Л.В. Ефремов

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММЫ

Л.В. Ефремов ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Л.В. Ефремов

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ: АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАМЫ

Санкт – Петербург
2011

УДК 629.02:06-192
ББК 39.45
Е92

Рецензенты:
д-р техн. наук, проф. **В.М. Мусалимов**
д-р техн. наук, проф. **В.Ш. Сулаберидзе**

Е92 Ефремов Л.В.

Вероятностная оценка метрологической надежности средств измерений: алгоритмы и программы. — СПб. : Нестор-История, 2011. — 200 с.

ISBN 978-5-98187-855-8

В монографии даны алгоритмы и программы в математических редакторах MathCAD и EXCEL, направленные на решение проблем управления метрологической надежностью средств измерения в соответствии с международными требованиями к контролю качества измерительного оборудования. К таким проблемам относится вероятностная оценка метрологической исправности приборов по мере выполнения первичных и периодических поверок (калибровок), а так же обоснование или корректировка межповерочных интервалов. Эти и другие метрологические проблемы решаются с помощью мощных критериев оценки исправности приборов с учетом вероятностных процессов ухудшения их состояния.

Для сотрудников академических и отраслевых научно-исследовательских институтов, конструкторских бюро, испытательных лабораторий и специалистов промышленных предприятий, преподавателей и студентов технических университетов.

Efremov L.V.

Probabilistic assessment of the metrological reliability of measuring instruments: algorithms and programs. — St. Petersburg : Nestor-Historia, 2011. — 200 p.

The book gives the algorithms and programs in the mathematical editors MathCAD and EXCEL, to address the problems of control of the metrological reliability of measuring instruments under international requirements for quality assurance measuring equipment. These problems include the probabilistic assessment of the metrological serviceability of equipment as the primary implementation and periodic calibration (calibration) and the rationale for adjustment or calibration interval. These and other metrological problems are solved with the help of powerful criteria for evaluating serviceability of equipment, taking into account the probability degradation of their condition.

For employees of academic and industrial research institutes, design offices, testing laboratories and specialists of industrial enterprises, teachers and students of technical universities.

УДК 629.02:06-192
ББК 39.45

ISBN 978-5-98187-855-8

9 785981 878558

© Л.В. Ефремов, 2011

ПРЕДИСЛОВИЕ

В Федеральном законе об обеспечении единства измерений [68] особое значение придается проблеме подтверждения соответствия средств измерений (СИ) метрологическим требованиям путем выполнения первичных и периодических поверок. Это не простая проблема, поскольку погрешность, как основная метрологическая характеристика СИ, имеет вероятностную природу, которая не однозначно понимается и учитывается в метрологической документации. В правилах поверки многих приборов не всегда принято оценивать дисперсию результатов измерений, и они признаются исправными даже в случаях совпадения или близости погрешности к ее пределу, хотя это состояние может быть нарушено сразу же после проведения поверки со всеми вытекающими отсюда негативными, а иногда и трагическими последствиями. Вместе с тем в последние годы внедряются методы расчета так называемой неопределенности [59], которые целиком базируются на анализе характеристик рассеяния экспериментальных данных. Очевидно, что это актуально для оценки точности измерений при сличении эталонов, но вопрос о применении неопределенности для поверки СИ пока еще не имеет однозначного решения.

Особенность вероятностных методов и программ, которые рассматриваются в этой монографии, заключается в том, что их целью является не столько изучение точности расчета истинной величины (которую при поверке можно считать известной характеристикой применяемого эталона), сколько оценка односторонней вероятности не достижения предела погрешности измерений. Эта вероятность принята за критерий исправности СИ. Для ее расчета предложен равноценный критерий, названный запасом метрологической надежности (ЗМН) , который представляет собой квантиль двухпараметрического нормального распределения указанной вероятности [35]. Он является комплексным показателем, учитывающим в общем случае изменение как систематической, так и случайной погрешности прибора. Такой подход к индивидуальной оценке исправности конкретного экземпляра СИ является развитием корректного метода поверки некоторых СИ (например, лабораторных весов [8]). ЗМН позволяет объективно оценивать текущую метрологическую исправность СИ и прогнозировать сроки достижения предела его погрешности, а также контролировать дрейф систематических погрешностей.

Другая проблема, рассматриваемая в этой книге, относится к нормированию межповерочных интервалов поверок (калибровок) путем моделирования трендов изменения погрешности СИ. В основу этого метода положен регрессивный ана-

лиз с учетом способов подготовки и организации измерительных процедур. В книге также включены алгоритмы и программы общетехнического назначения, применяемые для оценки показателей надежности любых изделий, которые можно успешно применить для СИ в зависимости от способа получения исходных данных.

Для программирования в книге используется мощный математический редактор MathCAD в сочетании с электронными таблицами EXCEL, доступными для широкого круга специалистов. Благодаря особой наглядности редактора MathCAD [53] большинство алгоритмов в книге демонстрируется на его фрагментах с соответствующими комментариями.

Приведенные в этой работе алгоритмы и программы создают реальные возможности для внедрения в практику международных стандартов о руководящих принципах оценки сроков метрологического подтверждения для измерительного оборудования [2,46].

Принятие решения о целесообразности применении изложенных здесь методов зависит от доброй воли поставщиков измерительной техники с учетом ее особенностей, назначения, конструкции, условий эксплуатации и потребности корректировки нормативной документации.

Поскольку данная книга имеет достаточно сложную структуру, было принято решение установить перед основным текстом первую главу в качестве навигатора (путеводителя) по разделам этого труда для упрощения поиска нужных алгоритмов расчета.

Автор считает своим долгом выразить благодарность ведущим сотрудникам ВНИИМ им. Д.И Менделеева, проф., д.т.н, Л.А. Конопелько, а также кандидатам наук Р.Е. Тайманову и К.В. Сапожниковой за постановку актуальных задач для этой книги и моральную поддержку. Особая признательность выражается сотруднику того же института О.В. Фатиной и аспирантам Мурманского ГТУ Ж. В. Кумовой и М.А. Чистяковой, осуществивших большой объем метрологических испытаний ряда приборов, результаты которых были использованы в этом труде. Нельзя не отметить благожелательные отзывы рецензентов этой монографии д-ра техн. наук, проф. В. М. Мусалимова и д-ра техн. наук, проф. В.Ш. Сулаберидзе, критические замечания которых были с благодарностью приняты и учтены автором перед сдачей рукописи в печать.

