретный момент времени.

3. Устанавливаются два вида норм на МХ – пределы допускаемых значений, которым в процессе эксплуатации должна удовлетворять МХ каждого СИ данного типа, и характеристики распределения значений МХ по совокупности СИ этого типа. Нормы первого вида в обязательном порядке устанавливаются для всех МХ, включенных в комплекс нормируемых для данного типа СИ. Они устанавливают границы метрологической исправности СИ. Нормы второго типа устанавливаются для некоторых из них и характеризуют стабильность производства СИ и МХ в процессе эксплуатации. Они применяются при решении различных метрологических задач (выбор СИ по точности, синтез измерительных систем, составление методик измерений и т.д.), а также для разработки рекомендаций по повышению качества и стабильности СИ, в том числе и обоснования норм первого вида.

Таким образом, под метрологической исправностью следует понимать состояние СИ, при котором все его МХ удовлетворяют нормам первого вида, а под метрологическим отказом – событие, заключающееся в том, что одна из его МХ пересекла границу поля допуска (то есть возникла метрологическая неисправность).

Показатели метрологической надежности средств измерений

Термины и определения большинства показателей метрологической надежности соответствуют терминам и определениям аналогичных показателей надежности технических устройств. Действительно, выделяя из общего потока отказов СИ метрологические, можно относительно них сформулировать аналогичные характеристики надежности. Необходимо только при этом оговаривать, что рассматриваются исключительно метрологические отказы.

Поэтому естественными определениями показателей метрологической надежности являются определения следующего типа: вероятность работы без метрологических отказов – вероятность безотказной работы СИ в части метрологических отказов; средняя наработка до метрологического отказа – средняя наработка СИ до отказа в части метрологических отказов и т.д.

Особенности и анализ риска метрологического отказа СИ

С понятием *метрологический отказ* тесно связано понятие *метрологическая исправность*, под которой понимается состояние СИ, когда все нормируемые метрологические характеристики соответствуют установленным требованиям.

Метрологический отказ СИ по существу является следствием суммарного накопления отклонений параметров его элементов от их номинальных значений и не обязательно возникает при метрологическом отказе одного из элементов.

Из анализа данных следует, что не менее двух третей всех нарушений технологии, отступлений от стандартов, несопоставимости результатов испытаний и экспериментов вызваны неправильным применением СИ или их неточными показаниями [3].

С точки зрения оценивания общей надежности СИ как технической системы, метрологический отказ занимает особое и важное место по двум причинам: это скрытый отказ и частота метрологических отказов значительно превышает частоту всех прочих отказов функционирования СИ. Именно поэтому специфика оценивания/анализа надежности СИ в целом заключается в необходимости преимущественного рассмотрения метрологической надежности и, что особенно важно, адекватного ее моделирования.

Скрытый характер проявления метрологических отказов также обуславливает особенности их выявления. Метрологические отказы могут быть обнаружены только при проведении специальных контрольных операций (поверки, калибровки и др.), которые необходимо осуществлять периодически и системно, то есть по разработанным заранее планам.

Метрологический отказ не может быть отнесен к случайным, характерным для отказов функционирования на стадии нормальной эксплуатации технического устройства. Это скорее отказ параметрический, отличающийся от отказов функционирования технических систем своей скрытностью и отсутствием явных признаков проявления, что приводит к усложнению моделирования метрологических отказов. Все эти отличия диктуют необходимость отдельного нормирования показателей метрологической надежности и надежности функционирования СИ как технического устройства.

Неуниверсальность моделей описания дрейфа показателей метрологической надежности средств измерений усугубляется объективным разнообразием рисков и заинтересованных в их анализе исполнителей (рис. 2).

Отметим, что риск в теории надежности – это не тот риск, который связан с оптимальным или неоптимальным использованием трудовых, материальных и финансовых ресурсов организации и для анализа которого в системе менеджмента качества организации должны быть разработаны документированные процедуры риск-ориентированного подхода. Мы исходим из того, что, согласно концепции безопасности, состояние абсолютной безопасности технической системы нереализуемо и всегда имеется некоторый риск, определяемый как остаточный [6].

Риск функционирования технической системы (технический риск) имеет место на любой стадии жизненного цикла системы и требует анализа и применения эффективных мер по его снижению до приемлемого уровня, например, путем разработки максимально безопасного в своей основе проекта; применения защитных устройства и персонального защитного оборудования; разработки соблюдения правил по установке и эксплуатации; обучения персонала. При этом сохраняется потребность в грамотном и квалифицированном анализе риска на стадиях проектирования, разработки документации, изготовления, испытания и эксплуатации оборудования [7].

Из сказанного следует, что на каждом шаге анализа метрологической надежности средств измерений ответственным исполнителем может быть разработчик, изготовитель, пользователь, уполномоченный представитель органов государственного контроля за обеспечением единства измерений (см. рис. 2). Исполнение действий, их полнота и результативность, как и квалификация исполнителей, являются условиями минимизации рисков функционирования систем с точки зрения их метрологической надежности.



