

**Г.А.КОНДРАШКОВА
И.В.БОНДАРЕНКОВА
А.В.ЧЕРНИКОВА**

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ

Учебное пособие



**Санкт-Петербург
2017**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА»**

ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ

Г.А.Кондрашкова, И.В.Бондаренкова, А.В.Черникова

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ

Учебное пособие

**Санкт-Петербург
2017**

УДК 681.3(075)

ББК 30.10я7

К 642

КОНДРАШКОВА Г.А., БОНДАРЕНКОВА И.В., ЧЕРНИКОВА А.В.

Метрологический анализ систем измерения и управления: учебное пособие / ВШТЭ СПбГУПТД. СПб., 2017. – 134 с.: ил. 10. – ISBN 978-5-91646-127-5

В настоящем учебном пособии рассмотрены основные проблемы и задачи метрологического обеспечения систем измерения и управления технологическими параметрами и их составляющих, возникающие перед разработчиками и пользователями в связи с действующими в настоящее время общероссийскими нормативными документами, регламентирующими общие требования и методы метрологического обеспечения измерительных систем.

Предназначено для магистрантов, обучающихся по направлению 15.04.04 «Автоматизация технологических процессов и производств», профиль подготовки «Системы автоматизации и управления технологическими процессами» и бакалавров, обучающихся по направлениям 27.03.04 «Управление в технических системах» и 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств».

Рецензенты: зав.кафедрой «Автоматизация процессов химической промышленности» ФГБОУВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технологический университет)», д-р техн.наук Л.А.Русинов;
главный метролог ООО «Адьютор», канд.техн.наук Г.А.Кнодель

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

ISBN 978-5-91646-127-5

© Кондрашкова Г.А., Бондаренкова И.В., Черникова А.В., 2017

© Высшая школа технологии и энергетики, 2017

ОСНОВНЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

ВВВ – внешние влияющие величины;
ВК – вычислительные комплексы;
В и УК – вычислительные и управляющие комплексы;
ВУ – вычислительные устройства;
ГСИ – государственная система обеспечения единства измерений;
ИИС – информационно-измерительные системы;
ИК – измерительный канал;
ИМ – исполнительный механизм;
КСА – комплекс средств автоматизации;
МА – метрологическая аттестация;
МКМВ – Международный комитет мер и весов;
МВИ – методика выполнения измерений;
МО – метрологическое обеспечение;
МПИ – межповерочные интервалы;
МХ – метрологические характеристики;
МЭ – метрологическая экспертиза;
НД – нормативные документы;
ОП – определяющая погрешность;
ПМА – программа метрологической аттестации;
РД – рабочая документация;
СА – средства автоматизации;
САМИ – система автоматизации метрологических исследований;
СИ – средство измерений;
СКО – среднее квадратическое отклонение;
ТЗ – техническое задание;
ТОУ – технологический объект управления;
ТП – технический проект;
ТС – технические средства;
УВК – управляющий вычислительный комплекс;
УК – управляющие каналы;
ЦБП – целлюлозно-бумажная промышленность.

ВВЕДЕНИЕ

Еще в середине прошлого века Н.Винер – отец кибернетики – полагал, что управление – суть преобразования информации. В настоящее время в известной триаде «вещество-энергия-информация» ведущую роль играет информация. В этой связи все большее значение приобретает полная, объективная и достоверная измерительная информация о явлениях, процессах и объектах в науке и технике, включая экологические задачи и социальные проблемы. И ею же определяется эффективность управления.

Для обеспечения качества измерений в технологических процессах при контроле и управлении технологическими параметрами необходимо осуществлять метрологический анализ всех аспектов измерительных процедур. А именно, задачи, решаемые методами метрологии (и родственных наук), касаются следующих аспектов: формирование необходимого перечня измеряемых величин и диапазона их допускаемых погрешностей, при этом осуществляется формирование априорной или апостериорной модели объекта; выявление возможного взаимодействия параметров объекта, связанных с искомыми физическими величинами; выбор аппаратных и программных средств по метрологическим характеристикам и их сопряжения с объектами контроля и управления; поверка и калибровка средств и систем измерений и изучение внешних влияющих факторов и помех; уточнение планируемых алгоритмов

обработки данных и вычисление показателей достоверности в системах контроля, измерения и управления; выявление проблем метрологической надежности и анализ способов ее поддержания.

При анализе отдельных этапов измерений и решении соответствующих задач преобразования информации используется формальный аппарат, который разработан в теоретической и прикладной метрологии для уточнения соотношений измерений и других познавательных процедур.

Под этим аппаратом подразумевается метрологическое обеспечение систем контроля, измерения и управления, под которым понимается применение научных, методологических, технических и методических разработок, необходимых для достижения единства измерений и требуемой погрешности результатов измерений, т.е. необходимого качества измерений.

Такой подход на практике рекомендуется осуществлять в соответствии с известными международными и отечественными стандартами по выбору методов, методик и средств измерений, а также сертификацией изделий и услуг в сфере обеспечения качества измерений. Кратко основные формальные аспекты метрологического обеспечения систем измерения представлены на рис.В1, а функции измерений – на рис.В2.

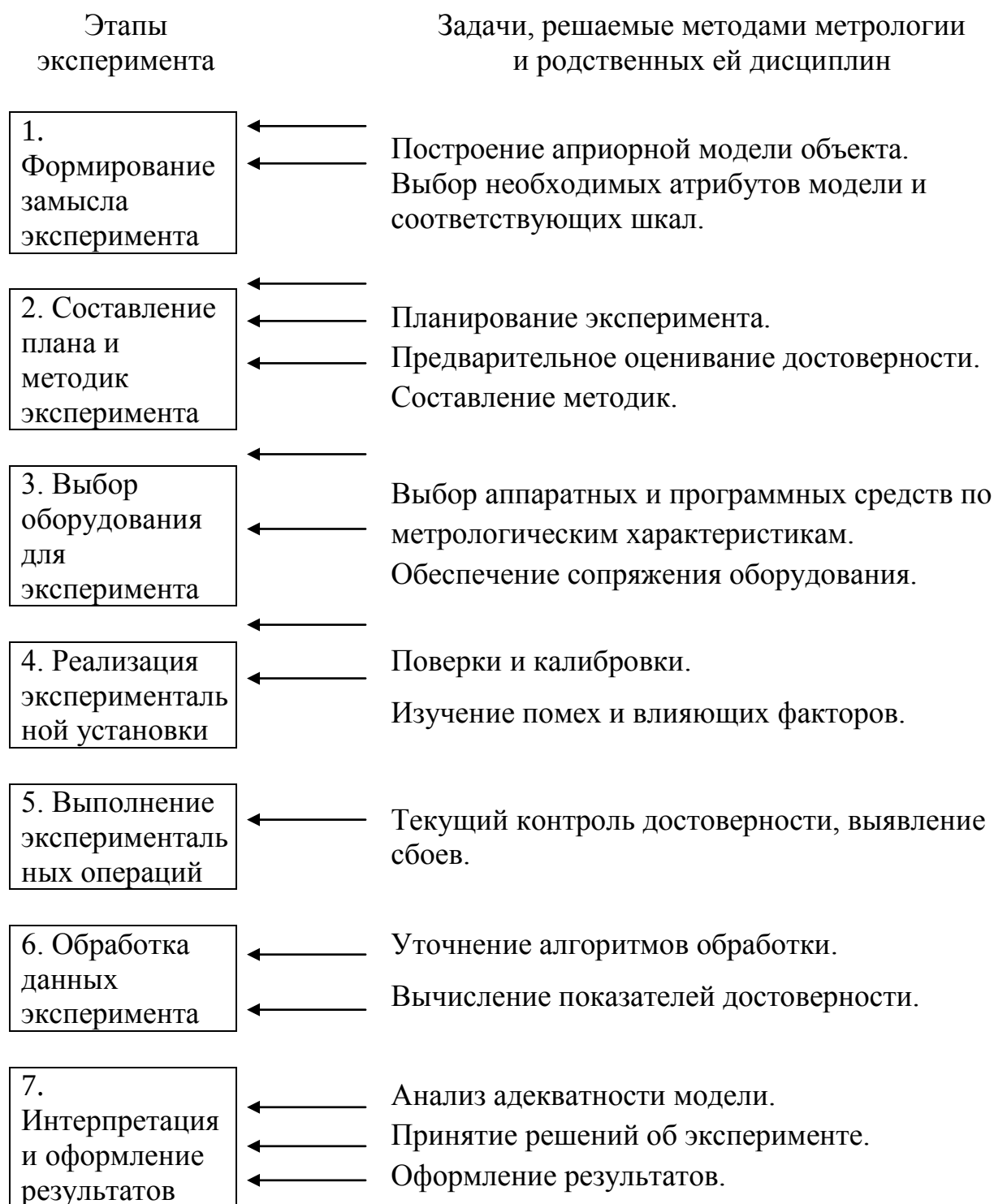


Рис.В1. Вклад метрологии и родственных ей дисциплин в процесс подготовки и выполнения эксперимента



Рис.В2. Перечень функций измерения

Глава 1. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

1.1. Основы анализа состояния измерений, контроля и испытаний на технологических производствах

К средствам контроля на технологических производствах можно отнести как отдельные средства измерений, так и сложные измерительные устройства и информационные измерительные системы. Эти средства изготавливаются на заводах или предприятиях-изготовителях и изначально проходят все этапы метрологического обеспечения метрологическими службами этих организаций. Они подвергаются процедурам градуировки, поверки или калибровки, государственным и ведомственным испытаниям на утверждение типа обязательной или добровольной сертификации, а для испытательного оборудования – также метрологической аттестации.

В дальнейшем, при эксплуатации средств контроля на предприятиях, производятся анализ состояния измерений, контроля и испытаний с целью установления соответствия достигнутого уровня метрологического обеспечения определенным требованиям и разработка предложений по его улучшению.

При разработке документированной процедуры, регламентирующей проведение метрологического анализа, целесообразно руководствоваться требованиями национальных стандартов:

- ГОСТ Р 8.563-2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Методики (методы) измерений;
- ГОСТ Р 8.568-97 ГСИ. Аттестация испытательного оборудования. Основные положения;
- ГОСТ Р 51000.4-96. Система аккредитации в Российской Федерации. Общие требования к аккредитации испытательных лабораторий.
- МИ 2240-98 ГСИ. Анализ состояния измерений, контроля и испытаний на предприятии, в организации, объединении. Методика и порядок проведения работ;

- МИ 2386-96 ГСИ. Анализ измерений, контроля и испытаний в центрах (лабораториях), осуществляющих сертификацию продукции и услуг. Методика проведения работы;
- МИ 2427-97 ГСИ. Оценка состояния измерений в испытательных и измерительных лабораториях;
- МИ 2304-94 ГСИ. Метрологический контроль и надзор, осуществляемые метрологическими службами юридических лиц.

Целью метрологического анализа состояния измерений, контроля и испытаний является установление соответствия выполнения измерений требованиям законодательства Российской Федерации в области обеспечения единства измерений.

В процессе анализа определяют:

- степень влияния состояния измерений, контроля и испытаний на основные технико-экономические показатели деятельности предприятия;
- наличие в подразделениях предприятия необходимых документов ГСИ и другой нормативной документации, отражающих требования к контрольно-измерительной аппаратуре;
- степень использования на предприятии государственных и других стандартов, отражающих требования к обеспечению единства и необходимой точности измерений, испытаний и контроля;
- оснащенность предприятия современной контрольно-измерительной аппаратурой и потребность в ней;
- эффективность использования контрольно-измерительной аппаратуры, а также имеющихся средств поверки и калибровки;
- организационную структуру и состояние деятельности метрологической службы предприятия;
- состояние аттестации, унификации и стандартизации применяемых методик выполнения измерения, испытания и контроля;

- техническое и метрологическое состояние применяемой контрольно-измерительной аппаратуры, обеспеченность ее ремонтом, поверкой, калибровкой;
- состояние и эффективность работ по проведению метрологической экспертизы документации предприятия;
- потребность предприятия в государственных стандартах и справочных данных о свойствах веществ и материалов, необходимых для обеспечения качества продукции;
- потребность предприятия в специалистах-метрологах.

Работа по оценке состояния измерений, испытаний и контроля проводится под руководством метрологической службы федерального органа исполнительной власти, юридических лиц (их объединений) с участием специалистов технических служб предприятия (организации), в составе которого функционирует лаборатория, при необходимости с привлечением представителей государственной метрологической службы.

Для проведения оценки состояния измерений готовятся материалы, в которых должны быть отражены следующие сведения:

- набор нормативных документов на выполняемые виды работ, используемые объекты и измеряемые (контролируемые) параметры этих объектов;
- перечень документов на МВИ и методы испытаний (в том числе государственные и отраслевые стандарты);
- информация о состоянии МВИ;
- данные о применяемых средствах измерений и испытательном оборудовании;
- оснащенность лаборатории стандартными образцами всех категорий;
- данные о составе и квалификации кадров, включая действующие формы повышения квалификации;
- справка о состоянии производственных помещений.

При оценке состояния измерений проверяют:

- положение о метрологическом подразделении, определяющее его функции, права, обязанности, ответственность, взаимодействие с другими подразделениями организации (если оно является юридическим лицом) и другими организациями;
- планы (графики) отмены или пересмотра документов на МВИ, не удовлетворяющих требованиям ГОСТ Р 8.563-96, и проведение аттестации, если она требуется;
- наличие требуемых средств измерений, в том числе стандартных образцов всех категорий, обеспечивающих проведение измерений, а также наличие испытательного и вспомогательного оборудования, реактивов и материалов требуемого качества;
- должностные инструкции, утвержденные в установленном порядке;
- оснащенность всех стадий производства продукции контрольно-измерительной аппаратурой, удовлетворяющей установленным в документации требованиям к точности измерений;
- обеспеченность контролем (измерениями) содержания вредных веществ в выбросах в атмосферу, стоках и почве в целях охраны окружающей среды;
- состояние актуализированного фонда нормативных документов.

В результате такой проверки документации выявляется взаимосвязь требований точности контроля основных параметров с качеством выпускаемой продукции, системой учета материальных ресурсов.

При проведении анализа действующей документации должны быть рассмотрены:

- оптимальность номенклатуры измеряемых параметров;
- наличие установленных норм точности измерений;
- оценка возможности проведения измерений с требуемой точностью;

- установление соответствия показателей точности измерений (испытаний) требованиям эффективности производства и достоверности контроля, а также стандартизованные способы выражения точности измерений (испытаний);
- достоверность нормируемого метода оценки результатов измерений, контроля и испытаний;
- уровень унификации и стандартизации МВИ;
- оценка правильности выбора МВИ, контроля и испытаний и соответствие требованиям документов, регламентирующих методики, а также оценка правильности выбора средств измерений, стандартных образцов состава и свойств вещества и материалов, реагентов, испытательного оборудования;
- выявление требований к измерениям, контролю и испытаниям, определяющих потребительские и другие свойства продукции;
- соответствие регламентируемых в документации требований к производительности методик и СИ;
- установление достоверности и правильности применения данных о физических константах и свойствах веществ и материалов.

По результатам оценки состояния измерений составляется акт, который доводится до сведения руководителя лаборатории и представляется в организацию, ответственную за проведение анализа состояния измерений. При необходимости сведения могут быть представлены в территориальный центр стандартизации, метрологии и сертификации.

В зависимости от целей работы и выявленного состояния измерений в лаборатории в акте делают вывод о наличии (отсутствии) условий для выполнения измерений в закрепленной за лабораторией области деятельности.

Решение об отсутствии условий для выполнения измерений принимают в случае, если выявлены грубейшие нарушения:

- несоответствие используемой методики контролируемому объекту;
- нарушение правил аттестации МВИ, установленных национальным стандартом ГОСТ Р 8.563-96;
- неправильность использования средств измерений, МВИ и методов испытаний для стандартных образцов;
- систематическое получение результатов испытаний и измерений с нарушением требований методик;
- отсутствие необходимых средств измерений, испытательного и вспомогательного оборудования, стандартных образцов, реактивов и материалов или несоответствие их установленным требованиям;
- недостаточная укомплектованность кадрами соответствующей квалификации;
- несоответствие помещений лаборатории установленным требованиям.

При фиксации в акте наличия условий для выполнения измерений в закрепленной за лабораторией области деятельности оформляется «Свидетельство о состоянии измерений в лаборатории» и в течение месяца оно направляется в лабораторию.

По результатам всех материалов анализа состояния измерений, контроля и испытаний на предприятии подготавливаются предложения по улучшению метрологического обеспечения производства и мероприятия по их реализации.

1.2. Проблемы метрологического анализа систем измерения и контроля параметров технологических процессов

При анализе состояния измерений в таких сложных технологических процессах, как целлюлозно-бумажные, необходимо исследовать метрологические свойства последовательности измерительных операций, которые присущи измерительным процедурам для получения результата измерения технологических величин, таких как влажность, масса метра

квадратного, шероховатость бумажного полотна, облачность, концентрации древесной, целлюлозной, бумажной масс и т.п.

В цепочку измерительных процедур при этом должны быть включены методы, методики выполнения измерений и алгоритмы обработки наблюдений. Отсюда вытекает необходимость уделить существенное внимание метрологическому анализу технологического производства.

Метрологическое обеспечение целлюлозно-бумажного производства, включая системы контроля и управления, таких как отраслевая (ведомственная) система обеспечения качества измерений, в первую очередь поддерживающих единство и требуемую погрешность измерений, – в настоящее время отсутствует.

Во-первых, это связано с разрушением отраслевой метрологической службы целлюлозно-бумажной промышленности России, во-вторых, с преобладающим числом целлюлозно-бумажных производств, руководимых иностранным капиталом, в-третьих, проблемами, которые возникли на уровне Государственной метрологической службы (например, введение закона о техническом регулировании, ликвидация Российского комитета по стандартизации и др.).

Действительно, достаточно проанализировать последовательность измерительных процедур, которые осуществляются при определении измерительных величин:

1. Создание модели измеряемой величины.
2. Селекция (выявление информативной измеряемой величины в объекте наблюдения).
3. Первичное преобразование измеряемой величины в измерительный сигнал.
4. Последовательное преобразование измерительных сигналов, включая алгоритмы их обработки.
5. Сравнение измеряемой величины с мерой или шкалой.
6. Отображение результатов измерений и их погрешностей.

Для создания *модели измеряемой величины* необходимо:

- 1) выполнить анализ цели измерения, априорных данных об условиях измерения, исследуемой величине, объекте, требуемой точности;
- 2) произвести уточнение модели объекта исследования и физической величины;
- 3) определить изменения величины в рамках полученной модели исследуемого объекта;
- 4) формализовать измерительную задачу на основе принятой модели физической величины;
- 5) выбрать конкретные величины, на основе измерения которых будет находиться искомое значение измеряемой величины;
- 6) установить зависимости между измеряемой и непосредственно наблюдаемыми на опыте величинами.

Взаимодействие исследуемого объекта и средства измерений предполагает поиск, обнаружение и восприятие (рецепцию) измеряемой физической (особенно технологической) величины, а также, при необходимости, некоторые подготовительные операции типа пробоотбора и пробоподготовки, воздействия на объект для получения отклика, определения ориентации и локализации датчиков в пространстве и времени.

Различение, или селекция сигнала измерительной информации подразумевает выделение именно того свойства объекта, которому соответствует измеряемая физическая величина, включая выделение полезного сигнала на фоне шумов с использованием методов и средств борьбы с помехами.

Преобразование включает в себя изменение физической природы носителя информации или его формы (усиление, ослабление, модуляция, манипуляция, дискретизация и квантование, аналого-цифровое и цифро-аналоговое преобразования, кодирование и декодирование и др.), а также передачу сигналов измерительной информации по каналам связи и, при необходимости, запись, хранение и воспроизведение их в устройствах памяти.

Сравнение с мерой может осуществляться как непосредственно, так и опосредованно – с помощью шкалы или через какой-либо физический или технический механизм. (Обобщением этой операции является информационное сравнение с образом).

Отображение результатов измерений предполагает обработку данных по выбранному алгоритму, оценку погрешностей измерения, индикацию результатов на цифровом табло, стрелочном приборе, самописце, распечатку или графическое представление, использование их в системах автоматического управления, семантический анализ (оценку) полученных результатов, идентификацию, структурирование и передачу в базы данных и знаний систем искусственного интеллекта.

Важным аспектом при проведении процедуры измерений является использование *априорной* и *апостериорной информации*. При этом под *априорной информацией* понимаются выбранные модели объекта, условий, методы и средства измерений, тип измерительной шкалы. Варианты использования *апостериорной информации* включают в себя уточнение используемых моделей, распознавание образов или их идентификацию, отнесение к классам эквивалентности, структуризацию для пополнения баз данных и знаний, а также подготовку к принятию решений.

При постановке технологических измерений особые трудности возникают при селекции и восприятии измерительной информации. Это связано с тем, что в кадастре (перечне) измеряемых величин, характерных для технологических процессов, встречаются разнообразные и специфичные технологические параметры. В основном это измерения различных специальных физико-химических свойств и составов веществ при той или иной технологии переработки исходных материалов в промежуточные или конечные продукты производства, сопровождающиеся большим количеством внешних входных (по отношению к процессу) и внутренних (в самом процессе) влияющих факторов. К последним относятся характеристики исходных материалов, условия, при которых они находятся, режимы работы

технологического оборудования, влияния пространственных физических полей, неоднородности физико-химического состава материалов и физико-химических процессов переработки в химических аппаратах и многое другое.

При исследовании способности наблюдать за объектами и управлять ими необходимо их изучение с целью определения адекватности описания объектов исследования конечным множеством измеряемых величин. Поэтому измерению технологических и других сложных величин предшествует изучение объекта измерения как будущего источника измерительной информации с целью построения математической модели измеряемого процесса, выбора информативного параметра измерительного сигнала, его селекции и восприятия с помощью средств измерения. Это изучение осуществляют с помощью идентификации, которая является весьма распространенной информационной процедурой, направленной на опознавание физических явлений или объектов, выявление и анализ их общих и частных закономерностей и особенностей.

Исследователь, обладая определенным тезаурусом логически упорядоченных знаний и конкретными априорными сведениями об исследуемом физическом процессе, как объекте измерения, относит его к некоторой классификационной группе процессов. Затем, исследуя (измеряя) его важные особенности, определяет, с какой разновидностью процессов он идентичен. При этом с определенной достоверностью находят вид математической модели процесса, функции изменения во времени и в пространстве его основных величин.

Так как физические процессы в технологических производствах характеризуются большим числом величин, изменяющихся по различным законам во времени и в пространстве, их нелегко изучить и измерить. Изучение с целью идентификации выливается в этап научных измерительных экспериментов, в которых методом приближения осуществляется правильное опознавание и идентификация изучаемых

объектов. Таким образом, процедуры идентификации тесно связаны и перемежаются с процедурами измерений.

Различают идентификацию двух типов: активную, при которой объект подвергается воздействию испытательных сигналов с последующим измерением и анализом его реакции; пассивную, когда измерению и исследованию подвергаются только входные и выходные сигналы объекта при нормальном его функционировании. При этом проведение измерительных экспериментов должно планироваться в соответствии с теорией планирования экспериментов [1], в которой также предусматриваются процедуры активных (если объект управляем) и пассивных экспериментов.

При проведении эксперимента должна обеспечиваться воспроизводимость его результатов, что требует определенной точности его осуществления с помощью используемых измерительных устройств. Часто до опыта неизвестны требования к воспроизводимости результатов экспериментов, и она должна быть получена методом проб и ошибок. Действительно, полностью управляемых объектов нет, поэтому даже при активных экспериментах (которые дают большую и удобную для анализа измерительную информацию) на объект действуют неуправляемые, дестабилизирующие факторы, которые приводят к диффузности управляемых и измеряемых его свойств. Эта диффузность свойств объекта может приводить к получению невоспроизводимых результатов экспериментов при одних и тех же условиях их проведения (по управляемым воздействиям). Обработка данных экспериментов [1] может помочь выявить диффузность свойств объекта, которая сама по себе является предметом исследования в целях идентификации объекта как объекта измерения с помощью измеряемых величин и их математических зависимостей от его свойств (задача составления информационного портрета объекта по конечному множеству измеряемых величин) [2].