Монография рекомендована к изданию решением заседания Ученого Совета института проблем машиноведения Российской Академии Наук (ИПМаш РАН) от 13 сентября 2011 года..

Издание книги приурочено к проведению десятой сессии международной научной школы «Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов» (24-28 октября 2011 года) по тематике работы секции 1.1. «Контроль метрологической надежности средств измерений».

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ВБР	вероятность безотказной работы
ЗМН	запас метрологической надежности
МКИ	межкалибровочный интервал
МПИ	межповерочный интервал
НПВ	наибольший предел взвешивания
НмПВ	наименьший предел взвешивания
СИ	средство измерения
СКО или сигма	среднее квадратическое отклонение
ЦСМ	Центр Стандартизации и Метрологии

1. Навигатор по разделам монографии

1.1. Введение

Учитывая сложную структуру этой книги, целесообразно ее первую главу посвятить краткому описанию основных разделов с соответствующими комментариями. Отметим, что в этом вспомогательном материале возможно дублирование содержания рассматриваемых далее разделов основного текста.

Если проанализировать содержание книги, то можно прийти к заключению, что она направлена на решение двух главных проблем. Первая проблема рассматривается в главе 4. Она заключается в совершенствовании системы периодического контроля технического состояния средств измерений (СИ), подобной системе планово-предупредительных ремонтов машин с элементами технической диагностики. В основу предложенной системы алгоритмов положены два критерия оценки исправности СИ: запас метрологической надежности (ЗМН) и допустимая систематическая погрешность.

Таблица 1-1

Программа		Назначение	Раздел
Индивидуальный контроль			
ЭИ-У	МИ-У	Универсальная программа	3.1
ЭИ-П	МИ-П	Оценка планируемого объема выборки	3.2.2
	МИ-В	Оценка сходимости измерений весов по размаху выборки	3.3.3
	МИ-ТС	Расчет неопределенности измерений термометров	3.3.4
	МИ-Н	Обоснование применения нормального закона	4.1.2
	МИ-0	Обоснование гамма – процентного ресурса с учетом β	5.1.1
ЭИ-1	МИ-1	Оценка погрешности изготовления эталонной гири	4.2.2
	МИ-8	Оценка погрешности четырех твердомеров	4.2.3
ЭИ-5	МИ-7	Анализ зависимости исправности однотипных приборов от возраста	4.2.4
ЭИ-2	МИ-2	Оценка параметров СИ при первичных поверках	4.2.2
ЭИ-3	МИ-6	Оценка надежности СИ при периодической поверке	4.2.3
ЭИ-4		Программа для паспорта исправности СИ	
Обезличенное нормирование МПИ			
ЭО-1	МО-1	Оценка МПИ по среднему ресурсу	5.2
ЭО-2	МО-2	Оценка МКИ по гамма – процентному ресурсу.	
	МО-3	Оценка МКИ водосчетчиков по лабораторной статистике	5.3
	МО-6	Оценка МКИ при плановом контроле СИ опытной партии	
	МО-7	Оценка МКИ при случайных отказах СИ опытной партии	
	МО-8	Оценка МКИ по точкам цензурированной выборки отказов	
	МО-9	То же с построением гистограммы по интервалам	
Моделирование тренда погрешности			
	МО-4	Оценка качества СИ при первичной поверке опытной партии	5.4
	МО-5	Оценка МКИ при периодических поверках опытной партии	

Вторая главная проблема, решаемая в главе 5, связана с обоснованием нормативов МПИ при утверждении типа СИ на основе расчета гамма – процентных ресурсов при разных вариантах получения исходных данных

В главах 2 и 3 монографии приводятся используемые в книге определения и рассмотрены программы обработки статистической информации с целью обеспечения точности и достоверности вероятностных расчетов.

Особенностью этой книги является то что, все алгоритмы и программы в ней показаны на конкретных примерах расчета в редакторах EXCEL и MathCAD.

Перечень основных программ, рассмотренных в этой книге, дан в таблице 1-1.

Далее дается краткий обзор содержания глав этого труда.

1.2. Содержание второй главы

Актуальность и задачи разработки алгоритмов и программ этого труда обоснованы в первом параграфе второй главы книги. Они основаны на опыте поверок СИ региональными метрологическими центрами [53] и требованиях международных метрологических стандартов [2,46 и др.], где сформулированы правила корректировки интервалов времени между подтверждениями качества измерительного оборудования. Следует особо отметить соответствие рекомендуемых в книге алгоритмов требованиям ИСО 10012-1:1992 «Требования по обеспечению качества измерительного оборудования. Часть 1. Система метрологического подтверждения для измерительного оборудования» [46]. Для выполнения требований этого стандарта поставщикам СИ можно рекомендовать, наряду с расчетно-экспериментальными исследованиями, создание организационных систем сбора и обработки информации об опыте эксплуатации своей продукции.

В разделе 2.2, даны основные понятия рассматриваемой методики, которые соответствуют ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения» [13], а не более позднему варианту аналогичного стандарта ГОСТ Р 53480-2009, обозначение которого заменено на ГОСТ Р 27.002-2009. Это связано с тем, что используемые в книге метрологические термины и понятия по РМГ [58] базируются на многолетнем опыте применения автором упомянутого ГОСТ [13].

При рассмотрении основных понятий наибольшее значение для практики придано выражению систематической погрешности через среднюю арифметическую погрешность, а случайной погрешности – через СКО. В том же разделе уделено некоторое внимание законам распределения вероятностей, которые далее используются в основных алгоритмах расчета. Также нельзя было обойти вопросы применения термина «неопределенность», который при определенных условиях может быть использован взамен СКО.

Как уже было сказано, для программирования в книге используется мощный математический редактор MathCAD в сочетании с электронными таблицами EXCEL, доступными для широкого круга специалистов. Благодаря особой наглядности редактора MathCAD [54] большинство алго-

ритмов в книге демонстрируется на его фрагментах с соответствующими комментариями.