Рис. 2. Порядок действий и исполнители при анализе риска метрологического отказа

Важно подчеркнуть, что в международных документах по метрологической надежности СИ не исключается возможность установления межкалибровочного / межповерочного интервала СИ путем административного решения [4, 8]. Это вполне оправдано, когда речь идет о возможных неприемлемых последствиях применения неисправного СИ в сферах государственного регулирования обеспечением единства измерений. В Российской Федерации рекомендуемые предельные значения интервалов между поверками СИ устанавливаются Приказом Минпромторга РФ (например, в ныне действующем Приказе от 02.07.2019 № 1502).

Заключение

1. Специфика надежности средств измерений заключается в наличии метрологических отказов и необходимости их преимущественного рассмотрения при анализе надежности.

Метрологические отказы отличаются от отказов функционирования:

- скрытым характером проявления, обуславливающим искажение измерительной информации, нарушение принципа единства измерений, невыполнение или снижение качества выполнения разнообразных практических задач;
- способами обеспечения надежности при проектировании и в эксплуатации;
- принципиально иной физической природой возникновения.

Данные отличия диктуют необходимость раздельного нормирования показателей метрологической надежности и надежности функционирования СИ.

2. Проблема обеспечения метрологической надежности средств измерений не может быть решена в рамках классической теории надежности. Необходима разработка специальной теории, учитывающей их специфику.

3. Основная аксиома классической теории надежности, утверждающая, что отказ изделия является следствием отказа одного из его элементов, в принципе не при-

менима к метрологическим отказам. Поэтому аналитические методы теории надежности, как правило, не пригодны для оценки метрологической надежности СИ.

Исключение составляют общие выражения показателей безотказности изделия в виде характеристик случайного распределения времени до наступления отказа.

4. До настоящего времени не найдено теоретически обоснованного и в то же время простого и универсального способа аналитической оценки параметрической надежности. Методы, основанные на теории выбросов случайных процессов, не нашли широкого применения из-за своей сложности.

Как правило, применяются методы, использующие допущение о монотонном характере дрейфа параметров, но эта гипотеза не только не подтверждается экспериментальными данными, но и внутренне противоречива.

5. Принципиально новый подход к оценке метрологической надежности на основе единого описания дрейфа погрешности СИ, разработанный группой профессора П. В. Новицкого, позволяет проводить сравнительную оценку стабильности СИ, созданных разными предприятиями, выявлять причины недостаточной стабильности и определять пути ее повышения.

Однако возможности этого описания весьма ограничены. Не учитываются распределение скоростей дрейфа по совокупности СИ, возможность изменения направления дрейфа, структура СИ. Предлагаемые модели не позволяют провести расчет метрологической надежности СИ на этапе проектирования и тем самым оптимизировать принимаемые технические решения.

6. Существенное упрощение методов оценивания метрологической надежности СИ достигается, если принять во внимание современную концепцию нормирования МХ, регламентированную ГОСТ 8.009–84. Из концепции следует, что любая МХ конкретного экземпляра СИ в определенный момент времени является детерминированной величиной, а метрологическим отказом средства измерений – пересечение одной из МХ границ ее поля допуска.

В результате сложная задача определения вероятности отсутствия выбросов высокочастотного случайного процесса заменяется несколькими значительно более простыми задачами относительно выбросов весьма низкочастотных случайных процессов.

7. Стабильность и метрологическая надежность – различные свойства.

Стабильность первична, так как зависит только от конструкции СИ, качества его изготовления и условий эксплуатации. Метрологическая надежность по сравнению со стабильностью является вторичным свойством, так как она зависит не только от стабильности, но и от пределов допускаемых значений МХ, начальной погрешности и системы метрологического обслуживания СИ. Поэтому аналитическое оценивание метрологической надежности СИ возможно только после оценки его нестабильности.

8. Терминология в области стабильности и метрологической надежности СИ, разработанная автором [3], регламентирована методическими указаниями, которые включают 19 терминов и определений основных понятий, в том числе основополагающие понятия – стабильность СИ, нестабильность МХ, метрологическая исправность, метрологическая надежность и метрологический отказ СИ, а также показатели нестабильности и метрологической надежности СИ.

9. Анализ современных представлений о физико-химических процессах старения и износа показал, что в качестве аксиом теории метрологической надежности СИ можно принять допущения о непрерывности траекторий изменения нестабильности МХ во времени и по диапазону измерений.

10. Состояние абсолютной безопасности технической системы нереализуемо и всегда имеется остаточный, так называемый, технический риск. Результаты анализа риска способствуют разработке максимально безопасного проекта путем обоснования применения защитных устройства и персонального защитного обо-

рудования; разработки соблюдения правил по установке и эксплуатации; подготовки квалифицированного персонала. Ответственными исполнителями анализа метрологической надежности средств измерений могут быть: разработчик, изготовитель, пользователь, уполномоченный представитель органов государственного контроля за обеспечением единства измерений.