При обработке данных наблюдений, полученных в результате пассивного или активного научного измерительного эксперимента, получают разброс средних и среднеквадратических значений (после исключения промахов и проверки однородности групп наблюдений) результатов измерений наблюдаемых величин. Как определить, чем вызвана их невоспроизводимость? Для этого рекомендуется оценить результирующую погрешность средств измерения с учетом всех ее составляющих по правилам, рекомендованным в метрологии, и представить результаты измерений и полосу их неопределенностей из-за инструментальных и методических погрешностей измерений $\delta_{\text{изм}}$. Далее следует эту неопределенность, вызванную погрешностью средств измерения, сравнить с неопределенностью результатов эксперимента $\delta_{\text{экс}}$. При этом возможны два случая:

- 1) если $\delta_{\text{изм}} \ll \delta_{\text{экс}}$, то разброс наблюдений связан со свойствами объекта, и необходимо найти те свойства, которое приводят к диффузности наблюдаемой величины, предварительно оценив ее, например, энтропийными значениями неопределенности;
- 2) если $\delta_{\text{изм}} \approx \delta_{\text{экс}}$, то суждения о свойствах объекта можно иметь с погрешностью не лучшей, чем $\delta_{\text{изм}} \sqrt{2}$, так как при независимых величинах погрешности средства измерения и невоспроизводимости объекта исследования они складываются.

Исследования объектов проводятся последовательно. Сначала почти полностью отсутствуют априорные данные об объекте, и задача состоит в определении вида физического процесса, его математической модели и значений параметров. Это осуществляется с помощью измерений при эксперименте, анализа результатов, выбора измерений и средств измерений для последующего эксперимента. Затем начинается следующий этап измерительного эксперимента и идентификации, когда предварительно известен характер или разновидность математической модели и требуется

определение значений ее параметров. В заключение решают вопросы о целесообразности измерения той или иной совокупности измеряемых величин для наблюдаемости (или управляемости) объекта и о требуемой точности измерения каждой из наблюдаемых величин.

При постановке технологических измерений часто наблюдаемость объектов можно обеспечить, используя не только детерминированные или стохастические математические модели, но и адаптивные, которые позволяют учесть изменение свойств объектов при измерении их параметров и внешних воздействий в процессе наблюдения. После проведения научных измерительных экспериментов и идентификации свойств объектов выбор измеряемых величин, их селекции и восприятия часто остается неразрешимым из-за отсутствия достаточно удовлетворительных по метрологическим характеристикам технических средств измерений. Действительно, при проведении эксперимента правомерно пользоваться лабораторными приборами и установками или проводить лабораторные анализы для получения результатов наблюдений. Когда необходимо техническое осуществление оперативного или автоматического контроля и управления, должно быть найдено решение, какими рабочими средствами измерения могут быть заменены лабораторные приборы.

При исследовании технологических объектов измерения важное значение приобретает рациональный выбор информативного параметра – сигнала измерительной информации (для прямых, косвенных или совместных измерений) с точки зрения технической возможности его измерения, анализа функциональной зависимости между искомой и информативной величинами, определения изменений информативного параметра по координате пространства физического поля в исследуемом объекте и его диффузности по пространству и во времени, а также трудности селекции и восприятия в конкретном объекте с помощью обсуждаемых технических средств измерения. Этот выбор должен исходить

из следующих соображений: после исключения информативных параметров, которые не могут быть измерены традиционными и новейшими средствами измерения, предпочтение должно быть отдано тем, функциональная зависимость с искомыми величинами у которых наиболее определенная, стабильная и наименее диффузная по входящим в нее параметрам.

Далее следует проанализировать изменения информативного параметра по пространству объекта с целью выбора точек контроля. Этот анализ должен производиться из тех же соображений, что и при дискретизации измеряемой функции для последующего её восстановления [3, 4]. Главная трудность при этом заключается в получении правильной исходной информации об изменении информативного параметра по координатам пространственных полей объекта и о диффузности его в предполагаемых точках контроля. При наличии такой информации определяют одним из рассмотренных в [3] способов расстояние между контрольными точками $\Delta l_{\max}$, а в каждой точке оценивают диффузность наблюдаемого информативного параметра для выработки требований к метрологическим параметрам технических средств измерения.

Диффузность информативного параметра X рекомендуется представлять энтропийным интервалом неопределенности ΔX [4]. Тогда погрешность прибора должна быть меньше интервала неопределенности в 5-7 раз для представления информативного параметра в виде некоторой гистограммы его распределения. В крайнем случае, энтропийная погрешность технических средств измерения не должна превышать энтропийного интервала неопределенности информативного параметра.

При выборе быстродействия и допустимого потребления необходимо руководствоваться соотношениями между энергией и информацией, в зависимости от того, что представляет информативный параметр: интенсивность (амплитуду), фазу или частоту [3 – 5].

Наконец, но не в последнюю очередь, должен быть решен вопрос о селекции и восприятии измеряемой величины. Рассмотрим пример: при необходимости измерения расхода и температуры потока вещества в трубопроводе следует учитывать, что расход – величина, характеризующая направленное движение вещества, а температура – величина, характеризующая среднестатистическую скорость движения вещества. Очевидны влияние одной величины на другую и трудности, связанные с достижением избирательности первичных измерительных преобразователей расхода и температуры при восприятии этих величин. Например, в тепловых расходомерах приходится учитывать температуру вещества установкой дополнительного температурного преобразователя для исключения влияния температуры на измерение расхода, а при измерении температуры, наоборот, исключается влияние скорости потока вещества, например, с помощью тормозных камер [6].

Так как селекция и восприятие являются наиболее индивидуальными операциями в измерительной цепи, они еще не имеют достаточно общей систематизации в теории измерений. Практические рекомендации для восприятия тех или иных величин приводятся в отдельных работах, посвященных конкретным измерениям, и связываются с минимизацией погрешностей при установке средств измерения в объект (например, так формулируются правила установки преобразователей температуры в трубопроводах [6]). Они рассмотрены в главах, посвященных измерению конкретных величин.

Совершенствование технологических измерений принципиально возможно двумя путями: улучшением методологии самих измерений и средств измерений. Причем повышения качества измерений и средств измерений добиваются уменьшением погрешностей двумя способами: предотвращением возникновения определенных погрешностей и снижением влияния существующих погрешностей.

Рассмотрим способы улучшения методологии технологических измерений.

- Для предотвращения возникновения погрешностей при измерении технологических величин, как правило, вызванных влиянием неинформативных параметров входных величин, необходимо предусмотреть конструктивно-технологические и защитно-предохранительные способы уменьшения этих влияний. Такие способы достаточно сложны и трудоемки. Примерами их являются: технологические способы стабилизации скорости перемещения вещества в трубопроводе или создание буферных емкостей при измерении концентрации волокнистых суспензий (массы); применение термоизолирующих защитных покрытий трубопроводов в месте установки датчиков температуры; обеспечение с помощью прямых участков трубопроводов ламинарного движения потока при установке расходомеров переменного перепада давлений и др. Для технологических измерений возможности этих способов используются недостаточно, хотя в ряде случаев они могут улучшить качество измерений.
- Для снижения влияния существующих погрешностей при измерениях технологических величин используются методические, структурные, алгоритмические и кибернетические способы. Технологические измерения стремятся полностью автоматизировать, поэтому перечисленные способы проанализируем применительно к измерительным операциям, которые выполняются автоматически.

Методическими способы названы условно, по аналогии с известными методами измерительных преобразований [7].

При выявлении информативных величин для технологических измерений перспективно использовать метод уравнивающего преобразования. Это значит, что измерению подлежит не полное значение технологической величины, а ее изменение по сравнению с аналогичной, выявленной в объекте или созданной искусственно в виде условной меры

(условного рабочего эталона). Особенно эффективно использовать первую возможность, поскольку в целом ряде случаев аналогичная величина, присущая объекту, обладает теми же неинформативными параметрами, к уменьшению влияния которых и стремятся при измерениях. Этим способом пользуются при постановке технических измерений технологических величин, но, по-видимому, не так широко, как он того заслуживает.

Действительно, во многих случаях технологические измерения проводят с целью контроля при стабилизации технологических величин. Отличие процедур контроля от измерения заключается в том [7], что контроль базируется на измерении, но результатом его может служить только качественная оценка величины при большом количестве априорной информации о ней и стабилизации ее с помощью технологического процесса. Кроме того, контроль, как правило, осуществляется измерением в узком диапазоне значений технологических величин.

Технологические измерения в большинстве случаев осуществляются не для правильной оценки результатов измерений, а для получения воспроизводимых или сходимых результатов контроля. Технологический контроль позволяет стабилизировать параметры технологических процессов и качество выпускаемой продукции.

Примерами такого способа по улучшению технологических измерений являются измерения разностных параметров полотна при его переработке, определение разностных значений влажности в процессе формирования полотна на бумагоделательных машинах, определение концентраций щелоков по перепаду температуры при измерении температурной депрессии черного щелока, измерения дифференциальной электропроводности щелоков и др. Во всех примерах уравнивающей величиной, по сравнению с которой определяется изменение информативного параметра, используется величина, выделенная из объекта. Она характеризует первоначальное значение информативного параметра и, по возможности, должна обладать аналогичными информативными

свойствами. Например, при измерении разностной влажности для контроля ее изменения вдоль БДМ влажность измеряют в одной и той же точке на бумажном полотне (вычитание сигналов ведется с учетом транспортного запаздывания одного сигнала по отношению к другому), которой присущ конкретный структурный, фракционный, композиционный состав, толщина и масса 1 м^2 . Эти факторы из дестабилизирующих измерения переходят в разряд скомпенсированных (хотя бы до уровня идентичности их восприятия обоими датчиками влагомеров).

В технологических измерениях часто в качестве уравнивающей величины применяют меры (или условные рабочие эталоны). Так, при измерении влажности и массы 1 м^2 полотна измерительный сигнал сравнивается с уравнивающим, образованным специальным устройством и представляющим номинальное значение влажности или массы 1 м^2 , а их разности показывают отклонения от заданного номинального значения этих величин. Такой способ компенсации значительно хуже, так как не учитывает основные влияющие неинформативные факторы.

Поэтому при технологических измерениях необходимо стремиться к проведению разностных измерений путем сравнения двух величин, характерных для объекта измерений. Это позволяет наилучшим образом скомпенсировать разброс характеристик исходных материалов, которые часто являются главными неинформативными величинами, приводящими к значительной недостоверности технологических измерений. Если удастся при измерении входных и выходных величин объекта – технологического аппарата – выявить их разницу, связанную с получаемым качеством материала в этом аппарате, то цель контроля будет достигнута, несмотря на отсутствие полного и правильного представления о входной величине.

К *структурным* способам повышения качества технологических измерений относятся методы, связанные с автоматическим (или ручным) учетом поправок путем определения функционального влияния погрешностей из-за действия дестабилизирующих факторов. Это

определение осуществляется с помощью дополнительных средств измерения для нахождения значений влияющих факторов. Затем с учетом функциональной зависимости вводятся поправки в результат измерения информативного параметра.

Кроме того, при наличии меры (или образцового устройства) для информативного параметра можно осуществлять коррекцию (автоматически или вручную) погрешностей его измерения путем замещения измеряемой величины ее мерой. Значение этой меры может быть не равно значению измеряемой величины, но желательно либо близкое, либо переменное при проведении поверки для двух значений информативного параметра (или более при нелинейной зависимости функционального преобразования применяемого средства измерения). Если имеется переменная мера, то при замещении ею измеряемой величины добиваются совпадения результатов измерений, изменяя значение меры, и судят о правильности произведенных измерений с помощью использованного средства измерения. Полученное значение погрешности может быть учтено как поправка, которая используется для автоматической коррекции последующих измерений до момента очередной поверки по значению меры.

Так, при измерении технологических параметров (влажности, массы 1 м^2 , толщины, просвета и т. д.) поперек бумажного полотна сканирующее устройство периодически выводит датчики за пределы полотна, и производится операция поверки путем подключения на их вход образцовых значений измеряемых величин.

В информационно-измерительных системах используется периодическая поверка каналов преобразования информации по данным лабораторных анализов соответствующих величин. Часто измерение ответственных параметров резервируется или дублируется, и одно из средств измерения может служить условной мерой, например, при измерении расходов двумя приборами, основанными на одинаковом или разных принципах действия. Иногда применяют комплексированные

приборы для обеспечения метрологической надежности. *Комплексированными приборами* называются такие, из которых один обладает высоким классом точности, но ненадежен, второй – обладает высокой надежностью, но недостаточно точен. При их совместной эксплуатации данные второго прибора корректируются данными первого. Если же наступает отказ первого прибора, до момента его восстановления результат получают только с помощью второго прибора.

Структурная избыточность необходима для автоматизации технической диагностики метрологической исправности измерительных преобразований с целью выявления погрешности нестабильности средств измерения или прогрессирующих погрешностей измерений.

Таким образом, структурный способ улучшения измерений предполагает структурную избыточность при реализации измерений (но требует наличие дополнительных измерительных устройств) и позволяет существенно снизить систематические или прогрессирующие погрешности измерений технологических величин.

Для уменьшения случайных погрешностей при технологических измерениях можно использовать *алгоритмические* способы, основанные на правилах обработки многократных измерений, которые широко используются в метрологии и которые легко выполнить с помощью современных вычислительных средств в виде специальных алгоритмов обработки исходных данных наблюдений. В этом случае минимизация погрешностей осуществляется статистической обработкой результатов наблюдений и заключается в снижении предполагаемых, но необнаруженных случайных погрешностей. Она может производиться во время и после измерений.

Примерами алгоритмических способов статистической минимизации погрешностей могут служить: снижение случайных погрешностей путем временного или пространственного осреднения многократных, а при структурной избыточности – множественных измерений; фильтрация помех с

помощью аналоговых или цифровых фильтров; статистический анализ результатов измерений для выявления сбоев или отказов; статистическое уменьшение погрешностей квантования и др.

Все эти способы стали широко использоваться при полной автоматизации обработки результатов наблюдений на основе применения современных вычислительных устройств.

Одним из заслуживающих внимания направлений уменьшения погрешностей измерения алгоритмическим способом является использование известных математических моделей связи между технологическими параметрами для уточнения множественных наблюдений при совместных измерениях этих параметров. Проверка результатов позволяет исключить грубые погрешности и уточнить полученные данные, используя более качественную математическую модель. Например, если измеряемые величины связаны известными уравнениями материальных или энергетических балансов, то их значения должны соответствовать этим уравнениям. Тогда после измерения можно производить вычисления, уточняющие эти величины, например, по методу наименьших квадратов.

Другим важным приложением совокупности структурного и алгоритмического способов улучшения качества измерений служит внедрение многопараметрических измерений (в виде многопараметрических измерительных устройств), которые можно рассматривать как избыточные совместные. При этом за информативными параметрами наблюдают с целью вычисления неизвестных и не подлежащих прямому измерению технологических величин. Уравнения связи между измеряемыми аргументами и определяемыми величинами, как правило, носят стохастический характер, находятся методами планирования экспериментов и должны быть избыточными для улучшения качества оценки искомых величин. Примерами могут служить определение параметров щелоков, связанное измерение влажности, массы 1 м^2 для

бумажного полотна и др. Однако этот путь совершенствования технологических измерений используется пока еще недостаточно широко.

Конструктивно-технологические способы (включая защитно-предохранительные) предполагают модернизацию и разработку устройств с использованием новых физических эффектов, материалов элементов и технологии их изготовления. Этот путь основан на огромном опыте, накопленном в приборостроении, но является достаточно трудоемким, требующим времени и определенного общего уровня развития науки и техники.

Кибернетические пути совершенствования средств измерения (методические, структурные и алгоритмические способы) предполагают использование достижений кибернетики на основе автоматизации вычислений и управления с помощью вычислительных устройств для повышения качества измерений. На современном этапе этот путь наиболее легко осуществим и доступен для совершенствования узкоотраслевых технологических средств измерений, так как основан на применении крупносерийных элементов, узлов и устройств и не требует высокой технической культуры при производстве рабочих средств измерений.

Рассмотренные направления улучшения технологических измерений в ЦБП могут быть реализованы не только разработчиками измерительной техники для отраслевого производства, но и персоналом, осуществляющим эксплуатацию измерительных устройств на промышленных предприятиях отрасли.

1.3. Исследование метрологической надежности информационных измерительных систем технологических величин

1.3.1. Особенности метрологической надежности систем измерения

Особое место при изучении надежности технических устройств, а также надежности СИ, занимает метрологическая надежность систем. Она определяется:

- различием причинно-следственных закономерностей появления метрологических отказов по сравнению с внезапными и перемежающимися отказами и, как следствие, использованием принципиально других физико-математических моделей появления этих отказов;
- скрытым и в общем случае локальным по диапазону измерений характером проявления метрологических отказов, обнаружение которых требует специальных СИ и дорогостоящих процедур поверок или калибровок;
- принципиальной зависимостью метрологических неисправностей от нормируемых уровней МХ, от планируемых мероприятий по метрологическому обслуживанию, от периодичности поверок или калибровок и метрологического контроля систем;
- специфическими способами (структурными, схемными, конструктивными и алгоритмическими) по предотвращению метрологических отказов систем.

Если вопросы надежности по непрогнозируемым внезапным отказам и даже сбоям, особенно ввиду их редкого появления в СИ, в какой-то мере можно считать решенными (за исключением сбора данных по исходным количественным характеристикам надежности расчетных элементов в разнообразных условиях эксплуатации СИ), то вопросы метрологической надежности средств и систем измерений, несмотря на повышенный интерес к ним, только начинают решаться как в теоретическом, так и в практическом планах.

В настоящее время существуют два предлагаемых принципиально разных подхода к методам определения метрологической надежности, которые обуславливают существование различных способов определения показателей метрологической надежности СИ.

Первый подход связан с вероятностной интерпретацией представления частоты наблюдаемых или предсказываемых

метрологических отказов в партии СИ, поскольку показатели надежности, являясь статистическими, характеризуют долю отказавших изделий в партии испытуемых или выпускаемых СИ. К недостаткам такого метода оценки метрологической надежности относятся:

1) предположения о равнонадежности всех СИ, вследствие чего определяемые показатели приписываются каждому СИ независимо от его конкретных свойств;

2) практические трудности определения количественных показателей частоты метрологических отказов.

Второй подход нахождения показателей метрологической надежности основан на статистическом усреднении индивидуальных характеристик изменения погрешностей конкретных образцов СИ в партии. В качестве оценок погрешностей используются доверительные интервалы, определенные по экспериментально установленным моментам их распределения (систематическим и случайным составляющим), при заданных доверительных вероятностях их нахождения для указанных интервалов характеристик СИ. К недостаткам такой оценки метрологической надежности следует отнести отсутствие строгих требований к однородности свойств партий СИ.

Делаются попытки объединить эти два подхода к оценке метрологической надежности ИИС с помощью разделения их метрологических отказов на два типа: внезапных отказов, для оценки которых предлагается первый подход, и постепенных отказов, которые рассматриваются с помощью второго подхода.

Рассмотрим способ оценки метрологической надежности ИИС для технологических величин с учетом их особенностей [8]. Он основан на втором подходе, но при этом учитывается тот факт, что ИИС, используемые в ЦБП, представляют системы единичного производства и поэтому требуют индивидуального расчета надежности с учетом метрологических отказов. Наличие однотипных каналов в ИИС, эксплуатируемых примерно в

одинаковых условиях, позволяет усреднять статистические характеристики изменения метрологических параметров ИК во времени. Это обстоятельство, в свою очередь, приводит к возможности накапливать исходные данные для расчета ИК – аналогов для типовых ИК и производить аналитические расчеты для прогнозирования метрологических отказов ИК, пользуясь полученными экспериментально математическими моделями изменения их МХ во времени. При индивидуальной оценке метрологической надежности ИК модели по мере накопления статистических данных могут уточняться.

Из всего комплекса МХ ИК наиболее представительными МХ являются погрешности ИК, определяемые в статическом режиме.

Особенность экспериментального наблюдения за изменением погрешностей ИК ИИС в ЦБП заключается в том, что их погрешности исследуются в реальных условиях эксплуатации. Поэтому получаемые в реальных условиях эксплуатации погрешности ИК, которые представляют действительные (в данный момент при конкретных внешних условиях применения ИК) погрешности каналов, будем называть определяющими погрешностями ИК.

Анализ неустойчивости по ОП ИК в ИИС позволяет находить количественные характеристики метрологической надежности, к которым относятся:

вероятность безотказной работы $P_m(t)$ с учетом метрологических отказов за заданное время:

$$P_m(t) = \int_0^t f(T_m) dT_m = P[t \leq T_m], \quad (1.1)$$

где T_m – время наработки на метрологический отказ;

вероятность метрологической исправности $P_{mi}(t)$ в заданный момент времени

$$P_{mi}(t) = \int_{-\Delta_g}^{\Delta_g} f_{OP}[\Delta(t)] d\Delta = P_{mi}[(t - \Delta_g) < (t) < \Delta_g]. \quad (1.2)$$

В (1.1) и (1.2) предполагается, что метрологическая исправность определяется одной определяющей погрешностью. В противном случае характеристики метрологической надежности ИК должны находиться по теореме умножения вероятностей. Тогда параметр потока метрологических отказов ИК находится как величина, обратная времени наработки на отказ T_{min} , при $P_m(t = T_{min}) \rightarrow P_{зад}$

$$\omega_m = 1/T_{min}. \quad (1.3)$$

Как показывают экспериментальные исследования изменения ОП во времени, для ИК характер нестабильности их МХ в общем случае нелинеен. Однако для большинства ИК при отрезках времени $T_k = t^{(j)} - t^{(j-1)} = T_{min}$, через которые каналы (или отдельные СИ) должны поверяться, можно представить реализации изменения ОП в виде линейных функций. Их использование при известной доле приближения к реальной ситуации изменения ОП позволяет существенно сократить трудоемкость расчетов исходных данных и количественных показателей при определении метрологической надежности ИК.

Изменение разброса ОП во времени для большинства ИК остается практически постоянным (во всяком случае, на рассматриваемых отрезках времени между поверками). В ряде типовых ИК в начальный период их эксплуатации можно наблюдать приблизительно линейное изменение во времени ОП вокруг их средних значений в семействах реализаций изменения МХ ИК во времени. Эти модели изменения ОП во времени названы *веерными случайными функциями*.

Для описания ансамбля реализации общей моделью изменения ОП может быть модель процесса авторегрессии проинтегрированного скользящего среднего изменения во времени ОП с учетом порядка d разностей $\Delta^{(d)}(t - t_j)$, порядка p коэффициентов корреляционных зависимостей Δ_{cj} , порядка g определения скользящего среднего в каждом t_j сечении в виде

$$\overset{o}{\Delta}(t) = \Delta(t) + \sum_{j=1}^p \beta_i \Delta_{cj}(t-t_j) + \sum_{j=1}^g \alpha_j \overset{o}{\Delta}(t-t_j), \quad (1.4)$$

где $\overset{o}{\Delta}(t)$ – стохастическое значение ОП в момент t ;
 $\Delta(t)$ – детерминированная функция изменения ОП во времени;
 β_i – коэффициент авторегрессии;
 α_j – коэффициент скользящего среднего.

Однако такая модель в виде временного ряда, описываемая стохастическим разностным уравнением и позволяющая подробно исследовать как стационарные, так и нестационарные процессы изменения ОП ИК во времени, приводит к непреодолимым сложностям при оценке метрологической надежности ИК из-за отсутствия исходных данных (не менее 40 – 50 измерений ОП во временных сечениях на достаточном интервале времени наблюдения).

На современном этапе анализа метрологической надежности ИК, когда нет таких исходных данных, когда важно, пусть с меньшей достоверностью, представлять качественную картину физических процессов, приводящих к метрологическим отказам ИК для конкретных систем в определенных условиях их эксплуатации в ЦБП, следует отдавать предпочтение более простым, наглядным моделям изменения ОП во времени, позволяющим получить аналитические выражения для расчета метрологической надежности ИИС. Поэтому в данном разделе остановимся на анализе линейных и нелинейных моделей процессов, описывающих нестабильность ИК по ОП. Ниже будут рассмотрены получение исходных данных для расчета показателей метрологической надежности ИК и методика ее определения для ИК в ЦБП.

1.3.2. Исследование метрологической надежности при линейных моделях изменения определяющей погрешности ИК

При линейном или линеаризованном процессе изменения ОП во времени $\Delta(t)$ каждая реализация p -го ИК заменяется прямой.

Постулат о нормальном законе распределения для $\Delta(0)$ и V^J (случайное значение скорости изменения ОП во времени) принят для ИК в силу центральной предельной теоремы теории вероятностей, так как он отражает реальные законы распределения ОП ИК в ЦБП. Рассмотрим три модифицированные функции $\Delta(t) = \Delta(0) \pm V^J t$ (случаи А, Б).

А. Если в $\Delta(t) = \Delta(0) + V^J t$ можно положить $V^J = \text{const}$ и СКО $\sigma_\Delta(0) = \text{const}$, то зависимости ОП во времени представляют собой ансамбль прямых, плотность распределения которых в каждом временном сечении остается неизменной.