Преимущества этих математических редакторов описаны в разделе 2.3. Там же приведены требования к программному обеспечению решения вспомогательных задач, которые нужны для выполнения и оформления результатов расчета.

1.3. Содержание третьей главы

Программа расчета характеристик рассеяния. Третья глава книги посвящена общим алгоритмам и программам расчета характеристик рассеяния эмпирических выборок.

В разделе 3.1. дано подробное описание программ расчета в редакторах EXCEL и MathCAD математического ожидания и доверительных границ выборки любой случайной величины. Эти программы отличаются полнотой статистического анализа и состоят из ряда этапов, включая проверку выборки на отсев и оценку доверительных границ с учетом неопределенности выборки. Стоит обратить внимание на оригинальные способы анализа выборок с помощью эмпирических распределений вероятностей и так называемого «ящика с усами».

После ознакомления с процедурами расчета характеристик выборки в разделе 3.2. рассмотрено два вопроса о влиянии качества образованной выборки случайных величин на достоверность вероятностных оценок и корректность выбора закона распределения.

Первый вопрос относится к методике планирования объема многократных измерений с целью оценки математического ожидания в доверительных границах выборки. Даны рабочие программы и номограммы для расчета требуемого объема выборки по данным о коэффициенте вариации и двухсторонней доверительной вероятности с учетом размера выборки (большой или малой).

Второй вопрос связан с выбором оптимального закона распределения вероятности для контроля метрологической надежности СИ в зависимости от цели исследования и объема выборки. На основании проверки согласия эмпирических и теоретических распределений по коэффициенту корреляции Rxy было установлено, что во всех случаях корреляция функций плотности вероятности с гистограммой оказалась сильно зависимой от объема выборки. Наибольшее согласие наблюдается при большой выборке (Rxy = 0.94 …0.99), а наименьшее – при малой выборке (Rxy = 0.22…0.35). Величина СКО мало влияет на согласие эмпирических и теоретических распределений. Сделано важное заключение о способе выбора закона распределения при решении тех или иных вероятностных задач. Корректное обоснование закона можно получить только при достаточно большом объеме выборке. При использовании малых выборок закон следует назначать по результатам предварительных измерений при больших выборках или с учетом физической природы вероятностного процесса. В частности доказывается преимущество нормального закона для оценки

ЗМН по сравнению с другими симметричными распределениями (треугольным и равномерным).

Анализ действующих правил поверки СИ. В параграфе 3.3. обобщен некоторый опыт проведения поверок СИ разного назначения. Для примера рассмотрены строгие правила поверки лабораторных электронных весов. Такие правила обычно могут быть соблюдены только при проведении первичных поверок в специальных лабораториях и (или) на предприятиях – изготовителях. Однако, ни в одних правилах не удалось найти различий требований к периодическим и первичным поверкам.

Ключевой проблемой оценки исправности СИ является планирование измерений погрешности, а также выбор и расчет с их помощью критериев оценки исправности СИ. Наиболее грамотно эта проблема решена для весов, которые имеют наиболее совершенную метрологическую документацию, предусматривающую контроль сходимости измерений с учетом СКО и (или) размаха выборки.

Главное достоинство стандартов о поверках весов состоит в назначение двух уровней предела погрешности – для поверок и для эксплуатации. Предел погрешности для эксплуатации в два раза выше поверочной нормы. Этот принцип учтен далее в книге при нормировании запаса надежности СИ.

Анализ применения концепции неопределенности при поверках. Руководство по выражению неопределенности измерения [1] приобрело статус неформального международного стандарта в области международных сличений эталонов. Однако в правилах поверки СИ понятие о неопределенности широкого распространения пока не получило. Обзор метрологической документации позволил обнаружить только один тип СИ, поверка которого полностью базируется на расчете расширенной и суммарной неопределенности. Речь идет о термометрах сопротивления (далее ТС) из платины, меди и никеля изготавливаемые по ГОСТ Р 8.625 – 2006 [24], Для того, чтобы проверить целесообразность распространения этой методики на другие СИ в разделе 3.3.4. была составлена программа для расчета расширенной неопределенности поверки прибора «Термоизмеритель ТМ – 12». Исходные данные для расчета получены из [56]. На основании выполненного расчета было сделано следующее заключение.

Во-первых, результаты расчета расширенной неопределенности характеризуют лишь доверительные границы истинной величины измерений, которые не позволяют однозначно оценивать исправность прибора.

Во-вторых, переход на такую методику требует для СИ каждого типа проведения специальных исследований номенклатуры и классификации различных источников неопределенностей, а также методов испытаний для их определения.

В-третьих, трудно понять причину отказа от прямых измерений погрешности путем сравнения с пределом погрешности с целью проверки исправности СИ.

Рассмотренный пример подтверждает, что концепция неопределенности пригодна для сличения эталонов и сравнения качества измерений в различных изме-

рительных лабораториях. Однако, для того, чтобы количественно охарактеризовать метрологическую исправность рабочих СИ, она явно непригодна. Возможно, что дальнейшая проработка концепции неопределенности и позволит исправить этот ее недостаток, хотя и без того проблема успешно решается в рамках теории погрешности.

1.4. Содержание четвертой главы

Запас метрологической надежности и его применение. В этой книге в качестве основной метрологической характеристики принят простой, понятный и эффективный критерий – запас метрологической надежности (ЗМН). Основное назначение ЗМН заключается в предотвращении метрологических отказов СИ при его эксплуатации между текущей и последующей поверкой с заданной вероятностью β.

ЗМН представляет собой квантиль двухпараметрического нормального распределения указанной вероятности, определяемый по формуле (4-1) по данным о пределе погрешности, систематической погрешности и случайной погрешности.

В разделе 4.1.2 доказана правомерность пользования для оценки ЗМН только классическое нормальное распределение Гаусса. В частности расчеты показали, что такие симметричные и усеченные распределения как равномерное и треугольное, не отвечают правилу трех сигм и с их помощью невозможно контролировать маловероятные события достижения предельных погрешностей за пределами границ усечений. Наличие у нормального закона бесконечных «хвостов» защищает СИ от маловероятных негативных событий.