Список литературы

1. РМГ 29–2013. ГСОЕИ. Метрология. Основные термины и определения. – М. : Стандартинформ, 2015. – 83 с.
2. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Термины и определения. – Введ. 2017-03-01. – М. : Стандартинформ, 2017. – 30 с.
3. Фридман, А. Э. Теория метрологической надежности средств измерений и других технических средств, имеющих точностные характеристики : дис. ... д-ра техн. наук / А. Э. Фридман. – СПб., 1994. – 423 с.
4. NCSLI. Recommended Practice RP-1. Establishment and Adjustment of Calibration Intervals. – 2010. – 171 p.
5. Новицкий, П. В. Динамика погрешности средств измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф, В. С. Лабунец. – Л. : Энергоатомиздат, 1990. – 191 с.
6. ГОСТ Р 51898–2002. Аспекты безопасности. Правила включения в стандарты. – Введ. 2002-06-05. – М. : Стандартинформ, 2006. – 8 с.
7. ГОСТ Р 51897–2011. Менеджмент риска. Термины и определения. – Введ. 2012-12-01. – М. : Стандартинформ, 2012. – 19 с.
8. ILAC-G24/OIML D 10: Guidelines for the determination of recalibration intervals of measuring equipment used in testing laboratories. 2019. – 12 p.

Metrological Reliability of Measurement Instruments and Assessment of the Risk of Metrological Failure

V. Sh. Sulaberidze, A. A. Neklyudova

Research Laboratory of State Standards for Measurements of Liquid Density and Viscosity, A.A.Tsurko@vniim.ru; Mendeleev All-Russian Institute for Metrology, St. Petersburg, Russia

Keywords: technical risk analysis algorithm; metrological reliability of measuring instruments; metrological failure; reliability of a technical object; risk of metrological failure; object state; technical risk.

Abstract: The features of metrological reliability and the applicability of the basic principles of reliability theory to the metrological reliability of measuring instruments are shown. A description of the state diagram of an object (measuring system) during a metrological failure is given. An algorithm for risk analysis is proposed and the responsible executors of all stages of this algorithm are indicated. The features of metrological failure and the state of metrological serviceability of measuring instruments are analyzed.

References

1. RMG 29-2013. *GSOYEI. Metrologiya. Osnovnyye terminy i opredeleniya* [GSOEI. Metrology. Basic terms and definitions], Moscow: Standartinform, 2015, 83 p. (In Russ.)

2. GOST 27.002-2015. *Nadezhnost' v tekhnike. Terminy i opredeleniya* [Reliability in technology. Terms and Definitions], Moscow: Standartinform, 2017, 30 p. (In Russ.)
 3. Fridman A.E. *Dissertation (Eng.)*, Saint-Peterburg, 1994, 423 p. (In Russ.)
 4. NCSLI. Recommended Practice RP-1. Establishment and Adjustment of Calibration Intervals, 2010, 171 p.
 5. Novitskiy P.V., Zograf I.A., Labunets V.S. *Dinamika pogreshnosti sredstv izmereniy* [The dynamics of the error of measuring instruments], Leningrad: Energoatomizdat, 1990, 191 p. (In Russ.)
 6. GOST R 51898-2002. *Aspekty bezopasnosti. Pravila vklyucheniya v standarty* [Safety aspects. Rules for inclusion in standards], Moscow: Standartinform, 2006, 8 p. (In Russ.)
 7. GOST R 51897-2011. *Menedzhment riska. Terminy i opredeleniya* [Risk management. Terms and definitions], Moscow: Standartinform, 2012, 19 p. (In Russ.)
 8. ILAC-G24/OIML D 10: Guidelines for the determination of recalibration intervals of measuring equipment used in testing laboratories, 2019, 12 p.
-

Metrologische Zuverlässigkeit von Messgeräten und Bewertung des Risikos metrologischer Ausfälle

Zusammenfassung: Es sind die Merkmale der messtechnischen Zuverlässigkeit und die Anwendbarkeit der Grundprinzipien der Zuverlässigkeitstheorie für die messtechnische Zuverlässigkeit von Messgeräten aufgezeigt. Es ist die Beschreibung des Zustandsdiagramms des Objekts (Messsystems) im Falle eines messtechnischen Ausfalls gegeben. Der Algorithmus der Risikoanalyse ist vorgeschlagen und die verantwortlichen Ausführenden aller Stufen dieses Algorithmus sind angegeben. Es sind die Merkmale des messtechnischen Versagens und der Stand der messtechnischen Gebrauchstauglichkeit von Messgeräten analysiert.

Fiabilité métrologique des instruments de mesure et évaluation du risque de la défaillance métrologique

Résumé: Sont présentées les caractéristiques de la fiabilité métrologique et l'applicabilité des principales dispositions de la théorie de la fiabilité à la fiabilité métrologique des moyens de mesure. Est donnée la description du schéma des états de l'objet (système de mesure) en cas de la défaillance métrologique. Est proposé un algorithme d'analyse des risques et sont indiqués les responsables de toutes les étapes de cet algorithme. Sont analysées les caractéristiques de l'échec métrologique et l'état de l'intégrité métrologique des moyens de mesure.

Авторы: *Сулаберидзе Владимир Шалвович* – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник; *Неклюдова Анастасия Александровна* – кандидат технических наук, заместитель руководителя лаборатории, ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева», Санкт-Петербург, Россия.