Тогда для $\Delta(t) = \Delta(0) + V^J t$ математическое ожидание $m_\Delta(t)$ и СКО $\sigma_\Delta(t)$ составляют

$$m_\Delta(t) = m_\Delta(0) + V^J t, \quad (1.5)$$

$$\sigma_\Delta(t) = \sigma_\Delta(0) = \text{const}, \quad (1.6)$$

и закон распределения ОП в каждый момент времени t имеет вид

$$f[\Delta(t)] = \frac{1}{\sigma_\Delta(t)\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma_\Delta^2(t)}[\Delta(t) - m_\Delta(t)]^2\right\}. \quad (1.7)$$

Тогда закон распределения T_m при пересечении допускаемой границы $\pm\Delta_g$ также является нормальным (рис. 1.1).

$$f[T_m] = \frac{1}{\sigma_{T_m}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_{T_m}^2}(T_m - m_{T_m})^2\right], \quad (1.8)$$

$$m_{T_M} = \frac{\pm \Delta_g - m_{\Delta}(0)}{V^L} = T_M^L, \quad (1.9)$$

где m_{T_M} – среднее время наработки ИК на метрологический отказ.

Определяют СКО времени наработки на метрологический отказ

$$\sigma_{T_M} = \frac{\sigma_{\Delta}(0)}{V^L}. \quad (1.10)$$

Вероятность $P_M(t)$ для $t = T_{M\min}^L$ находят из зависимости

$$\begin{aligned} P_M(T_{M\min}^L) &= 1 - Q_M(T_{M\min}^L) = \\ &= 1 - \int_0^{T_{M\min}^L} \frac{1}{\sigma_{T_M^L} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma_{T_M^L}^2} \left(T_M^L - m_{T_M^L} \right)^2 \right] dT_M, \end{aligned} \quad (1.11)$$

т.е. также через функцию Лапласа для аргументов

$$X' = \frac{T_{M\min}^L \bar{T}_M^L}{\sigma_{T_M^L}}, \quad (1.12)$$

$$X'' = \frac{-T_{M\min}^L \bar{T}_M^L}{\sigma_{T_M^L}}. \quad (1.13)$$

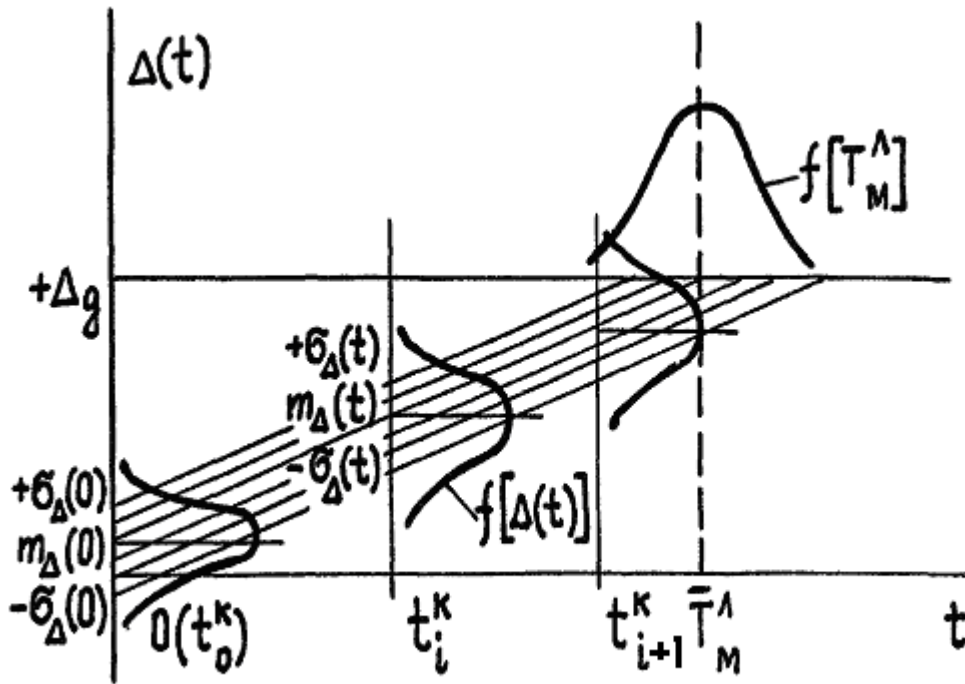


Рис. 1.1. Семейство аппроксимирующих линейных характеристик изменения определяющей погрешности канала при $V^J = \text{const}$, $\sigma_\Delta(t) = \text{const}$

Следует находить $P_m(t)$ для $T_{m\min}^J$ при $Q_m(T_{m\min}^J) = 0,05$. Тогда значение максимального модуля погрешности определяется из выражения

$$\Delta_P = 0,95(t) = m_\Delta(t) + 1,6\sigma_\Delta(t) = m_\Delta(t) + 1,6\sigma_\Delta(0), \quad (1.14)$$

$$T_{m\min}^J = \bar{T}_m^J - 1,6\sigma_{T_m^J} = \bar{T}_m^J - \frac{1,6\sigma_\Delta(0)}{V^J}. \quad (1.15)$$

Показатель, который характеризует частоту метрологических отказов ИК в единицу времени с учетом восстановления значения ОП при каждой поверке до $\Delta(0)$, будет (рис. 1.2):

$$\bar{\omega}_m^J = \frac{1}{T_{m\min}^J} = \frac{V^J}{\bar{T}_m^J V^J - 1,6\sigma_\Delta(0)}. \quad (1.16)$$

и

$$V_{\Delta} \in N(m_V^J, \sigma_V^J) \quad (1.20)$$

получают

$$f(V^J) = \frac{1}{\sigma_V^J \sqrt{2\pi}} \exp \left[\frac{-1}{2\sigma_V^J} (V^J - m_V^J) \right]^2, \quad (1.21)$$

$$m_{\Delta}(t) = m_{\Delta}(0) + m_V^J t, \quad (1.22)$$

$$\sigma_{\Delta}(t) = \sigma_{\Delta}(0) + \sigma_V^J t, \quad (1.23)$$

где $m_{\Delta}(0)$ и $\sigma_{\Delta}(0)$ – характеристики разброса ОП при $t = 0$.

Пусть при $t = 0$ можно пренебречь разбросом погрешностей $\sigma_{\Delta}(0) = 0$ вокруг математического ожидания $m_{\Delta}(0) = m_0$, и веерная функция $\Delta(t)$ начинается из точки с координатами $t = 0$, $\Delta(0) = \Delta_0^J$ (рис. 1.4).

Так как плотность распределения величины соответствует (1.21), то в каждом временном сечении с учетом (1.22) и (1.23) получим

$$m_{\Delta}(t) = \Delta_0^J + m_V^J(t), \quad (1.24)$$

$$\sigma_{\Delta}(t) = \sigma_V^J(t). \quad (1.25)$$

Для ИК с веерной функцией изменения ОП время достижения погрешностями каналов допустимой границы $\pm \Delta_g$ будет определяться случайной величиной

$$T_m^J = |\Delta_g - \Delta_0| / V^J. \quad (1.26)$$

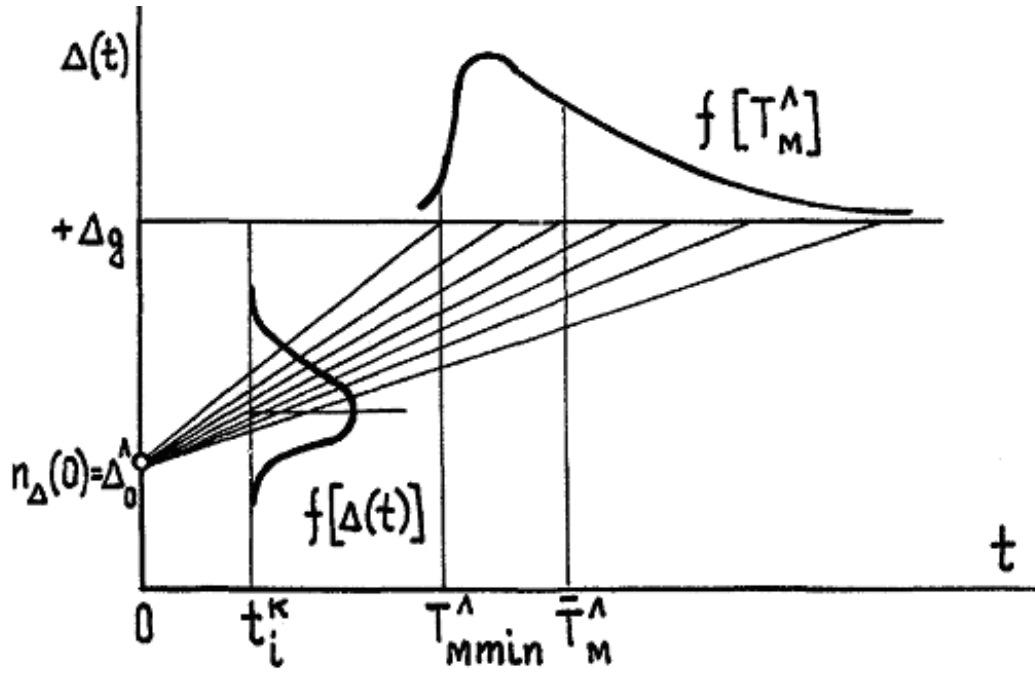


Рис. 1.4. Семейство характеристик изменения погрешностей каналов
при $\bar{V}^{\mathcal{I}} \in \bar{N}(m_v, \sigma_v)$ и $m_{\Delta}(\bar{0}) = \Delta_0^{\mathcal{I}}$

Учитывая (1.26) и (1.21) и применив известное в теории вероятностей правило получения законов распределения функций случайных аргументов, закон распределения времени $T_m^{\mathcal{I}}$ пересечение границ $\pm\Delta_g$ находят в виде

$$f[T_m^{\mathcal{I}}] = \frac{\beta^{\mathcal{I}}}{(T_m^{\mathcal{I}})^2 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-0,5 \left(\frac{\beta^{\mathcal{I}}}{T_m^{\mathcal{I}}} - \alpha^{\mathcal{I}} \right)^2 \right] \quad (1.27)$$

с параметрами

$$\beta^{\mathcal{I}} = (\Delta_g - \Delta_0) / \sigma_v^{\mathcal{I}}, \quad (1.28)$$

$$\alpha^{\mathcal{I}} = m_v^{\mathcal{I}} / \sigma_v^{\mathcal{I}}, \quad (1.29)$$

где $\beta^{\mathcal{I}}$ – относительный (в значениях $\sigma_v^{\mathcal{I}}$) начальный запас погрешности ИК
(в единицах времени);

$\alpha^{\mathcal{I}}$ – относительная (в значениях $\sigma_v^{\mathcal{I}}$) средняя скорость изменения ОП (в
безразмерных единицах).

Закон распределения (1.27) получил название *альфа-распределения* и имеет вид, изображенный на рис. 1.5.

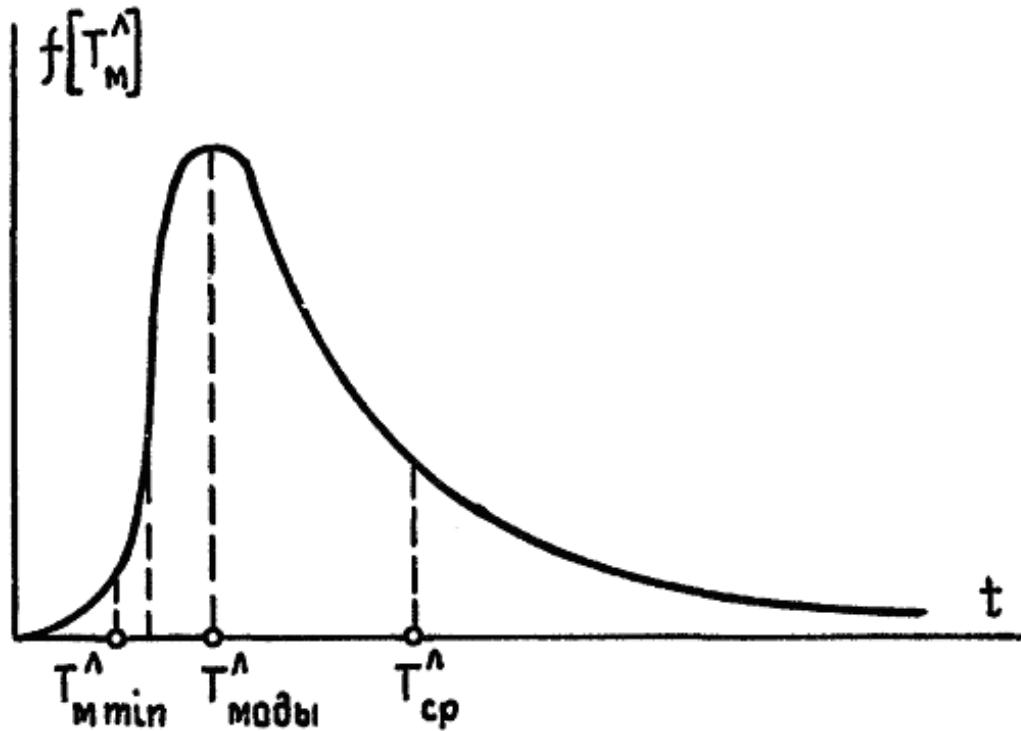


Рис. 1.5. Вид альфа-распределения

Для кривой $f(T_M)$ указаны характерные точки:

$T_{\min}^L$ – наработка до начала массовых метрологических отказов;

$T_{\text{моды}}^L$ – время, соответствующее моде альфа-распределения;

$T_{\text{ср}}^L$ – медианное (среднее) время для $f(T_M^L)$.

Теперь определяют

$$\bar{T}_M^L = \frac{\beta^L}{\alpha^L} = \frac{\Delta_g - \Delta_0}{m_V^L}, \quad (1.30)$$

которое является абсциссой точки пересечения $m_A(t)$ и заданного допуска Δ_g для ОП.

Величина наработки ИК до начала массовых метрологических отказов

$T_{\min}^L$ находится как наименьший положительный корень уравнения

$$\frac{d^3 f(T_m^{\mathcal{L}})}{d(T_m^{\mathcal{L}})^3} = 0. \quad (1.31)$$

Обозначив

$$K_m^{\mathcal{L}} = \frac{T_{m\min}^{\mathcal{L}}}{\beta^{\mathcal{L}}} = f(\alpha^{\mathcal{L}}), \quad (1.32)$$

находят $K_m^{\mathcal{L}}$ из уравнения (1.32). Зависимость $K_m^{\mathcal{L}} = f(\alpha^{\mathcal{L}})$ представлена на рис. 1.6.

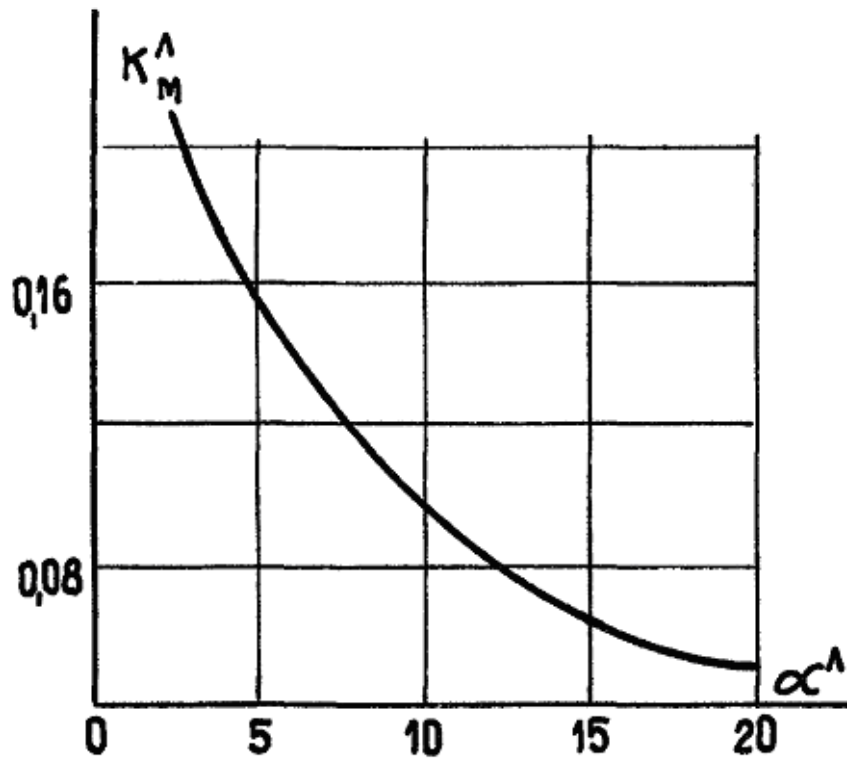


Рис. 1.6. К расчету времени наступления массовых метрологических отказов при линейных моделях изменения определяющих погрешностей

Зависимость $K_m^{\mathcal{L}} = f(\alpha^{\mathcal{L}})$ может быть аппроксимирована приближенным выражением $K_m^{\mathcal{L}} \approx 0,51$, тогда

$$T_{m\min}^{\mathcal{L}} = K_m^{\mathcal{L}}(\alpha^{\mathcal{L}})\beta^{\mathcal{L}} \approx \frac{0,51}{\alpha^{\mathcal{L}}} \beta^{\mathcal{L}}, \quad (1.33)$$

или с учетом (1.28) и (1.29) получают

$$T_{\mathcal{M}\min}^{\mathcal{L}} = \frac{\Delta_g - \Delta_0}{2m_V^{\mathcal{L}}} . \quad (1.34)$$

Для найденного значения $T_{\mathcal{M}\min}^{\mathcal{L}}$ показатель $P_{\mathcal{M}}(t)$ находят из зависимости

$$\begin{aligned} P_{\mathcal{M}}(T_{\mathcal{M}\min}^{\mathcal{L}}) &= 1 - \int_0^{T_{\mathcal{M}\min}^{\mathcal{L}}} f[T_{\mathcal{M}\min}^{\mathcal{L}}] dT_{\mathcal{M}} = \\ &= 1 - \int_0^{T_{\mathcal{M}\min}^{\mathcal{L}}} \frac{\beta^{\mathcal{L}}}{(T_{\mathcal{M}}^{\mathcal{L}})^2 \sqrt{2\pi}} \exp\left[\frac{1}{2}\left(\frac{\beta^{\mathcal{L}}}{T_{\mathcal{M}}^{\mathcal{L}}} - \alpha^{\mathcal{L}}\right)^2\right] dT_{\mathcal{M}} . \end{aligned} \quad (1.35)$$

Применив подстановку

$$U = \frac{\beta^{\mathcal{L}}}{t} - \alpha^{\mathcal{L}} , \quad (1.36)$$

получают

$$P_{\mathcal{M}}(T_{\mathcal{M}\min}^{\mathcal{L}}) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\alpha^{\mathcal{L}}}^{\frac{\beta^{\mathcal{L}}}{T_{\mathcal{M}\min}^{\mathcal{L}}} - \alpha^{\mathcal{L}}} \exp\left(-\frac{U^2}{2}\right) dU . \quad (1.37)$$

Выражение (1.37) может быть представлено через табличный интеграл, который приведем в виде функций Лапласа $\Phi(X')$ и $\Phi(X'')$ по аргументам

$$X' = \alpha^{\mathcal{L}} , \quad (1.38)$$

$$X'' = \frac{\beta^{\mathcal{L}}}{T_{\mathcal{M}\min}^{\mathcal{L}}} - \alpha^{\mathcal{L}} , \quad (1.39)$$

а именно

$$\begin{aligned}
P_{\mathcal{M}}\left(T_{\mathcal{M} \min}^{\mathcal{L}}\right) &= 1 - \frac{1}{2}\Phi(X') - \frac{1}{2}\Phi(X'') = \\
&= 1 - \frac{1}{2}\Phi\left[\frac{\Delta_g - \Delta_0}{\sigma_v^{\mathcal{L}} T_{\mathcal{M} \min}^{\mathcal{L}}} \cdot \frac{m_v^{\mathcal{L}}}{\sigma_v^{\mathcal{L}}}\right] - \frac{1}{2}\Phi\left[\frac{m_v^{\mathcal{L}}}{\sigma_v^{\mathcal{L}}}\right] .
\end{aligned} \tag{1.40}$$

С учетом (1.34) выражение (1.40) принимает вид

$$P_{\mathcal{M}}\left(T_{\mathcal{M} \min}^{\mathcal{L}}\right) \approx 1 - \Phi\left(\frac{m_v^{\mathcal{L}}}{\sigma_v^{\mathcal{L}}}\right) . \tag{1.41}$$

Б. Реальные изменения ОП ИК при $t = 0$ имеют дисперсию, отличную от нуля

$$D[\Delta(0)] = \sigma^2(0), \tag{1.42}$$

что приводит зависимость изменения ОП к виду, изображенному на рис. 1.3. По сравнению с семейством реализации $\Delta(t)$, представленных на рис. 1.4, на рис. 1.3 рассматривается часть функций со смещением ординаты на $\tau^{\mathcal{L}}$. В каждом временном сечении

$$m_{\Delta}(t) = m_{\Delta}(0) + m_v^{\mathcal{L}} t, \tag{1.43}$$

$$\sigma_{\Delta}(t) = \sigma_{\Delta}(0) + \sigma_v^{\mathcal{L}} t. \tag{1.44}$$

Так как

$$m_{\Delta}(0) = \Delta_0 + m_v^{\mathcal{L}} \tau^{\mathcal{L}}, \tag{1.45}$$

$$\sigma_{\Delta}(0) = \sigma_v^{\mathcal{L}} \tau^{\mathcal{L}}, \tag{1.46}$$

то, используя (1.43), (1.44) и (1.29), найдем

$$\Delta_0 = m_\Delta(0) - \alpha^{\mathcal{L}} \sigma_\Delta(0). \quad (1.47)$$

Отсюда значения параметров нормального закона распределения ОП в каждом временном сечении t составят

$$m_\Delta(t) = m_\Delta(0) - \alpha^{\mathcal{L}} \sigma_\Delta(0) + m_v^{\mathcal{L}} (t + \tau^{\mathcal{L}}), \quad (1.48)$$

$$\sigma_\Delta(t) = \sigma_v^{\mathcal{L}} (t + \tau^{\mathcal{L}}), \quad (1.49)$$

где

$$\tau^{\mathcal{L}} = \frac{\sigma_\Delta(0)}{\sigma_v^{\mathcal{L}}} \quad (1.50)$$

Тогда $P_m(t)$ получают в виде

$$P_m(t) = \frac{1}{\sigma_v^{\mathcal{L}} \left[t + \frac{\sigma_\Delta(0)}{\sigma_v^{\mathcal{L}}} \right]} \exp \left(-\frac{\Delta_g}{\sigma_v^{\mathcal{L}} \left[t + \frac{\sigma_\Delta(0)}{\sigma_v^{\mathcal{L}}} \right]} \right) \times \left\{ \Delta(t) - \left[m_\Delta(t) - \frac{m_v^{\mathcal{L}}}{\sigma_v^{\mathcal{L}}} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \sigma_\Delta(0) + m_v^{\mathcal{L}} \left[t + \frac{\sigma_\Delta(0)}{\sigma_v^{\mathcal{L}}} \right] \right] \right\}^2 d\Delta. \quad (1.51)$$

Распределение времени $T_m^{\mathcal{L}}$ пересечения границ $\pm \Delta_g$ составит

$$f[T_m^{\mathcal{L}}] = \frac{\beta^{\mathcal{L}}}{(T_m^{\mathcal{L}} + \tau^{\mathcal{L}}) \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\beta^{\mathcal{L}}}{T_m^{\mathcal{L}} + \tau^{\mathcal{L}}} - \alpha^{\mathcal{L}} \right)^2 \right] \quad (1.52)$$

с параметрами $\alpha^{\mathcal{L}}$ из (1.29), $\sigma_\Delta(0)$ из (1.46) и Δ_0 из (1.47) по (1.28)

$$\beta^{\mathcal{L}} = \frac{\Delta_g - \Delta_0}{\sigma_v^{\mathcal{L}}} = \frac{\Delta_g - [m_\Delta(0) - \alpha^{\mathcal{L}} \sigma_\Delta(0)]}{\sigma_v^{\mathcal{L}}}, \quad (1.53)$$

т.е. выражение (1.51) также соответствует альфа-распределению.