Нормирование предела погрешности и ЗМН. Для эффективного применения ЗМН как критерия оценки исправности СИ необходимо знать допустимые значения этого показателя. Для учета возможной деградации погрешности прибора в межповерочный период было введено два уровня предела погрешности и ЗМН. Верхние уровни характеризуют исправное состояние СИ при нулевой систематической погрешности, используемые для допуска его к работе после юстировки.

Нижние уровни введены для учета некоторого допустимого увеличения погрешности прибора за межповерочный интервал эксплуатации. Приближение ЗМН к нижнему уровню увеличивает вероятность отказа прибора и создает необходимость его очередной поверки или калибровки. Поэтому нижний уровень ЗМН является базовым при нормировании ЗМН. Некоторый опыт применения данной методики позволяет предложить нормы базовых ЗМН в зависимости от категории СИ, которые приведены в табл. 4-2.

Кроме ЗМН для контроля исправности СИ рекомендованы дополнительные показатели: допустимая систематическая погрешность и допустимые скорости изменения ЗМН. Эти характеристики подлежат обоснованию при первичных поверках прибора, наряду с другими метрологическими характеристиками (раздел 4.3.2).

Обеспечение достоверности оценки ЗМН. При выполнении периодических поверок с однократными - трехкратными измерениями часто наблюдается явная нестабильность СКО. Кроме того, у некоторых приборов при многократных измерениях погрешность практически не меняется и тогда СКО стремится к нулю. Однако, и в этих случаях предлагаемая методика позволяет оценивать ЗМН и контролировать тренд систематической погрешности путем замены фактической СКО некоторой малой величиной за счет введения в алгоритм расчета поправки по формуле (4-5).

. **Примеры поверки приборов с помощью ЗМН**. В разделе 4.2 показано три примера практического применения программ с целью демонстрации фактического состояния, в котором зачастую находятся измерительная техника.

Поверка весов. Сначала рассмотрен пример поверки электронных весов типа ВЛТ-1500-П [43] с целью оценки погрешности изготовления в учебных мастерских гири массой 500 грамм. В результате вычислений ЗМН установлено, что гиря была изготовлена с недопустимой систематической погрешностью 0.22 грамма, которая оказалась заметно больше требуемого предела погрешности 0.05 грамма. Показано решение проблемы исправления измерений путем введения положительной поправки 0.22 грамма во все ранее определенные члены выборки. Тогда средняя погрешность снизилась до нуля, хотя СКО при этом не изменилось. Пересчет показал, что ЗМН повысился до $Z = 3.47$ (вероятность $\beta = 0.9997$) при $h_a = 0.05$, что удовлетворяет ГОСТ.

Поверка твердомеров. Второй пример относится к поверке приборов для измерения твердости металлов – твердомеров. Было испытано четыре твердомера, три из которых представляли собой однотипные стационарные машины статического принципа измерений разных годов постройки с периодом эксплуатации 53, 52 и 29 лет. Четвертый твердомер - это современный малогабаритный ультразвуковой твердомер «Константа К5У». При расчете ЗМН для исходной выборки все машины оказались в неудовлетворительном состоянии по причине больших СКО или систематических погрешностей. При переходе к исправленной выборке (с исключенной систематической погрешностью) оказалось, что наиболее высокое качество получено при измерении погрешности стальным конусом на машинах 1957 и 1958 года постройки. По сравнению с рассмотренными статическими приборами наиболее современный прибор «Константа К5У» оказался наименее точным при рассмотрении как исходной, так и исправленной выборки. Согласно инструкции по эксплуатации такой прибор должен быть признан исправным, поскольку имеет малую систематическую погрешность $0.496 < 2$. Между тем, из-за очень большой величины СКО (2.94), ЗМН составил всего 0.68 при вероятности $\beta = 0.72$.

Этот пример также показывает, что рассмотренный метод поверки с помощью ЗМН можно использовать как эффективный способ контроля знаний и умений при обучении операторов применению новой измерительной техники.

Пакетный анализ результатов поверки девяти приборов. Третий пример демонстрирует зависимость метрологической надежности от продолжительности эксплуатации приборов. Объектом исследования послужила группа из девяти однотипных приборов, принятая на поверку от их пользователей после различных сроков эксплуатации [42]. Поверка проводилась опытными специалистами в специализированной лаборатории, что гарантирует достоверность измерений. Каждый цикл измерений выполнялся при минимальном объеме выборки из трех членов, что позволило проверить эффективность корректировки фактической СКО по формуле (4-5).

Важно отметить, что в качестве критериев исправности прибора здесь использован не только ЗМН и допустимая систематическая погрешность, но и относительный остаточный ресурс R_{ost} после юстировки с учетом скорости деградации погрешности. До момента поверки указанные приборы имели различные сроки эксплуатации в диапазоне от 2.5 до 6 лет.

Выполнялось два варианта расчета ЗМН – при нулевой и расчетной систематической погрешности. При этом ЗМН с нулевой систематической погрешностью относился к поверкам прибора после проведения юстировки (предыдущей и настоящей), а расчетный ЗМН – к первому этапу поверки перед юстировкой с учетом средней (систематической) погрешности. В заключение рассчитывалась скорость деградации ЗМН и остаточный ресурс в относительных единицах по формуле (4-6). Если эту величину принять за критерий исправности прибора после юстировки, то при $R_{ost} \geq 1$ СИ доработает до следующего МПИ с соблюдением требований к базовому значению ЗМН. Из таблицы 4-6 видно, что этому условию удовлетворяют только первых пять приборов со сроком службы 2.5 года, а остальные четыре прибора возрастом от 3 до 6 лет признаны неисправными, т.к. $R_{ost} \leq 1$. Эти результаты подтверждаются графиками изменения положения «ящиков с усами» на фрагменте 4-12. Наибольшее отклонение от допустимой зоны имеет прибор с возрастом 6 лет, хотя он имеет почти нулевое СКО.

Корреляционный анализ исследуемых компонентов выявил высокий коэффициент корреляции 0.959 зависимости систематической погрешности от возраста прибора, что нельзя сказать о случайной погрешности, для которой коэффициент корреляции не превысил 0.6.

Особенности предлагаемой системы периодических поверок и калибровок СИ. Важнейшая рекомендация, которая базируется на понятии о ЗМН, относится к совершенствованию системы периодических поверок и калибровок СИ (рис. 4-6). Предлагаемая система отвечает международным требованиям к метрологическому подтверждению качества измерительного оборудования [46] и имеет следующие особенности.

Первая особенность состоит в различных требованиях к первичным и периодическим поверкам.

Первичная поверка должна выполняться перед началом эксплуатации или после ремонта прибора с целью установления допустимых уровней

ЗМН и других исходных параметров метрологической надежности с учетом требуемой вероятности не превышения предела погрешности β.

Эти показатели должны определяться с высокой тщательностью в специальных лабораторных условиях после калибровки и регулировки прибора при нулевой систематической погрешности. Учитывая повышенные требования к первичным поверкам, представляется целесообразным поручать их выполнение только специально аттестованным лабораториям.

Периодические поверки могут выполняться в порядке технического обслуживания метрологическими службами пользователей СИ. В частности можно ограничиться трех-пяти разовым измерением погрешности с расчетом средней погрешности. При этом во многих случаях СКО допускается принимать постоянной величиной, определяемой по результатам первичной поверки.

Второй особенностью предлагаемой системы является обязательный контроль исправности СИ сразу же после его поступления на периодическую поверку до юстировки с последующей повторной поверкой после юстировки. При этом критерием исправности СИ и прогноза МПИ является скорость изменения ЗМН и остаточный ресурс (раздел 4.3.3).

Третья особенность заключается в регистрации истории всех поверок в специальном документа учета (например, паспорте) который должен постоянно находиться в комплекте прибора в бумажном или электронном (рекомендуется) виде. В этом учетном документе следует отражать время эксплуатации прибора между поверками, нормы метрологических характеристик, результаты измерений погрешности и результаты расчета показателей надежности.

Алгоритмы для первичных поверок приборов. Оценку характеристик сходимости измерений при первичной поверке рекомендуется проводить для выбранных эталонных величин в требуемых условиях испытаний после тщательной подготовки и юстировки прибора. В итоге прибор должен находиться в полностью исправном состоянии.

К основным метрологическим характеристикам, которые рекомендуется определять при первичной поверке, относятся: фактическая систематическая погрешность, СКО и размах выборки, нижний Z_H и верхний Z_B уровни ЗМН, а также допустимая систематическая погрешность по формуле (4-3). При первичных поверках желательно обеспечить максимально возможный объем выборки измерений.

В разделе 4.3.2. демонстрируется программа МИ-2 в редакторе MathCAD расчета показателей заведомо надежного СИ [42]. Исходные данные содержат: векторы большой выборки объемом 100 измерений, нормативный предел погрешности (10% от номинала) высокие уровни ЗМН ($Z_H = 3$ и $Z_B = 6$). Полученные расчетом сравнительно малые величины систематической и случайной погрешности обеспечили более высокую величину фактического ЗМН $Z = 6.92 > Z_B = 6$, что подтверждает справедливость назначения указанного предела погрешности при вводе прибора в эксплуатацию после выполнения первичной поверки. В этом разделе рассмотрено три варианта решения задачи. Первый вариант базируется на

фактических измерениях СКО при нормативном пределе погрешности и нулевой (исключенной) систематической погрешности. Второй вариант соответствует $Z_B = 6$ и $Z_H = 3$. Третий вариант основан на принципе равенства предела погрешности и размаха выборки.

Формально для работы следовало бы принять первый вариант параметров. Окончательное заключение о замене первого варианта на один из двух последующих можно сделать после проведения периодической поверки с учетом оценки скорости изменения ЗМН.

Для проверки влияния качества выборки, из рассмотренной большой выборки вырезались участки выборки разного объема, например, из семи членов. Для такой выборки были повторно рассчитаны метрологические характеристики, которые, как и следовало ожидать, не совпали с исходными величинами. Сравнение этих результатов на фрагменте 4-16 показало, что выборка теперь хуже согласуется с нормальным распределением, что видно по «ящику с усами» и по коэффициентам корреляции. Тем не менее, второй расчет при малой выборке подтвердил высокую метрологическую надежность исследуемого прибора и заключение о допуске его в эксплуатацию. Выполненный анализ еще раз показал неустойчивость СКО при малых объемах выборки, что, однако, не создает препятствий для оценки и контроля ЗМН благодаря защитной подпрограмме по формуле (4-5).

Этот расчет был также выполнен в электронной таблице EXCEL, результаты которого полностью совпали с расчетом в редакторе MathCAD.

Алгоритмы для периодических поверок приборов. В раздел 4.3.3 книги включены программы для контроля погрешности СИ при выполнении периодических поверок. Как было сказано, основными задачами периодической поверки следует считать оценку технического состояния и скорости тренда погрешности при эксплуатации, а также принятия решения о юстировке и допуске СИ к дальнейшей работе. Программы разработаны применительно к системе периодических поверок и калибровок, показанной на рис. 4-6.

Обращается внимание на типовое содержание операций каждой периодической поверки. Первой и обязательной операцией должно быть многоразовое измерение погрешности и оценка ЗМН сразу же после поступления прибора в лабораторию. Нарушение этого правила не позволит проверить уровень надежности прибора в случае выполнения юстировки без предварительной поверки СИ. После юстировки производятся повторные измерения погрешности с целью принятия решения о дальнейшем использовании прибора, т.е. отправки его в ремонт или допуска к эксплуатации до следующей поверки. При наличии соответствующих правовых оснований приводимая ниже программа позволяет корректировать МПИ до следующей поверки путем расчета, так называемого, остаточного ресурса.

Сначала рассмотрены фрагменты расчетов по программе МИ-6 в редакторе MathCAD по исходным данным об алкометре, обоснованных в разделе 4.3.2. Алгоритм состоит из следующих этапов и подразделов.