Однако из-за сдвига полюса функций по оси абсцисс на величину τ^J время $T_{\mathcal{M} \min}^J$ для модели будет меньше рассчитанного по зависимости (1.33) на τ^J , что с учетом (1.46) составит

$$T_{\mathcal{M} \min}^J = \beta^J K_{\mathcal{M}}^J(\alpha^J) - \frac{\sigma_{\Delta}(0)}{\sigma_V^J}, \quad (1.54)$$

или, используя (1.53), находят

$$T_{\mathcal{M} \min}^J = \left\{ \frac{\Delta_g - \left[m_{\Delta}(0) - \frac{m_V^J}{\sigma_V^J} \sigma_{\Delta}(0) \right]}{\sigma_V^J} \right\} K_{\mathcal{M}}^J \left(\frac{m_V^J}{\sigma_V^J} \right) - \frac{\sigma_{\Delta}(0)}{\sigma_V^J}. \quad (1.55)$$

Отсюда с учетом (1.33) с погрешностью до 2 % получают $T_{\mathcal{M} \min}^J$ ИК:

$$T_{\mathcal{M} \min}^J = \frac{1}{2\sigma_V^J} \left[\Delta_g - m_{\Delta}(0) + \frac{\sigma_{\Delta}(0)}{\sigma_V^J} (m_V^J - 2\sigma_V^J) \right]. \quad (1.56)$$

Таким образом, значение $T_{\mathcal{M} \min}^J$ для ансамблей изменения ОП ИК полностью определяется статистическими характеристиками изменения ОП.

Для определения $P_{\mathcal{M}}(T_{\mathcal{M} \min}^J)$ используют выражение, аналогичное (1.35)

$$\begin{aligned} P_{\mathcal{M}}(T_{\mathcal{M} \min}^J) &= 1 - \int_0^{T_{\mathcal{M} \min}^J} f[T_{\mathcal{M} \min}^J] dT_{\mathcal{M}} = \\ &= 1 - \int_0^{T_{\mathcal{M} \min}^J} \frac{\beta^J}{\left(T_{\mathcal{M}}^J + \tau^J \right) \sqrt{2\pi}} \exp \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\beta^J}{T_{\mathcal{M}}^J + \tau^J} + \alpha^J \right)^2 \right] dT_{\mathcal{M}}. \end{aligned} \quad (1.57)$$

После интегрирования получают

$$\begin{aligned}
P_M(T_{M\min}^L) &= 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{\beta^L}{\tau^L} - \alpha^L}^{\frac{\beta^L}{T_{M\min}^L} - \tau^L} \exp\left(-\frac{U}{2}\right)^2 dU = \\
&= 1 - \frac{1}{2} \Phi\left(\frac{\beta^L}{T_{M\min}^L} - \tau^L - \alpha^L\right) - \frac{1}{2} \Phi\left(\frac{\beta^L}{\tau^L} - \alpha^L\right). \quad (1.58)
\end{aligned}$$

Подставив значения параметров α^L , β^L и τ^L в (1.58), зная статистические характеристики изменения ОП ИК, находят

$$\begin{aligned}
P_M(T_{M\min}^L) &= 1 - \frac{1}{2} \Phi\left\{ \frac{\Delta_{зан} - \frac{m_V^L}{\sigma_V^L} \sigma_\Delta(0)}{\sigma_V^L [T_{M\min}^L + \sigma_\Delta(0)/\sigma_V^L]} \right\} - \\
&- \frac{1}{2} \Phi\left\{ \frac{\Delta_{зан} - \frac{m_V^L}{\sigma_V^L} \sigma_\Delta(0)}{\sigma_\Delta(0)} - \frac{m_V^L}{\sigma_V^L} \right\}, \quad (1.59)
\end{aligned}$$

где $\Delta_{зан} = \Delta_g - m_\Delta(0)$ – запас ОП ИК, который определяется ориентировочно при наладке, или $\Delta_{зан} = \Delta_g$, полагая, что $m_\Delta(0) = 0$.

1.3.3. Анализ метрологической надежности при нелинейных моделях изменения определяющей погрешности ИК

Как показывают практические исследования ансамблей реализации изменения ОП для ИК, в ЦБП следует пользоваться нелинейными математическими моделями вида

$$\delta^{\vartheta}(t) = \pm \delta^{\vartheta}(0) \exp(\pm V^{\vartheta} t), \quad (1.60)$$

где $\delta^{\vartheta}(0)$ – относительные начальные значения ОП;

V^{ϑ} – относительная скорость изменения натурального логарифма ОП ИК;

t – текущее календарное время.

Модель (1.60) путем логарифмирования (без учета знака) сводится к линейной:

$$\ln \delta^{\vartheta}(t) = \ln \delta^{\vartheta}(0) + V^{\vartheta} t, \quad (1.61)$$

при обозначении

$$\delta^{\vartheta}(t) = \ln \delta^{\vartheta}(t), \quad (1.62)$$

$$\delta^{\vartheta}(0) = \ln \delta^{\vartheta}(0), \quad (1.63)$$

получают

$$\delta^{\vartheta}(t) = \delta^{\vartheta}(0) e^{V^{\vartheta} t}. \quad (1.64)$$

Исследуют, не теряя общности результатов, модель вида (1.61) в зависимости от значений в общем случае случайных аргументов $\delta^{\vartheta}(0)$ и V^{ϑ} .

Выделяют три случая (А, Б и В), которые рассмотрены ниже.

А. При $V^{\vartheta} = \text{const}$ в (1.61) получают равномерную в логарифмическом масштабе модель изменения ОП однотипных ИК во времени (рис. 1.7).

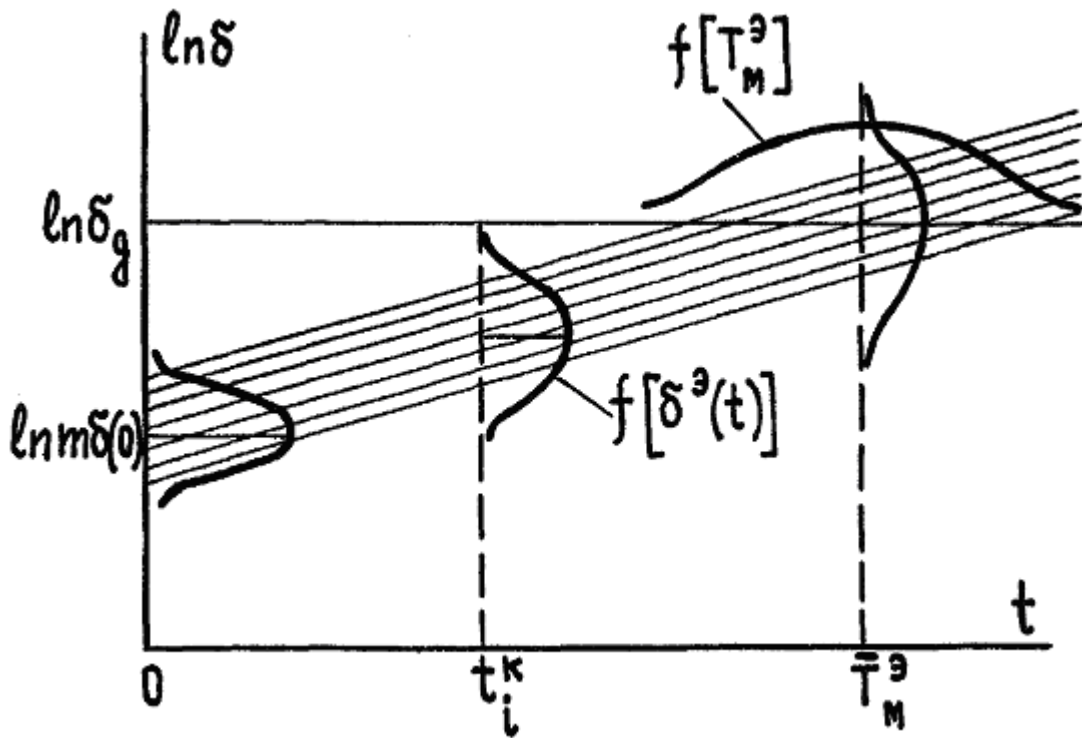


Рис. 1.7. Экспоненциальная модель изменения определяющей погрешности каналов при $V^3 = \text{const}$

Характеристики законов распределения ОП ИК в каждый текущий момент времени t зависят от начальных характеристик ОП при $t = 0$, т.е. $m_\delta(0)$ и $\sigma_\delta(0)$ и имеют вид

$$m[\delta^3(t)] = m_\delta(0) \exp V^3 t = m_\delta(t), \quad (1.65)$$

$$\sigma[\delta^3(t)] = \sigma_\delta(0) \exp V^3 t = \sigma_\delta(t). \quad (1.66)$$

Тогда закон распределения ОП в сечении t можно представить, как

$$\delta^3(t) \in N[m_0(t), \sigma_\delta(t)]. \quad (1.67)$$

Это позволяет определять значения $P_{mi}(t)$, пользуясь табличными значениями интеграла Лапласа по аргументам

$$X' = \frac{\delta_g - m_\delta(t)}{\sigma_\delta(t)}, \quad (1.68)$$

$$X'' = \frac{-\delta_g - m_\delta(t)}{\sigma_\delta(t)}, \quad (1.69)$$

с учетом (1.65) и (1.66).

Закон распределения $T_{\mathcal{M}}^{\vartheta}$ определяется распределением случайной величины

$$T_{\mathcal{M}}^{\vartheta} = \frac{\ln \delta_g - \ln \delta(0)}{V^{\vartheta}} \quad (1.70)$$

и представляется как

$$f(T_{\mathcal{M}}^{\vartheta}) = \frac{1}{\sigma_{T_{\mathcal{M}}^{\vartheta}} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma_{T_{\mathcal{M}}^{\vartheta}}} \left(T_{\mathcal{M}}^{\vartheta} - m_{T_{\mathcal{M}}^{\vartheta}} \right)^2 \right], \quad (1.71)$$

где

$$m_{T_{\mathcal{M}}^{\vartheta}} = \frac{|\ln \delta_g - \ln m_{\delta}(t)|}{V^{\vartheta}} = \bar{T}_{\mathcal{M}}^{\vartheta} \quad (1.72)$$

и

$$\sigma_{T_{\mathcal{M}}^{\vartheta}} = \frac{\sigma_{\delta}(t)}{V^{\vartheta}}. \quad (1.73)$$

Из (1.71) находят либо $P(t)$ для

$$t = T_{\mathcal{M} \min}^{\vartheta}, \quad (1.74)$$

либо время наступления массовых метрологических отказов $T_{\mathcal{M} \min}^{\vartheta}$ при заданной $P_{\mathcal{M}}(T_{\mathcal{M}}^{\vartheta}) \Big|_{зад}$, пользуясь формулами (1.11), (1.14) и (1.15).

Б. Пусть ансамбль реализации изменения ОП ИК (рис. 1.8) аппроксимируется моделью (1.61) при

$$\delta^{\vartheta}(0) = \delta_0^{\vartheta} = const, \quad (1.75)$$

а относительная скорость изменения логарифмов ОП

$$V^{\vartheta} \in N(m_{V^{\vartheta}}, \sigma_{V^{\vartheta}}). \quad (1.76)$$

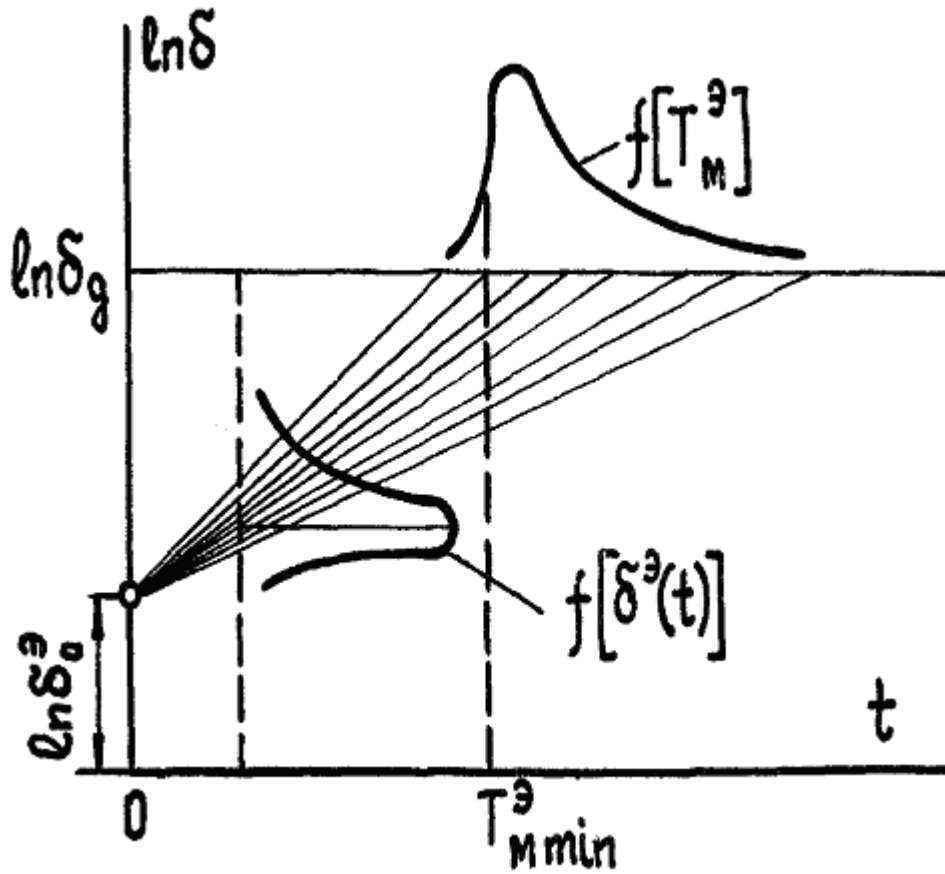


Рис. 1.8. Экспоненциальная модель изменения погрешностей каналов
при $V^э \in N(m_{V^э}, \sigma_{V^э})$ и $m_\delta(0) = \delta_0^э$

Так как $\zeta(t)$ линейно связана с $V^э$, то функция

$$\zeta(t) \in N\{m[\zeta(t)], \sigma[\zeta(t)]\}. \quad (1.77)$$

Как известно, при

$$\zeta(t) = \ln \delta^э(t) \quad (1.78)$$

функция $\delta^э(t)$ имеет логарифмически нормальное распределение

$$f[\delta^э(t)] = \frac{1}{\delta^э(t)\sigma[\delta^э(t)]\sqrt{2\pi}} \exp\left\langle -\frac{1}{2\sigma[\delta^э(t)]} \left\{ \ln \delta^э(t) - \ln m[\delta^э(t)] \right\}^2 \right\rangle. \quad (1.79)$$

Моменты распределения функции $\zeta(t)$ в каждом временном сечении выражаются через моменты $m_{V^э}$ и $\sigma_{V^э}$

$$m[\zeta(t)] = m[\ln \delta^э(t)] = \ln \delta_0^э + m_{V^э}t, \quad (1.80)$$

$$\sigma[\zeta(t)] = \sigma[\ln \delta^э(t)] = \sigma_{V^э}t. \quad (1.81)$$

Используя свойства логарифмически нормального распределения для $\delta^3(t)$ и учитывая (1.80) и (1.81), получают

$$m[\delta^3(t)] = \delta_0^3 \exp \left[m_{V^3} t + 0,5 (\sigma_{V^3} t)^2 \right], \quad (1.82)$$

$$\begin{aligned} \sigma[\delta^3(t)] &= m[\delta^3(t)] \sqrt{\exp 0,5 (\sigma_{V^3} t)^2 - 1} = \\ &= \delta_0^3 \exp \left\{ m_{V^3} t + 0,5 (\sigma_{V^3} t)^2 \left[\exp 0,5 (\sigma_{V^3} t)^2 - 1 \right]^{-\frac{1}{2}} \right\}. \end{aligned} \quad (1.83)$$

Если $0,5 (\sigma_{V^3} t)^2 \ll m_{V^3} t$ или $\sigma_{V^3} t \ll 2 m_{V^3} t$, что практически выполняется для ИК, зависимость (1.82) можно упростить:

$$m[\delta^3(t)] \approx \delta_0^3 \exp m_{V^3} t. \quad (1.84)$$

Кроме того, $\sigma_{V^3} t < 1$, и можно воспользоваться разложением экспоненциальной зависимости (1.83) в ряд, ограничиваясь двумя членами разложения. Тогда из (1.83) получают

$$\sigma[\delta^3(t)] \approx \sigma_{V^3} t m[\delta^3(t)] \quad (1.85)$$

и с учетом (1.84) находят

$$\sigma[\delta^3(t)] \approx \sigma_{V^3} t \delta_0^3 \exp m_{V^3} t. \quad (1.86)$$

Тогда $P_m(t)$ при заданных значениях δ_g составит:

$$P_m(t) = \frac{1}{\delta^3(t) \sigma[\delta^3(t)] \sqrt{2\pi}} \int_{-\delta_g}^{\delta_g} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma[\delta^3(t)]^2} \left\{ \ln \delta^3(t) - \ln m[\delta^3(t)] \right\}^2 \right\} d\delta. \quad (1.87)$$

Случайная величина

$$T_{\mathcal{M}}^{\vartheta} = \frac{\ln \delta_g - \ln \delta_0}{V^{\vartheta}} \quad (1.88)$$

определяет закон распределения $T_{\mathcal{M}}^{\vartheta}$ в виде:

$$f\left[T_{\mathcal{M}}^{\vartheta}\right] = \frac{\beta^{\vartheta}}{\left(T_{\mathcal{M}}^{\vartheta}\right)^2 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\beta^{\vartheta}}{T_{\mathcal{M}}^{\vartheta}} - \alpha^{\vartheta}\right)^2\right], \quad (1.89)$$

где параметры альфа-распределения

$$\beta^{\vartheta} = \frac{\ln \delta_g - \ln \delta_0}{\sigma_{V^{\vartheta}}}, \quad (1.90)$$

$$\alpha^{\vartheta} = \frac{m}{\sigma_{V^{\vartheta}}} \quad (1.91)$$

Если $\delta_0 \approx 0$, то (1.90) запишется в виде

$$\beta^{\vartheta} = \frac{\ln \delta_g}{\sigma_{V^{\vartheta}}}. \quad (1.92)$$

Тогда находят

$$\bar{T}_{\mathcal{M}}^{\vartheta} = \frac{\beta^{\vartheta}}{\alpha^{\vartheta}} = \frac{\ln \delta_g}{m_{V^{\vartheta}}}, \quad (1.93)$$

получают

$$T_{\mathcal{M}\min}^{\vartheta} = \beta^{\vartheta} K_{\mathcal{M}}^{\vartheta}(\alpha^{\vartheta}) = K^{\vartheta}(\alpha^{\vartheta}) \frac{\ln \delta_g}{\sigma_{V^{\vartheta}}} \quad (1.94)$$

или приближенно при (1.33):

$$T_{\mathcal{M}\min}^{\vartheta} \approx 0,5 \frac{\ln \delta_g}{m_{V^{\vartheta}}} = 0,5 \bar{T}_{\mathcal{M}}^{\vartheta}. \quad (1.95)$$

Например, для $t = T_{\mathcal{M} \min}^{\vartheta}$ значение $P_{\mathcal{M}}(T_{\mathcal{M} \min}^{\vartheta})$ при подстановке вместо X' и X'' соответствующих параметров α^{ϑ} и β^{ϑ} имеет вид:

$$P_{\mathcal{M}}(T_{\mathcal{M} \min}^{\vartheta}) = 1 - \frac{1}{2} \Phi \left(\frac{\ln \delta_g - \ln \delta_0}{\sigma_{V^{\vartheta}} T_{\mathcal{M} \min}^{\vartheta}} - \frac{m_{V^{\vartheta}}}{\sigma_{V^{\vartheta}}} \right) + \frac{1}{2} \Phi \left(\frac{m_{V^{\vartheta}}}{\sigma_{V^{\vartheta}}} \right). \quad (1.96)$$

В. При $\delta^{\vartheta}(t)$ в виде (1.61) и $\delta^{\vartheta}(0) \neq \delta_0^{\vartheta}$ получаем веерные функции (см.рис. 1.8) с ненулевым начальным разбросом, отвечающие наиболее общему случаю изменения ОП ИК во времени.

Эти функции можно представить, как это было выполнено в п.Б настоящего раздела, для веерных линейных функций веерными линейными экспоненциальными зависимостями в координатах $\ln \delta^{\vartheta}(t), t$ с общей точкой – неслучайным значением $\ln \delta_0^{\vartheta}, \tau^{\vartheta}$, причем $\tau^{\vartheta} < 0$, а $\ln \delta_0^{\vartheta} > 0$ (см.рис. 1.8).

Аналитически эти функции можно описать в виде

$$\delta^{\vartheta}(t) = \delta^{\vartheta}(0) \exp(V^{\vartheta} t) = \delta_0^{\vartheta} \exp[V^{\vartheta}(t + \tau^{\vartheta})]. \quad (1.97)$$

При $t = 0$ функции $\delta^{\vartheta}(t)$ принимают значения

$$\delta^{\vartheta}(0) = \delta^{\vartheta} \exp(V^{\vartheta} \tau^{\vartheta}). \quad (1.98)$$

При этом модель вида (1.98) определяется двумя аргументами: δ^{ϑ} и V^{ϑ} . В логарифмическом масштабе случайные функции (1.61) равномерные при $V^{\vartheta} = \text{const}$ (см.рис. 1.7) и веерные при $\delta^{\vartheta}(0) = \delta_0^{\vartheta}$ (см.рис. 1.8) являются частными случаями модели (1.98).

Модель (1.97) можно рассмотреть в форме (1.61) в виде

$$\zeta(t) = \zeta_0 + V^{\vartheta}(t + \tau^{\vartheta}), \quad (1.99)$$

т.е. распределение

$$\zeta(t) \in N\{m[\zeta(t)], \sigma[\zeta(t)]\}, \quad (1.100)$$

с аргументами

$$\left. \begin{aligned} m[\zeta(t)] &= \ln \delta_0^\vartheta + m_{V^\vartheta}(t + \tau^\vartheta) \\ \sigma[\zeta(t)] &= \sigma_{V^\vartheta}(t + \tau^\vartheta) \end{aligned} \right\}, \quad (1.101)$$

или

$$\left. \begin{aligned} m[\zeta(t)] &= \ln \delta_0^\vartheta + m_{V^\vartheta} \tau^\vartheta + m_{V^\vartheta} t = m_{\zeta(0)} + m_{V^\vartheta} t \\ \sigma[\zeta(t)] &= \sigma_{V^\vartheta} \tau^\vartheta + \sigma_{V^\vartheta} t = \sigma_{\zeta(0)} + \sigma_{V^\vartheta} t \end{aligned} \right\}, \quad (1.102)$$

или

$$\left. \begin{aligned} m[\ln \delta^\vartheta(t)] &= m[\ln \delta^\vartheta(0)] + m_{V^\vartheta} t \\ \sigma[\ln \delta^\vartheta(t)] &= \sigma[\ln \delta^\vartheta(0)] + \sigma_{V^\vartheta} t \end{aligned} \right\}, \quad (1.103)$$

где

$$\tau^\vartheta = \frac{\sigma[\ln \delta^\vartheta(0)]}{\sigma_{V^\vartheta}}. \quad (1.104)$$

Так как

$$\zeta \in N\{m[\zeta(t)], \sigma[\zeta(t)]\}, \quad (1.105)$$

то $\delta^\vartheta(t)$ распределено по логарифмически нормальному закону с аргументами:

$$\begin{aligned} m[\delta^\vartheta(t)] &= \exp\{m_{\zeta(0)} + m_{V^\vartheta} t + 0,5[\sigma_{\zeta(0)} + \sigma_{V^\vartheta} t]^2\} = \\ &= \exp[\ln \delta_0^\vartheta + m_{V^\vartheta}(t + \tau^\vartheta) + 0,5\sigma_{V^\vartheta}(t + \tau^\vartheta)^2] = \\ &= \delta_0^\vartheta \exp[m_{V^\vartheta}(t + \tau^\vartheta) + 0,5\sigma_{V^\vartheta}(t + \tau^\vartheta)^2], \end{aligned} \quad (1.106)$$

$$\begin{aligned}
\sigma[\delta^{\vartheta}(t)] &= m[\delta^{\vartheta}(t)] \left\{ \frac{m^2[\delta^{\vartheta}(t)]}{m^2[\ln \delta^{\vartheta}(t)]} - 1 \right\}^{-\frac{1}{2}} = \\
&= m[\delta^{\vartheta}(t)] \left\{ \exp\left(\sigma_{V^{\vartheta}} \tau^{\vartheta} + \sigma_{V^{\vartheta}} t\right)^2 - 1 \right\}^{-\frac{1}{2}}.
\end{aligned} \tag{1.107}$$

Для распределения $\delta^{\vartheta}(t)$ с характеристиками (1.106) и (1.107) определение $P_m(t)$ в пределах $\pm \delta_g$ производится аналогично тому, как это показано в пункте А настоящего раздела.

Экспоненциальная модель изменения погрешностей каналов при $V^{\vartheta} \in N(m_{V^{\vartheta}}, \sigma_{V^{\vartheta}})$ и $m_{\delta}(0 - \tau^{\vartheta}) = \delta_0^{\vartheta}$ представлена на рис.1.9.