Первый этап посвящен результатам поверки перед юстировкой прибора для исходного вектора выборки измерений эталонных концентраций этанола объемом 5 циклов с учетом метрологических характеристик по данным и предыдущего МПИ. Из расчета видно, что из-за роста систематической погрешности ЗМН снизился с 7.07 до 3.78, но при этом остался в допустимых границах (более 3). На этом основании небольшая подпрограмма в конце фрагмента автоматически выдала высокую оценку надежности прибора перед поступлением на поверку. Однако, это не значит, что данный прибор будет надежно работать в дальнейшей эксплуатации. Поэтому далее следует подпрограмма расчета ЗМН и остаточного ресурса в случае не выполнения юстировки. Эта подпрограмма является универсальной для расчета после выполнения юстировки. Ее суть состоит в определении по формулам (4-7)…(4-10) следующих параметров:

тренда ЗМН относительно предыдущей поверки M_i,

скорости деградации V_i,,

прогнозируемого ЗМН Z_{i+1},

остаточного ресурса до следующей $(i+1)$ -й поверки T_{i+1}.

Для принятия решения о выполнении юстировки прогнозируемый запас Z_{i+1} сравнивался с базовым пределом погрешности Z_H , а фактический остаточный ресурс – с нормативным МПИ. Расчетом установлено, что без выполнения юстировки прибор бы вышел из строя уже через 2.85 месяца. Поэтому были выполнены расчеты вектора выборки с нулевой систематической погрешностью по данным повторной калибровки прибора после его юстировки. Расчеты показали, что после юстировки сохранилась высокая надежность прибора и имеется достаточно оснований назначить МПИ, равным 12 мес.

Завершается расчет по программе МИ-6 автоматическим построением итоговой таблицы всего исследования с целью ее сравнения с представленным ниже расчетом в редакторе EXCEL.по относительно простой программе ЭИ-3, которая так же приводиться в разделе 4.3.3.

Программа ЭИ-4 для ведения паспорта контроля надежности СИ. Эта программа, составленная в редакторе EXCEL, имеет большое практическое значение для решения ключевой проблемы контроля погрешности СИ, а именно - прогнозирования сроков службы СИ. При этом возможно два варианта применения программы в зависимости от скорости тренда погрешности. Первый вариант относится к СИ с относительно высокой скоростью тренда, когда приходиться после каждой периодической поверки выполнять юстировку и оценивать последующий МПИ. Такой вариант рассмотрен по исходным данным из расчета по программам ЭИ-3 и МИ-6. Второй вариант применяется для СИ с небольшой скоростью тренда погрешности, когда на основании расчета остаточного ресурса СИ можно продлевать эксплуатацию на один или более МПИ без выполнения юстировок.

Программа ЭИ-4 позволяет создавать паспорт учета измерений погрешности конкретного СИ в редакторе EXCEL по мере выполнения поверок (рис. 4-9). Этот документ предназначен не только для регистрации

результаты вычислений ЗМН по программе ЭИ-3, но и для автоматического составления заключения об исправности и остаточном ресурсе СИ.

Программа составлена для тестового эталонного параметра, который назначается при первичной поверке СИ наряду с другими метрологическими характеристиками.

Применение такого документа позволит объективно оценивать тренды погрешности конкретных СИ с целью своевременного выполнения их технического обслуживания и ремонта (рис. 4-10 и табл. 4-7). Большое значение имеет накопление указанной информации для корректировки нормативов МПИ.

1.5. Содержание пятой главы

Алгоритмы и программы нормирования МПИ и МКИ. Интервалы между поверками и (или) калибровками являются важнейшей метрологической характеристиками любого СИ. В метрологической документации эти показатели обозначаются терминами МПИ - межповерочный интервал и (или) МКИ - межкалибровочный интервал. Формальное обоснование этих показателей должно выполняться при утверждении типа СИ стандартизированными методами [60]. Однако, они не всегда доступны для практического применения по ряду причин: сложность математического аппарата, проблемы получения исходных данных, отсутствие программного обеспечения и др.

В этих условиях у поставщиков некоторых приборов появляется альтернативная возможность решить указанную проблему по алгоритмам данной главы книги, которая содержит ряд программ в математических редакторах EXCEL в MathCAD.

В отличие от индивидуального контроля исправности СИ для нормирования указанных показателей необходимо иметь исходную информацию об отказах не одного объекта, а о выборке отказов группы однотипных объектов. Предлагаемые программы можно классифицировать в зависимости от способов получения этой информации и степени ее достоверности. С этой точки зрения в книге они разделены на три условные группы.

В разделе 5.2 рассматриваются простые программы статистической обработки эксплуатационных данных о фактических МПИ или МКИ. Целью такого исследования является оценка средних показателей с указанием доверительных границ. Такой подход могут применять для формальной отчетности об организации работы метрологических служб, но к оценке надежности это имеет мало отношения. В литературе [32] встречается похожая задача оценки интенсивности событий (отказов, МПИ и др.) как обратной величины средней наработки между ними. С несколько большей достоверностью можно оценивать гамма – процентный срок МКИ, если калибровки выполняются на основании предварительного индивидуального анализа систематических погрешностей.

Вторая группа программ в разделе 5.3. направлена на более точное прогнозирование показателей надежности СИ и их элементов (вероятно-

сти безотказной работы, гамма – процентных ресурсов и др.) по данным о незавершенных (усеченных) и цензурированных выборках отказов подконтрольных объектов [37]. Эти программы позволяют обеспечить высокую достоверность оценок за счет учета как отказавших, так и пока еще исправных образцов.

Третья группа программ из раздела 5.4 относится к организации эксплуатационных или ускоренных испытаний выборки специально отобранных СИ. В основу этих алгоритмов положено изучение трендов изменения ЗМН и ее компонентов (систематических погрешностей и СКО) с учетом классификации СИ по последствиям отказов и по скорости деградации погрешности. Эти методы являются наиболее совершенными для повышения достоверности решения поставленных задач.

Алгоритмы и программы сопровождаются инструкциями по организации наблюдений и экспериментальных исследований с целью получения первичных данных. Роль исполнителя этой работы могут выполнять фирмы, поставляющие на рынок СИ данного типа или головные метрологические институты соответствующей отрасли промышленности. Наибольший эффект следует ожидать от деятельности организаций, имеющих в своей структуре подразделения надежности продукции, которые должны осуществлять сбор, систематизацию и обработку информации. В метрологии эффективность этой работы может быть повышена за счет обработки результатов поверок и калибровок, выполняемых измерительными лабораториями метрологических служб.