Время наработки на метрологический отказ ИК T_m^{ϑ} для нелинейной модели (1.61) процессов изменения ОП каналов распределено как случайная величина

$$T_m^{\vartheta} = \frac{\ln \delta_g - \ln \delta_0^{\vartheta}}{V^{\vartheta}} - \tau^{\vartheta}. \tag{1.108}$$

Тогда получают

$$f[T_m^{\vartheta}] = \frac{\beta^{\vartheta}}{(T_m^{\vartheta} + \tau^{\vartheta})\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\beta^{\vartheta}}{T_m^{\vartheta} + \tau^{\vartheta}} - \alpha^{\vartheta}\right)^2\right], \tag{1.109}$$

где параметрами альфа-распределение является

$$\beta^{\vartheta} = \frac{\ln \delta_g - \ln \delta_0^{\vartheta}}{\sigma_{V^{\vartheta}}},$$

$$\alpha^{\vartheta} = \frac{m_{V^{\vartheta}}}{\sigma_{V^{\vartheta}}}.$$
(1.110)

Для представления этих параметров через исходные статистические характеристики изменения ОП ИК для модели (1.61) при известных $m[\delta^{\vartheta}(t)]$ и $\sigma[\delta^{\vartheta}(t)]$ с учетом (1.41) получают:

$$\ln \delta_0^{\vartheta} = m[\zeta(0)] - \alpha^{\vartheta} \sigma[\zeta(0)] = m[\ln \delta^{\vartheta}(0)] - \frac{m_{V^{\vartheta}}}{\sigma_{V^{\vartheta}}} \sigma[\ln \delta^{\vartheta}(0)]$$
(1.111)

или

$$\delta_0^{\vartheta} = \frac{m[\delta^{\vartheta}(0)] \sigma_{V^{\vartheta}}}{\sigma[\delta^{\vartheta}(0)] m_{V^{\vartheta}}}.$$
(1.112)

По (1.109) находят $T_{\text{м min}}^{\vartheta}$

$$T_{\text{м min}}^{\vartheta} = \beta^{\vartheta} K_{\text{м}}^{\vartheta}(\alpha^{\vartheta}) = \frac{1}{2\sigma_{V^{\vartheta}}} \left\{ \ln \delta_g - m[\ln \delta^{\vartheta}(0)] + \frac{\sigma[\ln \delta^{\vartheta}(0)]}{\sigma_{V^{\vartheta}}} (m_{V^{\vartheta}} - 2\sigma_{V^{\vartheta}}) \right\}. \quad (1.113)$$

Расчет этой величины, так же как по (1.56) для линейных моделей, дает основание назначать межповерочные интервалы для контроля метрологических характеристик ИК при экспоненциальных моделях изменения их ОП.

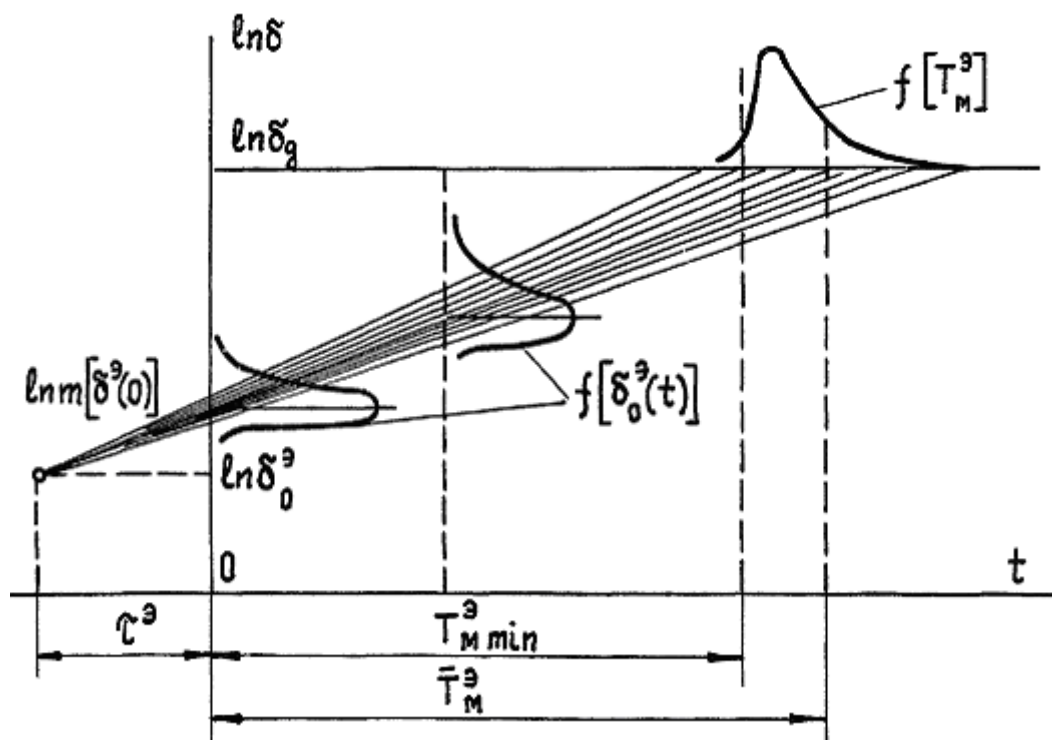


Рис. 1.9. Экспоненциальная модель изменения погрешностей каналов при $V^\vartheta \in N(m_{V^\vartheta}, \sigma_{V^\vartheta})$ и $m_\delta(0 - \tau^\vartheta) = \delta_0^\vartheta$

1.3.4. Определение статистических исходных данных для расчета метрологической надежности ИК

Как показано выше, для расчета надежности ИК по прогнозируемым отказам необходимы статистические оценки изменения ОП во времени. В простейшем случае для модели необходимо знать параметры плотности распределения ОП в начальный момент эксплуатации ИК (так называемая конструктивная метрологическая надежность ИК): $m_\Delta(0)$ и $\sigma_\Delta(0)$, и показатели нестабильности ОП во времени: математическое ожидание скорости дрейфа ОП $m_V(t)$ и ее СКО $\sigma_V(t)$. Для модели (1.61) кроме относительных значений параметров в начальный момент следует получить статистические оценки относительной скорости изменения логарифма ОП ИК, а при более сложных зависимостях $\delta(t)$ и $V_\delta(t)$ – характер этих зависимостей для конкретных ИК в ЦБП.

Так как определение ОП ИК даже с помощью ЭВМ осуществляется периодически, экспоненциальные зависимости можно построить по

дискретным данным для временных сечений T_k , в которых находятся параметры ОП при j -м контроле ОП. В соответствии с МУ 134–82 [9] поверка ИК систем производится по 6 точкам диапазона измерений. Поэтому для каждого ИК можно получить по 6 реализаций изменения ОП во времени.

В процессе периодических поверок или калибровок ИК ИИС осуществляется коррекция их ОП. При этом плотность распределения ОП j -го контроля будет определяться только плотностью распределения погрешности контроля:

$$f[\Delta(t)] = f[\Delta(T_k)]. \quad (1.114)$$

То же самое можно утверждать для операции метрологической аттестации и градуировки ИК. Тогда следует признать уровень, при котором производится контроль:

$$\Delta_g = m[\Delta(t)] \pm \kappa \sigma[\Delta(t)], \quad (1.115)$$

где $\kappa = 1,6$, а знаки ОП и Δ_g определяются знаком систематической составляющей $m[\Delta(t)] = \Delta_c$ измерительного канала, которая при контроле исключается.

Таким образом, экспериментальный ансамбль реализации, построенный по временным сечениям T_k , позволяет получить непрерывные семейства функций, аппроксимирующие изменение ОП $\Delta(t)$ в виде статистически определенных в каждый момент времени их параметров $m[\Delta(t)]$ и $\sigma[\Delta(t)]$.

Экспериментальные данные о распределении ОП ИК в начальный момент получают при наладке ИК после их монтажа и окончательно опытным путем устанавливают значения МХ ИК при первичной поверке и аттестации систем. В дальнейшем для типовых каналов при наличии предварительных статистических данных по характеристикам для нестабильности ИК устанавливают ориентировочные значения межповерочных интервалов с учетом заданных $P_m(t)$ и $P_m(T_m)$. Для

индивидуальных каналов на основе экспериментальных исследований нестабильности ОП ИК также прогнозируют наступление метрологических отказов. Однако в обоих случаях рекомендуется произвести второй контроль через интервал времени, приблизительно равный $0,5 T_{\text{min}}$. Это связано с неизученностью влияния на нестабильность ОП ИК условий эксплуатации. Если значения МХ находятся в зоне предсказанных значений, то принимаются решения об обслуживании ИИС по предварительным расчетам. В противном случае в них вносятся соответствующие уточнения об изменении МХ и сроках поверки или калибровки.

Задачами экспериментальных исследований реализации процессов изменения МХ ИК являются установление моделей их изменения и определение параметров метрологических свойств ИК в заданных условиях эксплуатации.

Эти исследования производятся в соответствии со следующей методикой.

1. По каждому (индивидуальному или типовому выделенному) ИК осуществляется поверка или калибровка в шести оцифрованных точках диапазона измерения технологического параметра.

2. В виде графика или таблицы представляются значения МХ ИК в процессе поверки или калибровки, а затем после коррекции параметров моделей ИК соответственно в виде законов распределения ОП и их числовых параметров.

3. По результатам периодического контроля ИК комплектно или поэлементно определяются характеристики нестабильности: изменения СКО ОП $\sigma[\Delta(t)]$ и математического ожидания $m[\Delta(t)] = \Delta_c$ без учета коррекции ОП в период j -го контроля, полагая для ОП $\Delta_{oz}(T_k) = 0$.

$$\Delta_c(T_k) = m[\Delta(t_j)] - m[\Delta(t_{j-1})] \quad (1.116)$$

4. Вычисляются оценки¹ средней скорости изменения ОП ИК в n -м межповерочном интервале $t_j - t_{j-1}$

$$\bar{V}_n^*[t_j] = \sum_{l=1}^{l=6} \frac{1}{e} V_l(t_j) = \sum_{l=1}^{l=6} \frac{\Delta_l(t_j)}{(t_j - t_{j-1})^l}, \quad (1.117)$$

где $l \in 1,6$ – число контрольных точек функции преобразования ИК в диапазоне измерения.

Затем при $j \in 1, J > 30$ производится сравнение оценок для получения линеаризованной модели, описывающей процессы изменения ОП во времени для исследуемых ИК.

Если

$$\bar{V}^*(t) = \text{var}, \quad (1.118)$$

то зависимость $\delta = f(t)$ аппроксимируется моделью (1.61).

5. Производится сравнение дисперсий в $j-l$ -х и j -х контрольных поверках калибровках. При $\sigma[\Delta(t)] \approx \text{const}$ реализации изменения ОП во времени аппроксимируются плавными непрерывными функциями изменения ОП во времени. При $\sigma[\Delta(t)] \approx \text{var}$ анализируются модели изменения ОП во времени с веерными функциями или другими статистическими зависимостями $\Delta(t)$ и $V_\delta(t)$, включая марковские процессы.

6. Определяются параметры моделей изменения ОП ИК во времени. Для простейшей модели $\Delta(t) = \Delta(0) \pm V^l \cdot t$ вычисляется оценка (*) средней скорости изменения ОП ИК

$$\bar{V}^* = \sum_{n=1}^N \frac{1}{N} \bar{V}_n^*(t_j), \quad (1.119)$$

где $n \in 1, N$ – число контрольных операций ОП ИК.

Если

¹ Оценки расчетных величин помечаются знаком *.

$$\sigma[\Delta(t)] = f(t), \quad (1.120)$$

то верная модель имеет параметры

$$m^*[\Delta(t)] = m^*[\Delta(0)] + \bar{V}^* \cdot t, \quad (1.121)$$

$$\sigma^*[\Delta(t)] = \sigma^*[\Delta(0)] + \sigma_V^* \cdot t, \quad (1.122)$$

и определяется оценка СКО изменения скорости дрейфа ОП во времени по зависимости:

$$\sigma_V^* = \sum_{n=1}^N \frac{\sigma_n^*[\Delta(t_j)] - \sigma_{n-1}^*[\Delta(t_{j-1})]}{N(t_j - t_{j-1})}. \quad (1.123)$$

Для однотипных ИК статистические оценки можно осреднить по всем ИК, если проверка гипотезы о несущественности различий между полученными оценками для средних значений скорости изменения их дисперсий подтверждается. В противном случае условия эксплуатации однотипных каналов в ИИС следует признать отличными для сравниваемых ИК.

Если предположение о линейной регрессии скорости изменения ОП на приращение ОП за один и тот же интервал времени не подтверждается, то следует поставить специальный эксперимент для наблюдения за изменением ОП ИК во времени, выделяя в каждой группе однотипных каналов такие, в которых эксплуатация элементов осуществляется в наихудших условиях, а требования к стабильности результатов измерений высокие. В этих каналах рекомендуется практически непрерывно производить фиксацию изменения выходных сигналов при подключении на вход датчиков образцовых мер измеряемых величин: стандартных образцов или контрольных встроенных (аттестованных) сигналов с наименьшим периодом контроля T_K .

1.3.5. Основы методики расчета метрологической надежности ИИС технологических измерений

В соответствии с имеющимися исходными данными для расчета метрологической надежности ИК систем следует различать два вида расчетов их показателей метрологической надежности.

Первый вид ориентировочных аналитических расчетов производится предварительно при проектировании ИК для конкретных систем управления ЦБП. Он необходим для сравнительного анализа ИК при выборе их конкретного использования в системах, включая реализацию способов контроля их метрологической исправности. При этом выбор способа, объема и глубины функционального метрологического контроля ИК, а также контроля точности параметров систем управления на стадии проектирования систем является таким же значимым, как и само создание этих систем. Такое положение подтверждается первыми результатами опытной эксплуатации АСУ ТП.

Для ориентировочного аналитического расчета показателей метрологической надежности ИК рекомендуется следующая последовательность операций.

1. В процессе ориентировочного аналитического расчета МХ p -х ИК определяются статистические оценки плотности распределения ОП ИК в начальный момент времени: $m^*[\Delta(0)]$ и $\sigma^*[\Delta(0)]$. Если исходные данные по МХ для линейных непрерывных квазианалоговых ИК позволяют определить только предельные суммарные результирующие погрешности, то следует полагать, что при нормальном законе распределения начальных значений ОП $m^*[\Delta(0)] = 0$, а вся предельная погрешность ОП характеризует случайную составляющую суммарной результирующей погрешности ИК и $\sigma^*[\Delta(0)] = \gamma(0) / \kappa$, где κ – коэффициент, определяющий доверительный интервал при принятой доверительной вероятности (в общем случае $\kappa = 1,6$).

2. Затем определяются, если не заданы по предварительным экспериментальным данным, статистические оценки дрейфа МК p -х ИК.

3. По полученным данным производится выбор математической модели расчета метрологической надежности каждого p -го ИК и вычисляются ориентировочные показатели метрологической надежности каналов в виде $P_M(t)$, $T_{M\min}$ и ω_M , пользуясь соответствующими зависимостями, приведенными в предыдущих разделах.

4. Если метрологическая исправность ИК должна поддерживаться не по одной, а по нескольким метрологическим характеристикам, то расчет показателей метрологической надежности производится по нескольким ОП для каждого ИК. Комплексная метрологическая исправность ИК находится по теореме умножения вероятностей с учетом их независимости или однозначной зависимости (при коэффициенте корреляции $\tau = 0 \div 0,7$ – независимы, при $\tau = 0,7 \div 1$ – зависимы).

5. Если необходимо оценить показатели метрологической надежности информационно-измерительной системы, полагая все МХ p -х ИК независимыми, найдем

$$P_{M \text{ ИИС}}(t) = \prod_{p=1}^P P_{Mp}(t), \quad (1.124)$$

$$P_{M \text{ ИИС}}(T_{M\min}) = \prod_{p=1}^P P_{Mp}(T_{M\min}), \quad (1.125)$$

где $p \in 1, P$ – число ИК в ИИС,

$T_{M\min}$ – минимальное значение наработки на метрологический отказ, встретившееся в системе.

Следует учитывать, что значения показателей в (1.125) характеризуют надежность ИИС между периодическими поверками (калибровками), в которых производится коррекция ОП.

При поверке (калибровке) в момент T_k , когда не вносятся поправки в ОП, интегральное значение $P_{M ИИС}(t)$ в любой последующий момент

$$P_{M ИИС}(t) = P_{M ИИС}(T_k)P_{M ИИС}(t/T_k), \quad (1.126)$$

где $P_{M ИИС}(t/T_k)$ – условная вероятность метрологической исправности ИИС в момент t при условии метрологической исправности ИИС в момент T_k .

6. Производится анализ полученных расчетных значений показателей метрологической надежности ИИС с учетом их надежности по непрогнозируемым отказам. Осуществляется их сравнение с заданными в ТЗ количественными характеристиками надежности для ИИС. Даются рекомендации по обслуживанию систем или принимается решение об их существенном улучшении, например, с помощью устройств встроенного контроля метрологической исправности.

Далее следует этап монтажа, наладки и опытной эксплуатации, в процессе которых осуществляется первичная и периодические поверки ИК и производится экспериментальное исследование МХ всех каналов. Полученные результаты являются исходными данными для метрологической аттестации систем и апостериорного расчета их показателей метрологической надежности, а также для априорного расчета надежности ИК – аналогов при проектировании в АСУ ТП для ЦБП.

Уточненный расчет надежности, который производится с использованием предложенной выше последовательности операций, рекомендуется осуществлять на ЭВМ. Он позволяет уточнить значения межповерочных интервалов для каждого канала или группы однотипных ИК, обосновать необходимость встроенного контроля метрологической исправности с учетом качества работ по обслуживанию без их автоматизации и получить данные по выбору оптимальных поверочных схем для реальных условий эксплуатации проектируемых ИК в конкретной АСУ ТП ЦБП.

Глава 2. ПОДХОДЫ К МЕТРОЛОГИЧЕСКОМУ ОБЕСПЕЧЕНИЮ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

2.1. Проблемы и задачи метрологического обеспечения систем управления

Метрологическое обеспечение систем управления как сложных технических систем, в которых одной из основных измерительных составных частей является информационно-измерительная система, имеет ряд особенностей² [10]. Так, виды работ по МО систем управления можно перечислить в соответствии с этапами их жизненного цикла.

1. Этап разработки систем управления.
 - 1.1. Установление метрологических требований – норм точности при создании систем управления.
 - 1.2. Разработка МВИ параметров технологических объектов управления и характеристик внешней среды.
 - 1.3. Ориентировочный расчет МХ измерительных каналов систем управления по характеристикам их элементов.
 - 1.4. Оценивание погрешностей определения многокомпонентных взаимосвязанных показателей в ИИС (для систем управления).
2. Этап проектирования систем управления.
 - 2.1. Метрологическая экспертиза разработки систем управления.
 - 2.2. Уточненный расчет МХ измерительных каналов по МХ их элементов с целью обоснованного выбора комплекса технических средств (КТС) измерительных каналов.
 - 2.3. Разработка методик выполнения измерения технологических величин, особенно узкоотраслевого назначения, измеряемых с помощью нестандартных средств измерения.
 - 2.4. Разработка программы метрологической аттестации измерительных каналов систем управления в целом.

² В дальнейшем ИИС рассматриваются как элемент в составе АСУ ТП, поскольку их МО имеет те же задачи и решения, которые присущи АСУ ТП.

- 2.5. Разработка методики метрологической аттестации ИК систем управления в целом.
- 2.6. Разработка методических указаний по поверке или калибровке ИК систем управления [9].
- 2.7. Метрологическая экспертиза п. 2.3-2.6 и рабочей документации технического проекта (в том числе паспортов ИК) систем управления.
- 3. Этап эксплуатации систем управления.
- 3.1. Оказание технической помощи в освоении нормативных документов на ИИС систем управления по их метрологическому обеспечению.
- 3.2. Метрологическая аттестация нестандартных средств измерений.
- 3.3. Метрологическая аттестация ИК ИИС систем управления.
- 3.4. Поверка и (или) калибровка ИК систем управления.
- 3.5. Метрологический надзор и обслуживание элементов и каналов систем управления.
- 3.6. Ведомственный контроль метрологического обеспечения систем управления – залог их высокого качества и надежности.

При невозможности выполнить требования к нормативам точности ИК принимается решение создания и внедрения в системы управления САМИ – их внедрение позволяет уменьшить трудозатраты на метрологический контроль и путем сокращения межповерочных интервалов уменьшить аппаратную погрешность ИК.

- 4. Этап создания САМИ для систем управления.
- 4.1. Разработка ТЗ и структур, алгоритмического обеспечения, комплекса технических средств, программного обеспечения САМИ.
- 4.2. Внедрение и опробование работы САМИ в системах управления.
- 4.3. Составление нормативных документов по обслуживанию САМИ, их метрологическая экспертиза.

К основным проблемам МО систем управления единичного производства, частным случаем которых являются типовые систем

управления, из перечисленных видов работ по их метрологическому обеспечению относятся следующие:

1. При составлении технических заданий на разработку систем управления и на этапе их разработки возникает проблема установления нормативов точности измерения технологических параметров. Она решается совместно разработчиками технологических процессов и оборудования и систем автоматизированного управления и контроля. Существующие подходы к теоретическому обоснованию нормативов точности измерения технологических параметров достаточно разнообразны, но не имеется общепринятого подхода к решению этой проблемы [7]. Наиболее разумный подход, который используется с той или иной степенью детализации математических зависимостей, заключается в применении теории ошибок первого рода при заданных рисках поставщика и заказчика при оценках качества продукции или (если удастся) качества технологических процессов. Причем имеется тенденция к различению этих оценок при аддитивных и мультипликативных критериях качества продукции и процессов, связанных любыми математическими зависимостями [7, 11].

2. Вторая проблема возникает на этапе проектирования систем управления, когда требуется обосновать выбор комплекса технических средств для измерительных каналов, которые должны иметь метрологические характеристики, обеспечивающие заданные нормативы точности при измерении технологических параметров [11]. Сюда же примыкает проблема рационального выбора средств управляющей техники для обеспечения заданных точностных характеристик управляющих каналов, если они предусматриваются при анализе качества и надежности систем управления.

3. На этапе внедрения систем управления при монтаже, наладке и в процессе эксплуатации проблемы МО выливаются в организацию метрологического контроля и обслуживания каналов систем: метрологическую аттестацию (после настройке каналов), периодическую

поверку или калибровку, ремонт, переградуировку, регулировку и т.п. Эти проблемы особенно важно решать для систем управления единичного производства, поскольку их метрологические свойства индивидуальны и зависят не только от используемых комплексов технических средств, но и от особенностей их реализации на технических объектах с учетом внешних условий работы объектов.

Эти проблемы подробно рассматриваются ниже, а здесь перечислим общие трудности, которые должны быть преодолены при метрологическом обеспечении систем управления.

Во-первых, элементы в измерительных каналах систем управления имеют неоднозначные по условиям нормирования МХ. Кроме того, часть элементов измерительных каналов не имеет нормированных МХ. Например: линии связи, процессоры, вспомогательные устройства. Это затрудняет поиск аппаратных погрешностей ИК при их расчете. Часто дополнительные погрешности элементов неизвестны и не учтены при расчете погрешностей каналов. При эксперименте оценка аппаратных погрешностей ИК в реальных условиях их эксплуатации и режимах работы систем управления, являющихся случайными функциями времени, невозможна, поскольку требуются значительные объемы статистических исследований воздействий внешних и внутренних влияющих величин.

Во-вторых, не удастся идентифицировать аппаратные погрешности ИК (с учетом или без учета погрешностей интерпретации результатов измерений) ввиду того, что датчики, установленные в объекты, недоступны для контроля со стороны входных измеряемых величин (рис.2.1). Поскольку в технологических процессах и оборудовании ЦБП часто измерению подлежат физические величины, не имеющие государственного и даже отраслевого метрологического обеспечения (также как и предназначенные для них средства измерения), анализ погрешностей их определения требует разработки методик выполнения измерений этих физических величин с требуемой погрешностью (по заданным нормативам точности). Только в этом случае

возможно установление реальных значений полной погрешности измерений таких физических величин.

В заключение следует подчеркнуть значительные организационные трудности, возникающие на предприятиях, эксплуатирующих системы управления, по обеспечению их качества и надежности (включая метрологическую надежность) [7]. Они заключаются в несогласованности действий различных служб предприятий по обслуживанию элементов систем управления в целом, в отсутствии четкого разграничения ответственности за работоспособность систем управления и их частей, а также в неквалифицированных действиях обслуживающего персонала. Последнее часто приводит к появлению дополнительных неисправностей в системах контроля и управления из-за ошибок в монтаже, наладке и контроле элементов в процессе их обслуживания.