Программы оценки МПИ по эксплуатационным данным. Наиболее простые способы и программы оценки средних и гамма – процентных МПИ и МКИ относятся к данным о завершенных выборках фактических интервалов, получаемым от измерительных метрологических лабораторий за установленный период эксплуатации. Эти способы хорошо известны, но они не претендуют на достоверность оценки МПИ ввиду высокой нестабильности условий эксплуатации приборов, которые случайно попадают в выборку. Тем не менее, их можно формально применять для отчетности метрологических служб.

Программы ЭО-1 и МО-1 в разделе 5.2 позволяют рассчитывать МПИ и его доверительные границы по одному вектору фактических сроков между поверками. Скорее всего, результат таких вычислений будет мало отличаться от нормативных МПИ, которые должны соблюдаться метрологическими службами.

С большим доверием можно отнестись к методике оценки межкалибровочных интервалов по данным о сроках выполнения фактических калибровок, если считать, что калибровки выполняются при обнаружении выхода погрешности за допустимые пределы. Для решения этой задачи составлены программы МО-2 и ЭО-2. В этом случае целесообразно в качестве основного показателя долговечности использовать гамма – процентный срок службы. В расчетах поставщик приборов данного типа должен устанавливать допустимую вероятность не достижения допустимой погрешности $\gamma_{доп}$. В машиностроении этот показатель обычно выби-

рают в диапазоне от 0.8 до 0.95 в зависимости от последствий отказа. Это приводит к снижению нормативного МПИ в 2 – 3 раза по сравнению со средним или медианным сроком и гарантирует безотказную работу большинства СИ данного типа. В этих программах применена методика расчета параметров распределения на основе проверки согласия опытного и теоретических распределений как в редакторе EXCEL, так и в редакторе MathCAD.

Программы оценки гамма – процентного ресурса подконтрольных партий приборов. Следующее направление обоснования МПИ основано на наблюдении за подконтрольной партией СИ доступного объема (но не менее 10 шт.). Объектом исследования является информации о постепенных отказах СИ под которыми понимаются события, связанные с выполнением калибровок СИ. Особенность этого направления обоснования МПИ заключается в расчете гамма – процентного ресурса СИ по усеченным и цензурированным выборкам, когда еще не все подконтрольные объекты отказали.

В разделе 5.3 показано пять вариантов программ. Самой простой является программа МО-3, специально разработанная для оценки МПИ по статистическим данным региональных метрологических лабораторий. Если они будут располагать статистическими данными о проценте отказавших приборов за известный срок эксплуатации, то в первом приближении откорректированный МПИ можно оценить с помощью гамма – процентного ресурса. Программа расчета этого показателя базируется на проверенной гипотезе о том, что износовые отказы обычно подчиняются распределению Вейбулла с показателем формы $b = 2$ (т.е. распределению Релея) у которого интенсивность отказа имеет линейную функцию [37]. В разделе 5-3 также дана программа расчета МПИ по статистическим данным о двух сроках поверки.

Следующий вариант обоснования МПИ относится к схеме на рисунке 5-6, когда под наблюдение одновременно ставится группа из N образцов, которая через заранее установленные промежутки времени подвергается одновременной поверке с регистрацией отказавших изделий. За время испытаний могут выйти из строя не все, а только часть изделий. Для этого варианта разработана программа МО-6. Схема наблюдения по третьему варианту показана на рис. 5-7, когда также одновременно берутся под наблюдение N объектов на заданный период времени (программа МО-7). От предыдущего варианта этот вариант отличается тем, что случайная наработка до отказов фиксируется в момент их возникновения, а не при одновременной поверке всех изделий.

Четвертый и пятый варианты организации испытаний позволяет решать еще более сложную задачу, когда кроме информации об отказах удается получить сведения о случайных наработках пока еще не отказавших изделий на момент завершения испытаний. Этот вариант соответствует схеме на рис. 5-8 и с точки зрения классификации алгоритмов расчета он относится к анализу так называемых цензурированных выборок по программам МО-8 и МО-9. Различие этих двух программ состоит только

в способе расчета функций распределения вероятности безотказной работы – по точкам иди интервалам.

Указанные программы (МО-6 …МО-9) базируются на общем алгоритме расчетов, который состоят из двух этапов (не считая этапа ввода первичной информации). Первый этап заключается в образовании эмпирического распределения вероятности безотказной работы (ВБР) усеченного или цензурированного вида. На втором этапе полученное эмпирическое распределение используется для расчета параметров нескольких теоретических распределений по одинаковым программам. На фрагментах этих программ показаны следующие двухпараметрические законы: Вейбулла, логнормальное, нормальное, равномерное и особое суперпозиционное распределения постепенных (износовых) и внезапных отказов. После проверки согласия эмпирических и теоретических распределений выполнятся расчеты гамма – процентных МПИ для закона с наибольшим коэффициентом корреляции.

Программы моделирования трендов. Наибольшего доверия заслуживает метод моделирования трендов деградации погрешности на основании эксплуатационных или ускоренных испытаний подконтрольной партии приборов. В разделе 5.4 даны алгоритмы и программы решения этой задачи при ограниченном объеме выборки образцов (от 3 до 5 шт.). Особое внимание надо обратить на первый этап испытаний (программа МО-4) в виде первичной поверки с целью образования однородной выборки образцов для допуска к дальнейшим ресурсным испытаниям (периодическим поверкам). Кроме того, этот этап необходим и для входного контроля качества исследуемого СИ путем корректной оценки ЗМН по результатам расчета СКО. Целью второго этапа испытаний является расчет срока поверки СИ при нормативных ЗМН и соответствующих вероятностях β. В основе методики лежат методы корреляционного анализа зависимости погрешности или ЗМН от времени или от объема работы.

Для получения исходных данных необходимо выполнять периодические измерения через заданные промежутки времени путем организации ускоренных или эксплуатационных испытаний (наблюдений) партии однотипных СИ, подготовленной с помощью программы МО-4. В алгоритмах программы МО-5 используется два варианта образования трендов погрешности во времени - по средним точкам и по рассыпанным точкам на основе методов линейной регрессии.

Рассмотренный в разделе 4.2.4 пример позволяет поставить вопрос о нормировании неравномерной шкалы МПИ в зависимости от наработки СИ некоторых типов. Кроме того, рекомендуется ввести в действие право корректировать МПИ на основании расчета остаточного ресурса после юстировки, что соответствует принципам международных метрологических требований [2,46].

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Навигатор по разделам монографии *6*

1.1. Введение **6**

1.2. Содержание второй главы **7**

1.3. Содержание третьей главы **8**

1.4. Содержание четвертой главы **10**

Нормирование предела погрешности и ЗМН 10
Обеспечение достоверности оценки ЗМН 11
Поверка весов. 11
Поверка твердомеров 11
Пакетный анализ результатов поверки девяти приборов 12
Особенности предлагаемой системы периодических поверок и калибровок СИ 12
Алгоритмы для первичных поверок приборов 13
Алгоритмы для периодических поверок приборов 14
Программа ЭИ-4 для ведения паспорта контроля надежности СИ. 15

1.5. Содержание пятой главы **16**

2. Общая часть монографии *20*

2.1. Актуальность проблемы **20**

2.1.1. Опыт эксплуатации 20
2.1.2. Международные требования 20
2.1.3. Постановка задачи 21

2.2. Основные понятия **22**

2.2.1. Погрешность 23
2.2.2. Выборки случайных величин 24
2.2.3. Характеристики выборки измерений погрешности 25
2.2.4. Законы распределения вероятностей 28
2.2.5. Неопределенность измерений и доверительные границы 36

2.3. Программное обеспечение **40**

2.3.1. Общая информация 40
2.3.2. Редакторы EXCEL и MathCAD 41
2.3.3. Прочее программное обеспечение 43

3. Методы расчета характеристик рассеяния измерений *44*

3.1. Стандартный расчет характеристик выборки случайных величин **44**

3.1.1. Предисловие 44
3.1.2. Образование выборки 46
3.1.3. Расчет средней арифметической величины, стандартного отклонения и размаха 47
3.1.4. Определение и проверка согласия эмпирического и теоретических законов распределения 48
3.1.5. Проверка выборки на отсев с учетом правила трех сигм и «ящика с усами» 51
3.1.6. Корректировка выборки и пересчет параметров (при необходимости) 56
3.1.7. Оценка доверительных границ и неопределенности выборки 56

3.2. Анализ факторов, влияющих на достоверность оценки характеристик выборки случайных величин **64**

3.2.1. Предисловие 64
3.2.2. Влияние объема и дисперсии выборки на достоверность оценки доверительных границ 64
3.2.3. Влияние объема и дисперсии выборки на выбор закона распределения 70
3.2.4. Основные законы распределений, принятые для контроля метрологической надежности СИ 74

3.3. Обзор методов оценки метрологических характеристик при поверках средств измерений **76**

3.3.1. Требования к условиям проведения поверок 76
3.3.2. Требования к методам оценки погрешности измерений 78
3.3.3. Методы оценки сходимости измерений весов 80
3.3.4. Пример поверки термометров сопротивления на основе оценки неопределенности измерений 86

4. Оценка метрологической надежности средств измерений *90*

4.1. Запас метрологической надежности 90
4.1.1. Обоснование критерия 90
4.1.2. Обоснование применения нормального закона 92
4.1.3. Нормирование запаса метрологической надежности 95
4.1.4. Повышение достоверности оценки ЗМН 97

4.2. Примеры оценки метрологической надежности СИ 99
4.2.1. Предисловие 99
4.2.2. Определение систематической погрешности эталонной гири 99
4.2.3. Оценка метрологической надежности твердомеров 105
4.2.4. Сравнительная оценка метрологической надежности девяти однотипных приборов 112

4.3. Алгоритмы контроля сходимости измерений при поверках СИ 121
4.3.1. Организационные проблемы поверок СИ 121
4.3.2. Алгоритмы для первичных поверок приборов 123
4.3.3. Алгоритмы для периодических поверок приборов 132

5. Алгоритмы обоснования межповерочных интервалов СИ 145

5.1. Общие положения 145
5.1.1. Назначение предлагаемых алгоритмов расчета МПИ 145
5.1.2. Особенности вероятностного подхода к расчету МПИ 146
5.1.3. Дополнительные термины и определения 148

5.2. Программы расчета завершенных выборок 150
5.2.1. Программы ЭО-1 и МО-1 для оценки математического ожидания МПИ 150
5.2.2. Программы ЭО-2 и МО-2 для оценки гамма – процентного МПИ 153

5.3. Программы расчета цензурированных выборок 158
5.3.1. Общие замечания 158
5.3.2. Программа МО-3 для корректировки МПИ по статистическим данным 161
5.3.3. Программа МО-6 для первого варианта наблюдений за группой приборов 164
5.3.4. Программа МО-7 для второго варианта наблюдений за группой приборов 169
5.3.5. Программа МО-8 для третьего варианта наблюдений за группой приборов 174
5.3.6. Программа МО-9 для обработки цензурированных выборок отказов большого объема 178

5.4. Программы моделирования трендов 183
5.4.1. Общие положения 183
5.4.2. Программа МО-4 для подготовки прогнозирования МПИ при ресурсных испытаниях СИ 186
5.4.3. Программа МО-5 для прогнозирования МПИ при ресурсных испытаниях 187

6. Литература 193

Леонид Владимирович Ефремов

Вероятностная оценка метрологической надежности
средств измерений: алгоритмы и программы

Подписано в печать 16.09.2011. Формат 70x100/16
Бумага офсетная. Печать офсетная
Усл.-печ. л. 12,5. Заказ № 2368
Тираж 200 экз.

Издательство «Нестор-История»
197110 СПб., Петрозаводская ул., д. 7
Тел. (812) 235-15-86
e-mail: nestor_historia@list.ru
www.rossica.su

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии «Нестор-История»
198095 СПб., ул. Розенштейна, д. 21
Тел. (812)622-01-23

ЕФРЕМОВ

Леонид Владимирович,

профессор, доктор технических наук.
Родился в 1936 г. в г. Ленинграде.

Специалист в области надежности и диагностики машин и приборов.

Автор более 210 научных трудов: монографий, статей, изобретений.

Сайт автора levlefre.narod.ru