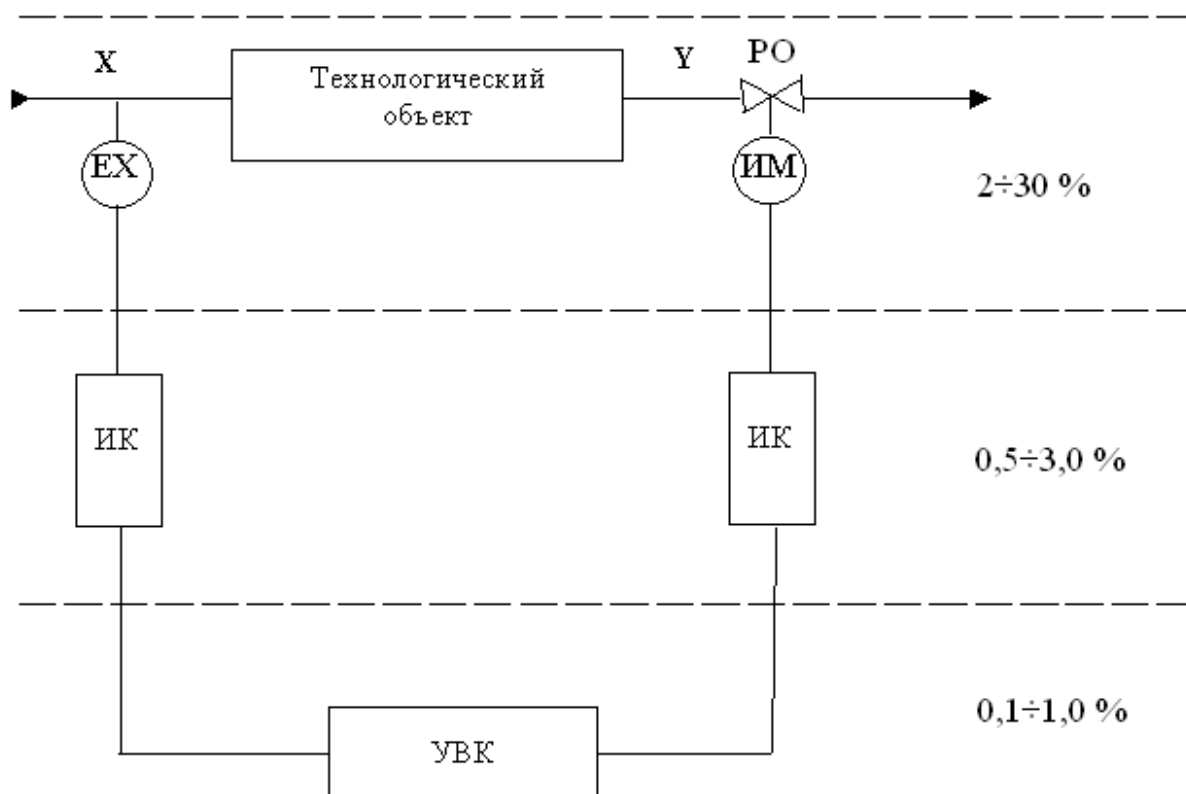


Рис. 2.1. Погрешности преобразования различных частей контуров управления

Выходом из такого положения, особенно в сложных системах управления, может служить создание и внедрение автоматического метрологического встроенного контроля на базе аппаратных средств, или с помощью программно-алгоритмических тестовых решений, или их сочетаний для технической диагностики метрологических свойств или неисправностей ИК систем управления. Причем метрологические характеристики ИК систем управления могут контролироваться с целью получения не столько правильных, а и воспроизводимых или сходимых результатов измерений технологических параметров [12].

Работы по МО создания систем управления выполняют подразделения-разработчики системы при участии и под методическим руководством метрологических служб организацией, участвующих в создании систем управления. В процессе эксплуатации системы работы по МО систем управления, как правило, возлагаются на метрологические службы, где применяют системы, в случае их отсутствия – на базовые метрологические организации.

Кратко рассмотрим задачи по МО создания систем управления на предпроектных стадиях, на стадии проектирования и вводе в эксплуатацию систем. В табл. 2.1 приведены виды работ по МО, стадии создания и эксплуатации системы, а также организации-исполнители, согласованные с заказчиками.

Обозначения, принятые в табл. 2.1:

ТЗ – стадия «Техническое задание»;

ТП – стадия «Технический проект»;

РД – стадия «Рабочая документация»;

КСА – стадия «Изготовление несерийных компонентов комплекса средств автоматизации (КСА)»;

В – стадия «Ввод в действие»;

Э – стадия «Эксплуатация»;

«++» – организация, ответственная за работу;

«+» – организация-соисполнитель;

«–» – организация не принимает участия в работе.

Работы, отмеченные в табл. 2.1 знаком «х», выполняются метрологическими службами соответствующих организаций, а остальные – под их методическим руководством.

Установление метрологических требований при проектировании систем управления производится на стадии ТЗ, при этом заказчик системы предоставляет исходные данные и устанавливает на их основе по результатам обследования ТОО номенклатуру параметров, подлежащих измерению, а также нормы на характеристики их погрешностей. Выделяют ИК, предназначенные для получения результатов измерения с нормированной точностью, и индикаторные каналы, которые предназначены для наблюдения за изменением параметров ТОО, без оценки их значений с нормированной точностью. ИК систем управления, информация которых используется в товарно-коммерческих операциях, при учете материальных ценностей, при охране здоровья трудящихся и для обеспечения безопасности условий труда, подвергают государственным испытаниям и государственной периодической поверке, срок которой устанавливают при их проведении и указывают в свидетельстве о государственной приемке.

Остальные ИК систем управления подлежат МА и первичной и периодической калибровке, которые осуществляются ведомственными метрологическими службами, как правило, имеющимися на предприятии, или метрологическими службами юридического лица, обладающими соответствующими правами.

МА ИК следует проводить в рабочих условиях эксплуатации системы. При проведении МА нестандартизованных СИ, входящих в структуру систем управления, важной задачей является определение /построение/ градуировочной характеристики СИ, представляющей собой зависимость между значениями входной – X и выходной – Y величин.

Для организации метрологического обеспечения систем управления в ЦБП существуют государственная метрологическая служба и метрологические службы юридического лица, которые осуществляют метрологический надзор и контроль для проверки соблюдения установленных метрологических правил и норм.

Метрологические службы должны проводить метрологический контроль и надзор путем:

- метрологической экспертизы технической документации систем управления;
- метрологического обоснования выбора компонентов систем контроля и управления, в основном, путем расчета метрологических характеристик ИК и подтверждения соответствия их заданным требованиям;
- надзора за проведением метрологической аттестации измерительных каналов;
- проверки своевременности предоставления специальных отраслевых средств измерений на испытание в целях утверждения типа, а также поверки или калибровки средств измерений и измерительных каналов;
- метрологической аттестации программно-алгоритмического обеспечения систем контроля и управления.

Таблица 2.1

Виды работ по метрологическому обеспечению

Виды работ по МО	Стадия создания и эксплуатации системы управления	Организации-исполнители		Примечание
		заказчик (пользователь)	разработчик системы управления	
Установление метрологических требований для проектирования системы управления.	ТЗ, ТП	+	++	

Виды работ по МО	Стадия создания и эксплуатации системы управления	Организации-исполнители		Примечание
		заказчик (пользователь)	разработчик системы управления	
Разработка (при необходимости) МВИ параметров ТОУ и характеристик внешней среды. Проектная оценка МХ ИК и характеристик погрешности измерительных функций, МХ измерительных частей ВК и УК	ТП, РД, КСА	–	++	
Разработка программ (ПМА) и методик метрологической аттестации и методических указаний по поверке ИК системы управления	ТЗ	–	++	х
Разработка ПМА нормированных СИ	ТЗ	–	++	х
Метрологическая экспертиза:				
отчетов о НИР;	ТП, РД	+	++	
технических заданий по созданию системы управления;	КСА	–	++	
проектной документации на систему управления;	ТП, РД	–	++	
технической документации на средства автоматизации;	В, КСА	+	++	
ПМА и методических указаний по поверке и (или) калибровке ИК системы управления;	В	–	++	
программы испытаний системы управления	Э	–	++	
Метрологическая аттестация НСИ	ТЗ, ТП	++	+	х
Метрологическая аттестация ИК системы управления	В	++	–	х
Поверка ИК системы управления, контроль функционирования индикаторных каналов	Э	–	++	х
Метрологический надзор за применяемыми СИ	РД, В, Э, ТЗ, ТП	–	++	х
Государственный метрологический надзор и ведомственный контроль МО системы управления	РД, В, Э, ТЗ, ТП			х

2.2. Метрологическая экспертиза технической документации на системы управления

Перечень работ по проведению метрологической экспертизы технической документации: общие требования к организации, порядку, методике проведения, ее содержанию установлены в МИ 2267-2000 ГСИ [13] и МИ 2177-91 ГСИ [14]. Необходимость проведения МЭ технической документации должна быть обусловлена не общими требованиями, а той пользой, которую она может принести конкретно предприятию, организации при разработке систем управления высокого качества.

Кратко рассмотрим содержание МЭ технического задания и проектной документации на создание системы управления.

В соответствии с [13, 14], в основных требованиях к МО систем управления необходимо иметь:

- предварительный перечень ИК;
- оценку требований к точности измерений параметров и (или) к МХ ИК;
- перечень управляющих и вычислительных каналов системы, для которых необходимо оценивать точностные характеристики;
- требования к МО входящих в ИК средств встроенного контроля, метрологической пригодности ИК и СИ, применяемых в системе;
- вид метрологической аттестации с указанием порядка ее выполнения.

Метрологическая экспертиза ТЗ на системы управления предполагает собой анализ, оценку полноты и правильности регламентации в ТЗ метрологических свойств ИК, а также измерительных частей вычислительных и управляющих каналов системы.

При необходимости выполнения на стадии разработки ТЗ соответствующего вида НИР производится МЭ ее материалов с целью обеспечения достоверности и качества проведения научных исследований [13,14].

Основной задачей МЭ материалов НИР является оценка правильности выбора и применения в процессе исследований в составе НИР материалов эскизной разработки системы, содержащих предварительный анализ основных алгоритмов измерения, контроля и управления, их экспериментальную проверку; предварительный выбор компонентов системы и их метрологического обоснования; определение требований к МХ ИК.

Целью проведения МЭ ТЗ является обеспечение полноты и правильности изложения в ТЗ:

- требований к системе управления по точности и времени решения ее измерительных функций, причем требования должны быть достаточны для обеспечения выполнения системой таких элементов функций, как учет, контроль, анализ и управление [13, 14];
- требований по нормированным МХ ИК;
- требований по нормированным точностным характеристикам измерительных частей вычислительных каналов и управляющих каналов системы [14];
- указаний по МА ИК, оценивании характеристик точности измерительных частей вычислительных и управляющих каналов.

Все изменения и дополнения к ТЗ подлежат МЭ в том же порядке, что и само ТЗ.

При проведении МЭ проверяют соблюдение в ТЗ правил и положений, установленных в метрологии и измерительной технике: терминологии; правил использования и применения единиц физических величин, их наименования и написания; правил записи показателей норм и требований в виде максимального и минимального значений и пределов допускаемых значений погрешностей определения параметров.

На основе анализа документов Государственной метрологической службы³, ряда научно-производственных объединений, занимающихся

³ Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии – Ростехрегулирование, в настоящее время – Росстандарт.

разработкой МО систем управления и ИИС, ниже рассматриваются основные вопросы проведения МЭ проектной документации на соответствующих стадиях создания системы управления.

При проведении МЭ раздела ТЗ «Требования к системе управления» необходимо проанализировать:

- требования к системе в целом;
- требования к видам обеспечения: по информационному обеспечению – к структуре технологического процесса сбора, обработки, передачи и представления данных; по техническому обеспечению – к видам технических средств, допускаемых к использованию, к их функциональным и эксплуатационным характеристикам; по МО – перечень контролируемых с помощью ИК системы параметров технологического объекта.

Последовательность действий при проведении МЭ может быть следующей:

- проверяется наличие перечня измерительных, вычислительных, управляющих функций и их достаточность;
- анализируются способы организации сбора исходных данных и получения измерительной информации и устанавливается необходимость разработки МВИ, в том числе и реализуемых программно-алгоритмическим способом;
- проверяется наличие требований к процессу сбора, обработки, передачи и представления данных в системе управления и их взаимосвязь с перечнем информационных функций;
- осуществляется проверка наличия и правильности требований к качеству реализации каждой измерительной функции;
- проверяется наличие правильной записи нормированных значений показателей точности преобразования измерительной информации для каждой вычислительной и управляющей функции;

- анализируются требования к входной и выходной измерительной информации на соответствие ее по виду и параметрам, применяемым источникам информации (объект управления, датчик и т.п.), по ее пользователям (измерительные части, вычислительные каналы, управляющие каналы и т.д.), соответственно;
- проверяются номенклатура, параметры и числовые значения параметров сигналов на соответствие нормированным значениям показателей точности получения, преобразования и выдачи измерительной информации, используемой в системе;
- контролируются наличие и полнота данных по информационному взаимодействию подсистемы и частей системы управления по каждой функции, задаче или по каждому их комплексу, обеспечивающим взаимодействие частей системы;
- проверяется наличие данных, оказывающих влияние на МХ ИК системы управления в условиях эксплуатации и внешних воздействиях – для системы в целом или для отдельных ТС в каждом месте их расположения, если эти условия и воздействия различны;
- оценивается соответствие по номенклатуре МХ ИК, измерительных частей ВК и УК структурным схемам ИК, измерительных частей ВК, УК – соответственно, а по числовым значениям – характеристикам точности реализации соответствующих функций системы управления;
- проверяется полнота перечня контролируемых параметров технологического объекта, а также способы нормирования и форма представления МХ и технических характеристик;
- проверяются требования, относящиеся к техническому обеспечению системы управления: наличие МХ СИ и точностных характеристик средств автоматизации, применяемых при компоновке ИК, измерительных частей вычислительных и управляющих комплексов,

соответствие указанных характеристик по номенклатуре, перечню МХ ИК, измерительных частей В и УК;

- проверяются наличие и корректность требований к сервисной аппаратуре, стендам для проверки системы управления, к методам и средствам встроенного контроля метрологической пригодности ИК системы, к метрологической аттестации алгоритмов и программ обработки данных измерений;
- анализируется возможность обеспечения процесса проектирования, изготовления, испытания и эксплуатации ИК и измерительных частей В и УК системы управления средствами измерений, в том числе и нестандартизованными (отраслевыми).

При проведении МЭ раздела ТЗ «Стадии создания» следует проверить полноту и правильность работ по МО, выполняемых на разных стадиях создания системы управления, сроки их выполнения и организации-исполнители. Основными работами могут являться: проектное оценивание характеристик точности, быстродействия измерительных функций системы управления, МХ ИК; МА ИК; испытаний в области МО системы.

При проведении МЭ раздела ТЗ «Порядок контроля и приемки» следует проверить наличие и обоснованность вида и метода проведения МА ИК, сведения о порядке проведения МА ИК, указания о порядке разработки, согласования и утверждения программы МА ИК, а также перечень В и УК, для которых следует выполнить оценку точности используемой измерительной информации.

МЭ проектной документации на стадиях технического проекта и рабочей документации представляет собой комплексную задачу по анализу полноты и правильности регламентации всех метрологических свойств системы и их соответствия установленным в ТЗ требованиям.

Целью проведения МЭ проектной документации являются: определение в документации условий, обеспечивающих единство измерений, выполняемых в системе управления, а также условий, обеспечивающих

единство измерений и испытаний, выполняемых при контроле качества системы управления.

Перечень проектных документов, подлежащих метрологической экспертизе, приведен в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Перечень проектных документов

№ п/п	Часть проекта	Наименование документа и его код	Стадии создания	
			ТП	РД
1	Общесистемная документация	Пояснительная записка к проекту. Формуляр системы	+	+
2	Документация функциональной части	Описание автоматизированных функций. Описание постановки задачи	+	
3	Документация математического обеспечения	Описание алгоритмов	+	
4	Документация информационного обеспечения	Перечень входных сигналов (документов). Перечень входных сигналов и данных	+	
5	Документация технического обеспечения	Описание комплекса технических средств. Перечень заявок на разработку новых технических средств	+	
6	Документация организационного обеспечения	Инструкция по эксплуатации		+

2.3. Расчет метрологических характеристик измерительных каналов систем управления

Аналитические методы расчета МХ ИК применяются в тех случаях, когда известны или могут быть рассчитаны оценки метрологических характеристик компонентов ИК. Кроме того, должны быть определены алгоритмы (формулы) расчета суммарной результирующей погрешности, которые в настоящее время подлежат в свою очередь аттестации [15].

Как известно, расчет МХ ИК необходим как на этапе разработки систем контроля и управления, так и при их проектировании. Это необходимо предусматривать для обоснования выбора компонентов ИК с целью обеспечения заданных требований технологов к характеристикам точности определения контролируемых или управляемых технологических величин, которые приводятся в регламентах на технологические процессы.

Обычно известных исходных данных для обоснованного расчёта результирующих погрешностей ИК системы управления по метрологическим параметрам их компонентов и заданным условиям и режимам работы компонентов каналов недостаточно. Между тем, эти расчетные методы определения погрешностей крайне необходимы, во многих случаях они являются единственно возможными. Например, при разработке и проектировании системы управления, когда нужно выбрать структурную схему и компоненты ИК, а также ориентировочно оценить точность измерения технологических величин при выполнении требований по обеспечению нормативов точности для технологических измерений.

В течение последних лет появилось значительное количество работ, описывающих способы расчета погрешностей ИК системы управления по известным погрешностям ее компонентов. Среди них можно выделить две крайние группы. В одной из них предлагаются наиболее сложные способы расчета, полагаемые точными. К этой группе относятся способы, излагаемые в методическом материале по применению ГОСТ 8.009-84 [15]. Во второй группе предлагаются наиболее простые, элементарные, но и, соответственно, теоретически менее точные способы расчета результирующих погрешностей ИК систем управления [7].

В способах первой группы расчета МХ ИК погрешности компонентов ИК системы управления приняты за случайные величины. При этих расчетах решаются следующие четыре задачи.

В первой задаче на вход ИК воздействует одна измеряемая величина, заданы условные (при данном значении входной величины) законы

распределения погрешностей компонентов, требуется определить закон распределения, математическое ожидание (как систематическую составляющую) погрешности ИК.

Вторая задача рассматривается аналогично первой, но на входы ИК воздействует несколько измеряемых величин.

В третьей задаче заданы только допуски (интервалы) на погрешности компонентов ИК, требуется определить интервал, в который попадает погрешность ИК.

В четвертой задаче элементы ИК приняты динамическими звеньями с погрешностями, представленными случайными процессами со своими частотными спектрами. При этом для каждого из элементов заданы условия эксплуатации в виде воздействия ВВВ, а для входных сигналов – их частотные спектры.

В решениях перечисленных двух первых задач погрешности ИИС рассматриваются как случайные величины, для которых характерны композиции законов распределения, а затем приводятся упрощающие условия (например, независимости или малости составляющих погрешностей), позволяющие в частных случаях найти приемлемые решения. При анализе третьей задачи обсуждаются возможные частные случаи, когда исходных данных может оказаться достаточно для ее решения. Поэтому для этих трех задач используют расчет погрешности ИК как случайных величин с идеализацией условий работы и реальных свойств каналов, т.е. их сводят ко второй задаче.

Четвертая задача расчета погрешностей ИК систем управления, наиболее полно отражающая учет реальных характеристик и условий работы ИК, не может быть решена для современных систем управления. Действительно, нормируемые метрологические характеристики СИ не отражают метрологических свойств элементов ИК, весьма существенно влияющих на погрешность систем. В ГОСТ 8.009-84 заложены необходимые

предпосылки по нормируемым погрешностям элементов ИК, однако этот стандарт до сих пор носит рекомендательный характер.

Итак, недостаток сложных способов расчета – отсутствие полных исходных данных, принципиально не позволяет пользоваться рассмотренными предложениями. Поэтому, полагая, что решение любой инженерной задачи сопровождается некоторой идеализацией рассматриваемых объектов, неизбежно приходим к необходимости воспользоваться упрощенными способами расчета МХ, основываясь на имеющихся в нашем распоряжении известных данных по метрологическим параметрам СИ – элементов ИК. При этом должны быть четко оговорены допущения, которые используются для упрощения способов расчета погрешностей ИК систем управления и которые необходимо впоследствии оценить количественно при экспериментальном исследовании метрологических характеристик элементов, каналов и систем.

В основу упрощенного расчета погрешностей ИК систем управления по известным погрешностям элементов положены следующие допущения:

1. Элементы, входящие в состав ИК систем, являются линейными или линеаризуемыми средствами измерения (как правило, в системах управления при незначительном диапазоне изменения управляемых параметров это допущение реализуется).

2. Погрешности элементов и результирующие погрешности каналов представляют величины второго порядка малости по сравнению с параметрами соответствующих номинальных статических характеристик преобразования элементов в ИК.

3. Отклонения значений метрологических характеристик каналов, вызываемые изменением погрешностей под действием изменения ВВВ в статических и динамических режимах, малы по сравнению с самими номинальными значениями МХ.

4. Погрешности элементов в ИК независимы друг от друга, т.е. их коэффициенты корреляции можно полагать близкими к значениям, характеризующим независимые величины.

5. Оценки пределов допускаемых погрешностей назначаются по ГОСТ 8.401-80 [16] для всех элементов ИК. Сопротивления отдельных элементов каналов согласованы между собой. Взаимные влияния элементов в каналах и между ИК не учитываются.

Первое, второе и третье условия практически выполняются (или должны выполняться для большинства систем). Пятое условие соблюдается для всех стандартных СИ в силу обязательности соблюдения ГОСТ 8.401-80. Что касается четвертого допущения, то оно справедливо для случайного сочетания различных принципов действия элементов ИК, находящихся в разных случайных режимах и условиях эксплуатации. Строгий учет взаимного влияния этих элементов и факторов приводит к резкому усложнению расчетов, в которых должны быть известны исходные данные об этих влияниях. Основываясь на приведенных выше допущениях, можно предложить два метода упрощенного расчета.

Первый ориентировочный метод расчета погрешностей каналов – метод статистического суммирования пределов приведенных погрешностей элементов и их составляющих. При этом статистически суммируются одинаковые доверительные интервалы при одних и тех же доверительных вероятностях для всех анализируемых элементов ИК независимо от законов их распределения. Композиция законов распределения погрешностей элементов для канала представляется нормальным законом распределения их плотностей вероятностей в соответствии с центральной предельной теоремой теории вероятностей. Если же в средствах измерений имеются значительные погрешности вариации, то они рассматриваются как систематические составляющие погрешности и аналитически суммируются с основной статической составляющей погрешностью.

Второй упрощенный метод расчета погрешности каналов – метод статистического суммирования составляющих погрешностей элементов и оценки суммарной результирующей погрешности ИК в виде предела допускаемой приведенной погрешности (рассмотрен ниже). При этом, если известны статистические характеристики погрешностей элементов и их составляющих, можно определить статистические характеристики погрешностей ИК. Однако, в большинстве случаев для элементов каналов известны пределы допускаемых погрешностей. Поэтому для упрощения расчета результирующей погрешности элементов и их сумм полагают справедливыми нормальные законы распределения как наименее информативные, а для вариации – равномерные законы распределения погрешностей.

Аналитический расчет погрешностей каналов ИК систем управления в связи с возможностью дальнейшего практического метрологического контроля ИК в статическом и динамическом режимах ведется для двух этих режимов.

Под *статическим* режимом (А) понимается такой режим измерений, при котором динамическая погрешность пренебрежимо мало влияет на общую погрешность измерений, т.е. измеряемую величину можно считать неизменной во времени для расчета погрешностей результатов измерений.

Режим измерений (В), при котором выходной сигнал средств измерений зависит не только от значений измеряемых величин, но и от их производных, называется *динамическим*.

Стационарным (или квазистационарным) режимом является режим, при котором математическое ожидание и дисперсия измеряемых величин и измерительных сигналов не зависят от времени, а их автокорреляционная функция зависит от разности временных интервалов.

Так как исходные статистические данные по элементам ИК (СИ) отсутствуют, то в соответствии с теми правилами нормирования, которые

используются для элементов ИК в ГОСТ 8.401-80 [16], оговорим их определение⁴.

Исходные данные по МХ элементов ИК

1. Для статического режима А в нормальных условиях эксплуатации ИК для каждого r -го элемента из НД, справочных данных, технического описания, принципа действия находится номинальная статическая характеристика

$$Y_r = f_{nr}(Y_{r-1}) = \kappa_{n0r} + \kappa_{n1r}Y_{r-1}, \quad (2.1)$$

где κ_{n0r} и κ_{n1r} – номинальные коэффициенты статической характеристики преобразования r -го элемента ИК в номинальном режиме;

f_{nr} – номинальная статическая характеристика преобразования r -го элемента;

Y_r и Y_{r-1} – измерительные сигналы (для первого элемента положим $Y_0 = X$, что упростит запись выражений для величины погрешностей элементов).

2. В качестве характеристик систематической составляющей статических погрешностей r -х элементов можно рекомендовать часть основной статической погрешности Δ_{ocr} и часть вариации показаний r -го элемента $\Delta_{всг}$ (если последняя значительна).

Если известно, с каким запасом Δ_{ocr} выпускаются СИ заводом-изготовителем, то в качестве оценки Δ_{ocr}^* следует принимать K_c -ю часть начальной погрешности с учетом вариации показаний, так как ее нормирование производится в виде дольного (кратного) значения предела допускаемой статической погрешности (при наличии случайной составляющей).

⁴ При отсутствии данных по МХ элементов их следует определять экспериментально или задавать в виде предела допускаемой погрешности.

$$\Delta_{ocr}^* = K_c [\Delta_{odr} + (K_r \Delta_{odr})_{ocr} - \Delta_{ozr}], \quad (2.2)$$

где Δ_{odr} – предел допускаемой основной статической погрешности r -го элемента ИК;

K_r – доля вариации показаний для r -го элемента;

Δ_{ozr} – запас погрешности r -го элемента, регламентированный при выпуске или поверке СИ;

$r \in 1, R$ – количество элементов в канале.

Знаки оценки систематических составляющих погрешностей r -го элемента ИК принимаются известными, исходя из вида предела допускаемых значений погрешностей для СИ, у которых классы точности нормируются в соответствии с ГОСТ 8.401-80 [16], равных⁵

$$\Delta_{odr} = a_r \quad (2.3)$$

или

$$\Delta_{odr} = \gamma_r Y_{r-1} = p_r Y_{r-1}, \quad (2.4)$$

где a_r и p_r – постоянные величины для r -го элемента ИК.

Если вариация преобразования отсутствует $\Delta_{ocr} = 0$, и (или) неизвестно значение Δ_{ozr} , то $\Delta_{ocr} = K_c a_r$ или $\Delta_{ocr} = K_c p_r Y_{r-1}$.

Для формул (2.2), (2.4) ГОСТ 8.401-80 [16] можно принять два решения:

- считать максимальное значение абсолютной основной статической погрешности, соответствующее $X = X_k$, пределом допускаемой основной погрешности;
- аддитивную и мультипликативную составляющие погрешности рассматривать отдельно, используя то же правило разделения этих погрешностей на систематические и случайные составляющие.

При втором решении оценки систематических составляющих погрешностей r -го элемента принимаются также в виде предела допускаемых

⁵ Знак оценки * далее опускаем.

значений погрешностей для СИ, у которых классы точности нормируются в соответствии с ГОСТ 8.401-80, равные при использовании формулы (2.4)

$$\Delta_{ocr} = K_c [q_r Y_{r-1} (1 + K_r) - \Delta_{ozr}] = f(Y_{r-1}), \quad (2.5)$$

с учетом формулы (2.2)

$$\Delta_{ocr} = K_c [(a_r + b_r Y_{r-1})(1 + K_r) - \Delta_{ozr}] = f(Y_{r-1}), \quad (2.6)$$

и с учетом формулы (2.5)

$$\Delta_{ocr} = K_c \{ [d_r |Y_{r-1}| + Y_{r-1}(c_r - d_r)](1 + K_r) - \Delta_{ozr} \} = f(Y_{r-1}), \quad (2.7)$$

где q_r , a_r , c_r и d_r - постоянные величины для r -го элемента ИК,

а для первых элементов ИК вместо Y_0 следует подставлять X .

В (2.5) – (2.7) все абсолютные погрешности элементов ИК представляют собой зависимости от измеряемых величин или сигналов.

3. В качестве характеристик случайных составляющих $\overset{o}{\Delta}_{or}$ погрешностей r -х элементов полагаем аналогичные значения основной статической погрешности и вариации преобразования, известные в виде предела допускаемых погрешностей.

При принятом допущении о законах распределения погрешностей оценки пределов допускаемых значений СКО случайных составляющих погрешностей r -го элемента ИК для K_p при $p = 0,95$ [9] определим для (2.3):

$$\sigma \left[\overset{o}{\Delta}_{or} \right] = \left[\frac{1}{K_p^2 K_c^2} (a_r - \Delta_{ozr})^2 + \frac{K_r^2 a_r^2}{12} \right]^{1/2}, \quad (2.8)$$

для выражения (2.4)

$$\sigma \left[\overset{o}{\Delta}_{or} \right] = \left[\frac{1}{K_p^2 K_c^2} (p_r Y_{r-1} - \Delta_{ozr})^2 + \frac{K_r^2 p_r Y_{r-1}}{12} \right]^{1/2}, \quad (2.9)$$

для выражения (2.5)

$$\sigma \left[\overset{o}{\Delta}_{or} \right] = \left[\frac{1}{K_p^2 K_c^2} (q_r Y_{r-1} - \Delta_{or})^2 + \frac{1}{12} (K_r q_r Y_{r-1})^2 \right]^{1/2} = f(Y_{r-1}), \quad (2.10)$$

для выражения (2.6)

$$\sigma \left[\overset{o}{\Delta}_{or} \right] = \left\{ \frac{1}{K_p^2 K_c^2} \left[((a_r + b_r Y_{r-1}) - \Delta_{or})^2 \right] + \frac{1}{12} [K_r (a_r + b_r Y_{r-1})]^2 \right\}^{1/2} = f(Y_{r-1}), \quad (2.11)$$

для выражения (2.7)

$$\sigma \left[\overset{o}{\Delta}_{or} \right] = \left\langle \frac{1}{K_p^2 K_c^2} \left\{ [d_r |Y_{r-1}| + Y_{r-1} (c_r - d_r)] - \Delta_{or} \right\}^2 + \frac{K_r^2}{12} [d_r |Y_{r-1}| + Y_{r-1} (c_r - d_r)]^2 \right\rangle^{1/2} = f(Y_{r-1}). \quad (2.12)$$

4. Для определения нестабильности МХ ИК во времени следует принять, что за гарантированный срок эксплуатации конкретных r -х СИ их погрешность в виде предела допускаемых значений не превысит заданного размера, определяемого его классом точности [16], а при упрощенном расчете линейная равномерная скорость изменения систематической составляющей r -го ИК составит

$$V_{\Delta r} = \frac{\Delta_{or}}{T_{Gr}}, \quad (2.13)$$

где T_{Gr} – гарантированный срок сохранения класса точности r -го СИ или указанный межповерочный интервал.

Если Δ_{or} неизвестно, то для наихудшей оценки $V_{\Delta max}$ вместо Δ_{or} принимают Δ_{odr} , а для наилучшей оценки $V_{\Delta min}$ принимают $K_c \Delta_{odr}$ (например, $0,5 \Delta_{odr}$).

Таким образом, оценка изменения основной систематической составляющей погрешности из-за старения $\Delta_{ocr}(T)$ должна быть произведена для всех r -х элементов за конкретный непродолжительный период их эксплуатации T

$$\Delta_{ocr}(T) = V_{\Delta r} \cdot T, \quad (2.14)$$

что наряду с учетом случайной составляющей погрешностей дает ориентировочные основания для назначения первых поверок или калибровок ИК.

5. При анализе влияния рабочих условий эксплуатации элементов ИК на их МХ в пределах, допускаемых для СИ их значений, необходимы следующие исходные данные для элементов ИК: либо наибольшие допускаемые изменения МХ $\Delta I(\xi)$, перечисленные в п. 1 – 3 и вызванные изменением ВВВ ξ ; либо функции влияния ВВВ $\psi(\xi)$ на МХ элементов ИК, перечисленных в п. 1 – 3 в виде зависимости от влияющих величин ξ_j , $j \in 1, m$.

Эти данные обычно приводятся в НД на СИ. Их отсутствие в НД следует расценивать как тот факт, что соответствующие составляющие погрешностей для этого типа СИ незначительны. Так как ВВВ влияют на характеристики случайной составляющей погрешности существенно меньше, чем на систематическую составляющую погрешности СИ, то для таких СИ указывают только основную статическую погрешность и ее составляющие в номинальных условиях эксплуатации, которые определяются случайными разбросами параметров $f(Y)$. Может оказаться, что область применения подобных СИ строго регламентирована и их следует использовать только при заданных ВВВ.

Во всех сомнительных случаях можно рекомендовать провести экспериментальное определение МХ конкретных типов СИ или, если возможно, получить данные по их метрологическому контролю от предприятий отрасли.

Как правило, ВВВ для элементов ИК задаются (или уточняются при проектировании систем) возможными пределами своего изменения: нижний ξ_{jn} и верхний ξ_{jb} , которые должны входить в зону допустимых для конкретного СИ значений, т.е. $\xi_{jn} < \xi_{ном} < \xi_{jb}$, где $\xi_{ном}$ – номинальный режим работы элемента ИК по j -й ВВВ [16].

При упрощенном расчете МХ ИК, по-видимому, следует остановиться на оценке наибольшего возможного значения погрешностей ИК под действием всех ВВВ, т.е. произвести оценку суммарной результирующей погрешности ИК сверху.

В этом случае при заданной функции влияния $\psi(\xi)$ можно перейти к наибольшему допускаемому изменению МХ r -х элементов ИК по формуле:

$$\Delta I(\xi_j)_r = \frac{d\psi(\xi_j)_r}{d\xi_j} \Big|_{\max} (\xi_{bjr} - \xi_{номjr}), \quad (2.15)$$

что придает единообразие исходным данным по ВВВ. Хотя способ нормирования функцией влияния $\psi(\xi_{номjr})$ предпочтителен, особенно в том случае, если можно для конкретных элементов ИК выявить подробные статистические оценки ξ . При этом функции влияния перестают быть детерминированными и становятся функциями случайных аргументов. Расчет таких влияний усложняется, но полученная точность оценки их влияния на систематическую (в основном) и случайную (как детерминированные величины) составляющие погрешностей элементов позволяет более подробно проанализировать МХ ИК в условиях ЦБП и их изменения во времени.

6. Для динамического режима работы ИК (режим **В**) для стационарных изменений входной величины и измерительных сигналов во времени предлагается представлять элементы ИК передаточными функциями $W_r(p)$. В качестве исходных данных по оценке динамических составляющих

погрешностей следует получить автокорреляционную функцию $R(Y_o(\tau))$ или спектральную плотность $S(Y_o(\omega))$ случайной составляющей флуктуации исследуемой величины (диффузности свойств объекта). Эти исходные данные могут быть определены при экспериментальном обследовании характеристик объекта, для которого предназначена ИК.

Так как абсолютное большинство элементов ИК рассматривается в виде линейных апериодических звеньев, которые для приближенного расчета МХ ИК можно представить в виде

$$W_r(p) = \frac{k_{H12}}{T_r p + 1}, \quad (2.16)$$

то переходная характеристика такого СИ определяется известным соотношением

$$h_r(t) = W_r(o) \left(1 - e^{-\frac{t}{T_r}} \right). \quad (2.17)$$

Отсюда нетрудно определить время установления показаний t_{Y_r} , которые обычно задаются на СИ:

$$t_{Y_r} = T_r \ln \frac{W_r(o)}{\Delta_{odr}} = T_r \ln \frac{k_{H1r}}{\Delta_{odr}}. \quad (2.18)$$

Зная допускаемое значение основной статической погрешности Δ_{odr} и k_{H1r} , где k_{H1r} – параметр номинальной статической функции преобразования r -го элемента, находят:

$$T_r = \frac{t_{Y_r}}{\ln \frac{k_{H1r}}{\Delta_{odr}}}, \quad (2.19)$$

что полностью определяет искомый вид передаточной функции r -го элемента ИК. Если вид передаточных функций элементов другой, нетрудно для

простейших моделей динамических свойств элементов ИК получить параметры, которые определяют их передаточные функции [17].

Аналитический расчет МХ ИК по МХ r -х элементов производится в следующей последовательности.

Для статического режима работы ИК

1. Находят номинальную статическую характеристику преобразования ИК:

$$Y_{нук} = f(X_0) = Y_R = k_{н0ук} + k_{н1ук}X_0, \quad (2.20)$$

где

$$k_{н1ук} = \prod_{r=1}^R k_{н1r} \quad (2.21)$$

– коэффициент преобразования или чувствительность ИК;

$$k_{н0ук} = \sum_{r=1}^{R-1} \left[k_{н0r} \left(\prod_{k=r+1}^R k_{н1k} \right) \right] + k_{н0R}, r \in 1, R \quad (2.22)$$

– параметр, определяющий смещение нулевого значения статической функции преобразования ИК, а $k_{н1r}$ и $k_{н0r}$ – параметры функции r -х преобразователей в ИК.

Например, для ИК, состоящего из трех ($R = 3$) элементов, при $Y_0 = X$ получают:

$$Y_{нук} = f_n(X) = Y_3 = k_{н13}k_{н12}k_{н01} + k_{н13}k_{н02} + k_{н03} + k_{н13}k_{н12}k_{н11}X, \quad (2.23)$$

где функции преобразования r -х элементов $Y_{н1} = b_{н01} + b_{н11}X$, $Y_{н2} = b_{н02} + b_{н12}Y_{н1}$ и $Y_{н3} = b_{н03} + b_{н13}Y_{н2}$.

2. Определение основной статической систематической составляющей погрешности ИК по известным пределам допускаемых их значений для каждого r -го элемента производится:

- алгебраическим суммированием аддитивных составляющих в абсолютной форме:

$$\Delta_{осик}^a = \sum_{r=1}^R \Delta_{ocr}^a, \quad (2.24)$$

где Δ_{ocr}^a – абсолютные оценки аддитивных систематических составляющих погрешностей r -х элементов (независимых от $Y_0 = X$);

- алгебраическим суммированием мультипликативных составляющих в относительной форме:

$$\delta_{осик}^M = \sum_{r=1}^R \delta_{ocr}^M, \quad (2.25)$$

где δ_{ocr}^M – относительные оценки мультипликативных систематических составляющих погрешностей r -х элементов.

Например, для ИК при $R = 3$ для конечного значения функции преобразования X_k при неизвестном запасе ($\Delta_{озr} = 0$) и отсутствии погрешности вариации ($\Delta_{ocr} = 0$, т.е. $K_r = 0$) получим для (2.7):

$$\Delta_{осик}^a = K_c \sum_{r=1}^3 d_r |X_k| \quad (2.26)$$

и

$$\delta_{осик}^M = K_c \sum_{r=1}^3 (c_r - d_r). \quad (2.27)$$

3. Случайные составляющие погрешностей ИК в нормальных условиях и статическом режиме работы элементов ИК суммируются по правилам суммирования дисперсий независимых величин

$$D \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta_{оик} \end{bmatrix} = \sum_{r=1}^R D \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta_{ор} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

или

$$\sigma \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta_{оик} \end{bmatrix} = \left\{ D \begin{bmatrix} 0^a \\ \Delta_{оик} \end{bmatrix} + D \begin{bmatrix} 0^M \\ \Delta_{оик} \end{bmatrix} Y_0^2 \right\}^{1/2} = \left\langle \sum_{r=1}^R D \begin{bmatrix} 0^a \\ \Delta_{ор} \end{bmatrix} + \left\{ \sum_{r=1}^R D \begin{bmatrix} 0^M \\ \Delta_{ор} \end{bmatrix} \right\} Y_{r-1}^2 \right\rangle^{\frac{1}{2}}, \quad (2.29)$$

где $D \begin{bmatrix} 0^a \\ \Delta_{or} \end{bmatrix}$ и $D \begin{bmatrix} 0^m \\ \Delta_{or} \end{bmatrix}$ – дисперсии аддитивной и мультипликативной

случайных составляющих погрешностей элементов ИК.

Например, для ИК при $R = 3$ и $\Delta_{or} = 0$ и $K_r = 0$ при нормировании всех трех элементов классов точности по относительной погрешности – двухчленной формулой, т.е. для (2.12)

$$\sigma^2 \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta_{оик} \end{bmatrix} = \frac{1}{K_p^2 K_c^2} \sum_{r=1}^{R=3} [d_r |Y_{r-1}| + Y_{r-1} (c_r - d_r)]^2 \quad (2.30)$$

или в соответствии с формулой (2.29)

$$\begin{aligned} \sigma^2 \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta_{оик} \end{bmatrix} &= \\ &= \frac{1}{K_p K_c} \left\langle \sum_{r=1}^{R=3} d_r^2 |Y_{r-1}|^2 + \sum_{r=1}^{R=3} \left\{ (c_r - d_r)^2 + \frac{1}{Y_{r-1}} [d_r (c_r - d_r) |Y_{r-1}|] \right\} Y_{r-1}^2 \right\rangle^{1/2} \end{aligned} \quad (2.31)$$

при $Y_0 = X$.

4. Зная систематическую и случайную составляющие результирующей погрешности ИК, можно найти суммарное их значение в виде доверительного интервала, в котором с вероятностью P (при нормальном законе распределения погрешностей канала) находится погрешность ИК

$$\Delta_{осик}^a + \delta_{осик}^m X - K_p \sigma [\Delta_{оик}^o] < \Delta_{оик}(X) < \Delta_{осик}^a + \delta_{осик}^m X + K_p \sigma [\Delta_{оик}^o], \quad (2.32)$$

где σ – СКО случайной погрешности ИК в общем случае также функционально связано с X (2.31);

K_p – коэффициент, определяемый P и, как было принято из [9], $K_p = 1,6$ при $P = 0,95$.

5. Если есть данные о нестабильности погрешностей ИК во времени (2.14), то к аддитивной основной систематической составляющей погрешности ИК следует добавить погрешность от нестабильности r -х элементов ИК, рассчитанных по формуле:

$$\Delta_{осик}(T) = \sum_{r=1}^R \Delta_{ocr}(T), \quad (2.33)$$

где T – период эксплуатации ИК, одинаковый для всех элементов, что для СИ справедливо.

Тогда суммарная результирующая основная статическая погрешность ИК будет функцией не только X , но и T : $\Delta_{оик}(X, T)$.

6. Определение погрешности в реальных условиях эксплуатации ИК $\Delta_{рик}$ от ВВВ производится с помощью оценки предела допускаемых дополнительных погрешностей r -го элемента ИК при воздействии конкретного набора ВВВ на каждый r -й элемент ИК, а именно:

$$\Delta_{рик}^2 = \sum_{r=1}^R (\Delta_{\xi r} + \Delta_{or})^2, \quad (2.34)$$

где дополнительная погрешность r -го элемента ИК

$$\Delta_{\xi r}^2 = \sum_{j=1}^m \Delta_{\xi rj}^2, \quad j \in 1, m, \quad (2.35)$$

находится с учетом каждого j -го ВВВ

$$\Delta_{\xi rj} = \psi_{ryg}(\xi_j)_{\max} (\xi_{\epsilon j} - \xi_{номj}) \quad (2.36)$$

или

$$\Delta_{\xi rj} = \Delta l_r(\xi_j)_{\max}. \quad (2.37)$$

Тогда в реальных условиях эксплуатации ИК систематическая статическая погрешность ИК составит

$$\Delta_{ик} = \Delta_{осик}^a + \Delta_{осик}(T) + \Delta_{\xi ик} + \mathcal{D}_{осик}^M X, \quad (2.38)$$

а случайную составляющую в приближенном расчете для статического режима в реальных условиях считаем постоянной (2.27), независимой от времени и условий эксплуатации.

Действительно, воздействие ВВВ носит функциональный характер и проявляется случайно, только из-за случайного характера воздействия ВВВ. Поэтому учет воздействия случайных величин ВВВ на систематическую и случайную составляющие погрешностей элементов и ИК достаточно сложен даже при уточненных аналитических расчетах погрешностей ИК [15], а при отсутствии достоверных исходных данных, как в случае использования ИК для ЦБП, совсем неоправдан.

Тем не менее, важно при расчете погрешностей ИК в реальных условиях ЦБП рассматривать влияющие величины для каждого элемента отдельно и по номенклатуре $j \in 1, m$, и по диапазону их изменения $\xi_n - \xi_b$, поскольку они существенно отличаются для элементов в каждом канале и для АСУ ТП в целом, кроме, естественно, элементов системы, расположенных в специальных помещениях.

Для динамического стационарного режима работы ИК⁶

По передаточным функциям r -х элементов ИК определяем передаточную функцию ИК

$$W_{ик}(p) = \prod_{r=1}^R W_r(p) = \frac{k_{н1ик}}{T_{ик}p + 1}, \quad (2.39)$$

где $T_{ик} = f(T_2)$ – постоянная времени ИК [17].

При известной $S_X(\omega) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} R_X(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau$ или $R_X(\tau)$ для

измеряемой величины $X(t)$, которая непосредственно воспринимается датчиком и представляет случайный стационарный центрированный процесс, математическое ожидание динамической погрешности ИК равно нулю. Дисперсия динамической погрешности ИК составит:

⁶ Для нестационарных режимов работы ИК в объектах ЦБП оценка их динамических свойств может быть произведена в виде систематических составляющих динамических погрешностей по известным взаимно- и автокорреляционным функциям, представляющим статические характеристики системы первичных преобразований.

$$D[\Delta_{ик}(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} S_X(\omega) |W_{ик}(j\omega) - W_{ик}(0)|^2 d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} S_X(\omega) |W_{ик}(j\omega) - k_{ик}|^2 d\omega. \quad (2.40)$$

В общем случае динамическая погрешность ИК, приведенная к его выходу, может быть определена из выражения:

$$\Delta_{ик}(t) = [W_{ик}(p) - W_{ик}(0)]X(p). \quad (2.41)$$

Тогда для любого вида $X(p)$ при известных $W_{ик}(P)$ находим динамическую погрешность как характеристику измерительного канала, поскольку, кроме знания свойств ИК, необходимо представление особенностей измеряемой величины. Поэтому в этом разделе подчеркнем необходимость определять (или нормировать) и контролировать постоянство параметров ИК в динамическом режиме, так как их изменение приводит к изменению результирующих погрешностей результатов определений технологических параметров.

Для оценки динамических свойств ИК, например, времени установления показаний, осуществляют переход от $t_{ик}$ к $t_{уик}$ по формуле (2.18).

В динамическом режиме систематическая составляющая погрешности ИК $\Delta_{ик}$ при отсутствии корреляции между X и MX ИК остается прежней, а к случайной составляющей добавляется дисперсия динамической погрешности ИК

$$\sigma \left[\begin{smallmatrix} 0 \\ \Delta_{ик}(t) \end{smallmatrix} \right] = \left\{ D \left[\begin{smallmatrix} 0 \\ \Delta_{оик} \end{smallmatrix} \right] + D[\Delta_{ик}(t)] \right\}^{1/2}. \quad (2.42)$$

Приведем пример. Пусть для измеряемой величины $X(t)$ на входе ИК характерно изменение амплитуды и фазы при приблизительно постоянной частоте. Представим такую величину гармоническим сигналом с фиксированной частотой ω_0 , переменной амплитудой A_m и фазой γ :

$$X(t) = A_m e^{j(\omega_0 t + \gamma)}. \quad (2.43)$$

Автокорреляционная функция такого сигнала в стационарном режиме выражается в виде [17]:

$$R_X(\tau) = \frac{1}{2} D[A_M] \cos \omega_0 \tau, \quad (2.44)$$

где $D[A_M]$ – дисперсия случайного изменения A_M измеряемой величины $X(t)$.

Спектральная плотность функции (2.44) находится из выражения [17]:

$$S_X(\omega) = \frac{\pi}{2} D[A_M] [\delta(\omega - \omega_0) + \delta(\omega + \omega_0)], \quad (2.45)$$

где $\delta(\omega - \omega_0)$ и $\delta(\omega + \omega_0)$ – дельта-функции.

Дисперсия динамической погрешности при измерении такой величины составит:

$$D[\Delta_{ук}(t)] = \frac{\pi}{2} D[A_M] \int_{-\infty}^{\infty} |W_{ук}(j\omega) - W_{ук}(0)|^2 [\delta(\omega - \omega_0) + \delta(\omega + \omega_0)] d\omega, \quad (2.46)$$

что в соответствии с правилами интегрирования дельта-функций позволяет получить:

$$D[\Delta_{ук}(t)] = \pi D[A_M] |W_{ук}(j\omega) - k_{н1ук}|^2. \quad (2.47)$$

При (2.39) и реальных $T_{ук}$ (2.47) приблизительно можно представить в виде $D[\Delta_{ук}(t)] = \pi k_{н1ук}^2 D[A_M]$ при $\frac{j\omega T_{ук}}{1 + j\omega T_{ук}} \approx 1$. Тогда, например, для ИК

при $R = 3$ с $D[\Delta_{оук}]$, найденной по (2.30), оценка СКО случайной составляющей погрешности в динамическом режиме составит:

$$\sigma \left[\Delta_{ук}(t) \right] = \pm \frac{1}{4} \left\{ \sum_{r=1}^{R=3} [d_2 |Y_{r-1}| + Y_{r-1} (c_r - d_r)]^2 + \pi k_{н1ук}^2 D[A_M] \right\}^{1/2}. \quad (2.48)$$

Составляющая $D[A_m]$ по существу представляет диффузность измеряемой величины X и характеризует случайную составляющую погрешности представления X с помощью заданного ИК.

Для расчета суммарной результирующей погрешности ИК $\Delta_{ик}$ в динамическом стационарном режиме используют максимальное значение доверительного интервала, которое с доверительной вероятностью P не должна превышать реальная погрешность ИК:

$$\Delta_{ик}(X, T, t) \leq \Delta_{осик}^a + \Delta_{осик}(T) + \Delta_{\xi_{ик}} + \delta_{осик}^M X + K_p \left\{ D \left[\begin{smallmatrix} 0 \\ \Delta_{оик} \end{smallmatrix} \right] + D[\Delta_{ик}(t)] \right\}^{1/2}, \quad (2.49)$$

где $K_p = f(P)$, полагая для $\Delta_{ик}$ нормальный (или известный) закон распределения его погрешностей.

Это приближенное аналитическое значение погрешности ИК может быть уточнено при наличии исходных статистических данных по погрешностям элементов ИК, либо путем экспериментального их исследования (при внедрении МУ 134-82), либо при получении данных в соответствии с ГОСТ 8.009-84 от заводов-изготовителей СИ.

В заключение следует указать, что принципиальных вычислительных трудностей аналитический расчет погрешностей ИК систем управления не вызывает, какой бы сложности он ни был, особенно при возможности использования компьютерных программ для вычислительных операций. Однако при неполных и недостоверных исходных данных для подобных расчетов простые алгоритмы вычисления МХ ИК более предпочтительны. Они дают разработчикам систем количественное представление о вкладах отдельных элементов в результирующую погрешность ИК, о статической и динамической функциях преобразования каналов, а также о сравнительной величине составляющих в суммарной результирующей погрешности ИК. Это позволяет производить выбор элементов ИК более рационально,

применительно к условиям их использования как в системе, так и в объекте и на конкретном предприятии ЦБП.

2.4. Метрологическая аттестация измерительных каналов систем управления

В соответствии с перечнем видов работ по метрологическому обеспечению систем управления в нее входят в обязательной форме разработка программ и методик метрологической аттестации измерительных каналов АСУ, организация и проведение МА ИК систем управления [18].

Программы и методики МА для систем управления разрабатывает организация – разработчик системы управления, согласует с организацией (предприятием) – заказчиком и утверждает организация (предприятие), проводящее МА. Измерительные каналы систем управления, информация которых предназначена для использования в товарно-коммерческих операциях, при учете материальных ценностей, при охране здоровья и обеспечении безопасных условий труда, следует подвергать государственным испытаниям, т.е. проводить испытания с помощью государственных организаций метрологической службы. Измерительные каналы систем управления, информация от которых не используется для перечисленных выше целей, проходит ведомственную МА, т.е. с помощью ведомственных метрологических служб.

При разработке программы и методики МА устанавливают [18]:

- вид МА (со ссылкой на техническое задание при разработке системы управления);
- перечень измерительных каналов системы управления, подлежащих МА и конкретному ее виду;
- методику определения МХ измерительных каналов (экспериментальную или расчетно-экспериментальную);
- условия проведения МА (нормальные или рабочие условия);
- формы представления результатов МА;

- сроки очередного метрологического контроля измерительных каналов – поверки или калибровки системы управления.

Как известно, система управления, ИК которой не прошли МА, не допускается в эксплуатацию. Если эти каналы составляют менее 20 %, тогда конкретные каналы могут использоваться как индикаторные, а вся система допускается к эксплуатации.

Организация и порядок проведения МА системы управления устанавливает руководящий материал РМ 25 881-88, разработанный Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии измерительных и управляющих систем (ВНИИМИУС). Эта методика устанавливает:

- перечень работ по МА, содержание, этапы и последовательность;
- перечень нормативно-технической документации, необходимой для проведения МА;
- органы и службы, проводящие МА, и их функциональные обязанности;
- основные требования к построению, содержанию и разработке программы МА.

МА систем управления проводят после непрерывной наработки их не менее 6 месяцев или других сроков, оговоренных в нормативно-технической документации на систему.

Системы управления должны быть представлены на МА со следующей документацией:

- техническое задание;
- технические условия на систему управления в целом и на агрегатные средства измерений;
- техническое описание системы управления и инструкция по ее монтажу и эксплуатации;
- проект программы и методики МА;

- нормы и показатели точности на измерительные каналы, зависимости, выражающие влияние на данные показатели точности внешних влияющих величин, для которых данные зависимости справедливы;
- проект методики поверки или калибровки измерительных каналов в процессе эксплуатации;
- акт межведомственной комиссии по приему системы управления;
- акт о вводе системы управления в опытную эксплуатацию;
- свидетельства поверок или калибровок агрегатных средств измерений;
- результаты и журнал опытной эксплуатации системы управления;
- рекомендации о квалификации операторов;
- специальные требования, предъявляемые к технике безопасности.

В процессе МА определяются метрологические характеристики измерительных каналов системы управления из числа следующих:

1. Градуированная характеристика измерительного канала.
2. Таблица поправок для функциональной зависимости измерительного канала.
3. Характеристики систематической и случайной составляющей погрешностей измерительного канала.
4. Вариация показаний выходного сигнала.
5. Характеристики, отражающие взаимодействие измерительного канала с объектом измерений.
6. Выходной импеданс измерительного канала.
7. Неинформативные параметры выходного сигнала.
8. Динамические характеристики измерительного канала.
9. Функции влияния внешних величин и погрешность их экспериментального определения.
10. Метрологические характеристики влияния канала на канал.

Метрологические характеристики измерительных каналов нормируются для нормальных или рабочих условий в НД на систему управления.

МА измерительных каналов системы управления проводится в соответствии с программой, содержащей следующие основные разделы:

1. Общие положения.
2. Перечень измерительных каналов, подлежащих МА.
3. Образцовые и вспомогательные средства измерений.
4. Техническая документация.
5. Экспериментальные исследования измерительных каналов.
6. Методика проведения МА.
7. Организация и распределение работ по МА.

Основные этапы работ при выполнении метрологической аттестации измерительных каналов системы управления:

- установление объема выработки измерительных каналов;
- задание числа исследуемых точек в диапазоне измерения и способа аппроксимации результатов измерений;
- установление числа наблюдений в исследуемых точках диапазона измерения;
- предъявление требований к режиму измерений и их последовательности;
- задание исходных данных и условий для определения погрешностей измерительных каналов (принятый способ выражения погрешностей измерений, условия проведения аттестации, ожидаемый закон распределения случайных составляющих погрешностей и вариации, уровень значимости, принятый для проверки статистических гипотез, номенклатура внешних влияющих величин и т.д.);
- обоснование и принятие аналитического выражения, определяющего зависимость между основной погрешностью измерительного канала и ее составляющими в нормальных условиях;
- аналитическое представление погрешности измерительного канала в рабочих условиях;

- определение погрешности измерительного канала в нормальных условиях (проведение экспериментальных исследований измерительного канала в нормальных условиях);
- обнаружение погрешности измерительного канала в рабочих условиях (проведение экспериментальных исследований измерительного канала в рабочих условиях);
- статистическая обработка результатов измерений;
- анализ метрологического обеспечения системы управления по результатам МА (выводы по результатам МА о возможности метрологического обслуживания системы управления органами государственной или ведомственной метрологических служб, о правильности и полноте выбранных методов и средств поверки и калибровки).

Результаты экспериментальных исследований заносят в протокол МА системы управления, подписываемый представителем метрологической организации и исполнителями аттестации. По результатам экспериментальных исследований составляется также свидетельство о МА, и ее результаты заносятся в паспорта измерительных каналов системы управления [9, 18].

Система управления как законченный объект комплектуется, как правило, из измерительных, управляющих, вычислительных и вспомогательных компонентов и линий связи на месте эксплуатации. Демонтаж системы с объекта для проведения метрологических исследований затруднен, поэтому МА каналов системы управления проводят в рабочих условиях эксплуатации.

Сложность воспроизведения в условиях эксплуатации действительных значений измеряемых величин неэлектрической природы на входе измерительных каналов системы, распределение измерительных компонентов в пространстве, их недоступность для контроля не позволяют во многих случаях экспериментально определять метрологические

характеристики измерительных каналов в целом, включая датчики. Это предопределяет необходимость применения, наряду с экспериментальными, расчетно-экспериментальных и расчетных методов для определения метрологических характеристик измерительных каналов системы управления.

Реализация в системе управления определенных алгоритмов обработки измерительной информации с использованием программных и технических средств влияет на погрешность результата измерения [9]. Возникает необходимость создания и использования МА программного обеспечения вычислений результатов измерений – алгоритмов обработки измерительной информации.

Таким образом, если для обычных средств измерений МА – это экспериментальное исследование их метрологических свойств, то для отраслевых систем управления МА состоит из трех этапов: определение метрологических характеристик датчиков, экспериментальные исследования МХ ИК и оценка МХ алгоритмов и программ обработки измерительной информации в вычислительных устройствах.

Для определения метрологических характеристик программно-алгоритмического обеспечения системы управления целесообразно использовать вычислительный эксперимент, в котором, в самом общем случае, метрологические характеристики определяются путем сравнения цифровых сигналов на выходе вычислительного комплекса со значением некоторых истинных, действительных цифровых сигналов, подаваемых на вход вычислительного устройства [18].

При исследовании метрологических характеристик измерительных каналов системы управления в условиях эксплуатации возникают следующие ситуации:

1. Имеется возможность экспериментально определить метрологические характеристики измерительных сигналов в целом.

2. Отсутствует возможность экспериментального исследования измерительных каналов в целом, либо она экономически нецелесообразна. В этом случае проводят отдельные эксперименты по определению метрологических характеристик датчиков и измерительных каналов преобразования измерительных сигналов. Метрологические характеристики канала в целом окончательно определяют расчетным путем (двухкомпонентный расчетно-экспериментальный метод метрологического контроля).

3. В обоснованных случаях в условиях эксплуатации объекта экспериментально определяют метрологические характеристики отдельных компонентов, а метрологические характеристики измерительного канала в целом рассчитывают по метрологическим характеристикам компонентов (покомпонентный расчетно-экспериментальный метод метрологического контроля).

Для определения метрологических характеристик измерительных каналов можно использовать три вида эксперимента: активный, пассивный, активно-пассивный [7, 19].

При МА, проводимой в условиях эксплуатации, когда на входе измерительного канала можно сформировать контрольный сигнал, а влияющими величинами управлять нельзя, используют, как правило, активный эксперимент. При этом условия, в которых проводится эксперимент, должны охватывать весь диапазон допустимых условий эксплуатации системы. В противном случае необходимо убедиться расчетным путем или специальными экспериментальными исследованиями, что значения метрологических характеристик ИК не выйдут за допускаемые пределы, оговоренные в проектной или нормативно-технической документации на систему управления, для всей области рабочих условий. Активный эксперимент имеет преимущества в том, что позволяет определить метрологические характеристики за наименьшее время, обработка результатов эксперимента в этом случае относительно проста.

Недостатки активного эксперимента – высокая стоимость экспериментальных исследований, невозможность в ряде случаев даже на время исключить из эксплуатации каналы системы управления для проведения экспериментальных исследований.

При пассивном эксперименте входной сигнал, влияющие величины и выходной сигнал синхронно регистрируют через определенные интервалы времени. Здесь существенно наличие модели канала, полученной на этапе подготовки, так как адекватная модель измерительного канала позволяет формировать системы уравнений, решения которых являются значениями искомых метрологических характеристик. Этот тип эксперимента позволяет оценивать метрологические характеристики каналов в процессе эксплуатации, однако требует большего времени и использования сложных алгоритмов обработки. В ряде случаев не удается получить адекватные модели каналов.

Для большинства единичных нестандартизованных измерительных каналов системы управления МА рекомендуется осуществлять по схеме двухкомпонентного метрологического контроля. При экспериментальном исследовании определяются метрологические характеристики каналов преобразования измерительных сигналов и программно-алгоритмического преобразования вычислительных устройств, затем рассчитываются метрологические характеристики каналов в целом с учетом значений метрологических характеристик датчиков (по данным их МА до установки в объекты) [9, 18].

2.5. Поверка, калибровка и метрологическое обслуживание измерительных каналов систем управления

Поверке⁷ или калибровке⁸ подвергаются измерительные каналы систем управления:

⁷ Поверка СИ – это установление органом Государственной метрологической службы (другими уполномоченными на то организациями) пригодности СИ к применению на основании

- общего применения, выпускаемые серийно;
- нестандартизованные – единичного производства или комплектуемые из серийных агрегатных средств на объектах эксплуатации;
- прошедшие ремонт, находящиеся в эксплуатации и на хранении.

В зависимости от способа создания систем управления, технических возможностей и экономической целесообразности осуществления метрологического контроля ИК, поверка или калибровка может производиться комплектно (поверка измерительного канала в целом) или покомпонентно – поверка или калибровка СИ, составляющих ИК (МИ 2539-99 ГСИ. Измерительные каналы контроллеров, измерительно-вычислительных, управляющих, программно-технических комплексов. Методика поверки).

Измерительные каналы систем управления подвергаются первичной, периодической, внеочередной и инспекционной поверкам или калибровкам.

Первичную проверку или калибровку ИК проводят при метрологических испытаниях или аттестации систем управления (если применение системы соответствует условию аттестации ее головного образца) и после ремонта. Поверку или калибровку проводят по методикам, разработанным для головного (первого) образца систем управления их создателями [9].

Периодические поверки или калибровки ИК осуществляют не реже межповерочных интервалов, установленных в методиках выполнения измерений или в программах МА каналов с учетом условий их эксплуатации. Эти поверки реализуют по стандартизованным или разработанным в процессе МА ИК методикам поверки или калибровки каналов [9, 21].

экспериментально определяемых МХ и подтверждения их соответствия установленным обязательным требованиям.

⁸ Калибровка (калибровочные работы) – совокупность операций, выполняемых с целью определения и подтверждения действительных значений МХ и (или) пригодности к применению СИ, не подлежащих Государственному метрологическому контролю и надзору, которые в большинстве случаев присущи ИК АСУ ТП.

Внеочередную поверку или калибровку ИК проводят при эксплуатации ИК в зависимости от сроков периодической поверки или калибровки:

- когда необходимо определить правильность работы ИК в соответствии с требованиями МВИ или программой МА ИИС;
- при замене одного или нескольких средств измерений, входящих в ИК;
- при корректировке межповерочных интервалов, указанных в методике выполнения измерений или программе МА систем управления;
- когда у СИ, входящих в ИК, истекает половина гарантийного срока, указанного в сопроводительной документации на канал;
- в некоторых других случаях.

Внеочередную поверку или калибровку проводят по методикам, разработанным для поверки или калибровки измерительных каналов систем управления.

Инспекционную поверку или калибровку ИК в целом или отдельных компонентов ИК предусматривают при метрологической ревизии и экспертизе (по нормативной документации), оговоренных в МВИ конкретной системы управления или в свидетельстве по результатам МА системы управления.

До проведения поверки или калибровки на предприятии, эксплуатирующем систему управления, должна быть проделана следующая работа:

- подготовлен комплект эксплуатационной документации, указанной в конкретном аттестате МВИ или свидетельстве о МА каналов системы управления;
- согласован с территориальными органами Госстандарта перечень ИК, подлежащих государственной и ведомственной поверкам или калибровкам;

- подготовлены комплекты нормативной документации, необходимые при поверке или калибровке ИК системы управления, а также справочная документация;
- подготовлены, согласно методике метрологического контроля, вспомогательные средства и образцовые средства измерений, необходимые для поверки или калибровки ИК.

При проведении поверки или калибровки каналов ИИС, входящих в систему управления, должны выполняться следующие основные этапы: проверка состояния и комплектности технической документации; внешний осмотр; опробование; контроль (определение) метрологических характеристик, регламентированных в нормативной документации на методы и средства поверки каналов системы управления; анализ результатов поверки или калибровки и принятие решения о готовности (годности) ИК системы управления для дальнейшего применения.

При комплектной поверке или калибровке каналов системы управления в соответствии с требованиями нормативной документации на методы и средства поверки или калибровки конкретных каналов на входы контролируемых каналов подают ряд образцовых значений измеряемых величин в диапазоне измерений ИК. Эти значения сравнивают с результатами измерений на выходе каналов, в результате чего определяют значения погрешностей ИК системы управления в форме, установленной при их МА [14].

Расчет МХ ИК системы управления производят с использованием статистических методов обработки значений погрешности ИК. Порядок набора статистических данных и методы статистической обработки должны быть приведены в нормативной документации на методы и средства поверки или калибровки конкретных каналов системы управления.

В качестве примера рассмотрим определение значений следующих характеристик ИК системы управления из числа регламентированных ГОСТ 8.009-84.

1. Для нормальных условий эксплуатации ИК в статическом режиме определяют:

- номинальную статическую характеристику преобразования ИК $f_n(X)$;
- систематическую составляющую погрешности ИК Δ_c ;
- случайную составляющую погрешности ИК Δ^0 ;
- полную погрешность ИК, например, в абсолютной форме Δ .

2. Для рабочих условий эксплуатации ИК в статическом режиме находят наибольшие допускаемые изменения метрологических характеристик ИК, вызванные изменениями внешних влияющих величин и неинформативных параметров входного и выходного сигналов или функции влияния на МХ измерительных каналов внешних величин и неинформативных параметров $\psi|\xi|$. Эти МХ нормируются при МА отдельно для каждой величины ξ .

3. Для конкретных условий эксплуатации ИК динамические свойства обычно определяют в соответствии с принятой формой их нормирования, узаконенной при МА ИК системы управления, в виде времени установления показаний (реже амплитудно-частотной или фазочастотной характеристик). Если время установления показаний, необходимое для проведения единичного измерения, не превышает допускаемого значения, ИК признается годным к использованию по результатам его исследования.

При поверке или калибровке ИК системы управления соответствие МХ нормам, установленным в аттестате МВИ на ИК, системы управления или свидетельствах о МА ИК системы управления, оценивают по следующим правилам:

- если в представительной выборке не обнаружено ни единого ИК, характеристики погрешностей которого выходили бы за границы доверительных интервалов, то нормируемые значения характеристик погрешности остаются в силе на следующий, указанный в аттестате или свидетельстве, межповерочный интервал;

- если в представительной выборке обнаружено более 10 % ИК, характеристики погрешностей которых вышли за установленные границы, то контролируют МХ ИК в повторной представительной выборке из ИК системы управления;
- если при контроле характеристик погрешности в повторной представительной выборке окажется менее 10 % ИК, имеющих отклонения от заданных, то нормируемые значения характеристик погрешности остаются в силе на следующий межповерочный интервал, в противном случае контроль прекращают и систему управления не допускают к эксплуатации с нормированными для ИК в аттестатах или свидетельствах погрешностями.

Компонентная поверка или калибровка каналов системы управления заключается в поверке или калибровке компонентов, производимой в соответствии с нормативной документацией на методы и средства поверки или калибровки, распространяющейся на эти компоненты. Результаты покомпонентного исследования каналов считаются положительными, если все компоненты по результатам их поверки или калибровки пригодны к дальнейшему применению. Компоненты, признанные негодными, подлежат замене.

Положительные результаты поверки или калибровки ИК должны оформляться выдачей свидетельства по стандартной форме и заноситься в паспорт канала системы управления. При комплектной поверке или калибровке свидетельство выдают на систему в целом, при компонентной – на каждый компонент системы, прошедший поверку или калибровку. Отрицательные результаты метрологического анализа ИК оформляют извещением о непригодности ИК к эксплуатации.

Особенности организации обслуживания системы управления для поддержания их метрологической исправности, в отличие от других сторон технического обслуживания систем, заключаются в необходимости:

- аттестации и поверки или калибровки каналов для выявления метрологических отказов;
- прогнозирования сроков метрологического контроля путем накопления статистических данных о метрологических отказах;
- автоматизации метрологических исследований с целью как установления метрологической исправности, так и внесения в допустимой области значений изменений в нормативы метрологических свойств каналов системы управления.

Организация ремонтной службы для поддержания исправности системы управления не отличается от обычных подходов, принятых при обслуживании средств измерения, автоматизации и вычислительной техники.

Как известно, для дальнейшего совершенствования обслуживания измерительной техники и автоматических устройств в настоящее время активно внедряются системы автоматизированного управления обслуживанием этих устройств, так же как и основного и вспомогательного оборудования.

К задачам, которые решают традиционно и нетрадиционно эти системы, относятся:

- учет поступающих средств измерения и (или) автоматизации;
- учет и распределение средств измерения по технологическим службам (участкам обслуживания) и конкретным системам управления;
- планирование мероприятий метрологического контроля (МА и поверки или калибровки) средств измерения ИК по группам и службам;
- создание банка данных по нормативным и справочным данным для средств измерения и ИК по типам, используемым на предприятии или участке;
- планирование ремонтов и нагрузки сотрудников ремонтных и поверочных служб, обслуживающих процессы и системы;
- вопросы бухгалтерского и материально-технического учета;

- планирование запасных частей и приборов;
- учет и списание драгоценных металлов и радиоактивных веществ, имеющихся в определенных группах устройств и др.

Подобные системы могут быть использованы для обслуживания средств измерений и автоматизации, а также вычислительных устройств, используемых в системах управления.

Для обслуживания систем управления с целью поддержания их качества и надежности на современном этапе развития следует предусмотреть систему автоматического метрологического исследования в их составе.

Разработке таких систем сервисного обслуживания систем управления должно быть уделено особое внимание.

В этой связи целесообразен переход от понятий погрешности ИК и точности управляющих каналов к понятию метрологической исправности ИК и управляющего канала в целом с системных позиций, когда диагностика метрологической исправности устанавливает сохранение воспроизводимости результатов измерения и управления в локальных или связанных каналах систем управления.

2.6. К определению межповерочных интервалов измерительных каналов систем управления

Одной из форм поддержания ИИС систем управления в метрологически исправном состоянии, т.е. для обеспечения их требуемой метрологической надежности, является их периодическая поверка или калибровка. Правильное установление межповерочных или межкалибровочных интервалов для компонентов, ИК или ИИС в целом зависит от значительного числа аспектов: как от структуры или технического оснащения ИИС, так и от условий их эксплуатации, включая особенности обслуживания.

Поверку или калибровку производят в выбранные на основе конкретных критериев интервалы времени, называемые межповерочными интервалами.

Момент наступления метрологического отказа может выявить только метрологический контроль ИК системы управления, результаты которого позволят утверждать, что отказ произошел в период времени между двумя последними поверками. Величина МПИ должна быть оптимальной, поскольку частые поверки приводят к материальным и трудовым затратам на их организацию и проведение, а также появлению отказов по вине обслуживающего персонала, редкие – могут привести к повышению погрешности измерений, т.е. метрологическим отказам.

Межповерочные интервалы устанавливаются в календарном времени для ИК системы управления, изменение метрологических характеристик которых обусловлено старением и не зависит от интенсивности эксплуатации. Значения МПИ рекомендуется выбирать из следующего ряда: 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 5; 6; 9; 12; 6 K месяцев, где K – целое положительное число. Для ИК системы управления, у которых изменение МХ является следствием износа его элементов, зависящего от интенсивности эксплуатации, МПИ назначаются в значениях наработки на метрологический отказ.

При установлении МПИ выбираются МХ, определяющие состояние метрологической исправности средства измерения. В качестве таких характеристик, как правило, используются основная погрешность, СКО случайной составляющей погрешности и некоторые другие. Если состояние метрологической исправности определяют несколько МХ, то из них выбирается та, по которой обеспечивается наибольший процент брака при контроле метрологической исправности.

Вопросу обоснованного выбора продолжительности МПИ посвящено большое число работ. В настоящее время существуют три основных пути их определения:

- на основе статистики отказов;

- на основе экономического критерия;
- произвольное назначение первоначального МПИ с последующей корректировкой в течение всего срока службы системы.

Выбор конкретного метода определения продолжительности МПИ зависит от наличия исходной информации о надежности и стабильности ИК систем управления. Первый способ является эффективным при условии, что известны показатели метрологической надежности. Наиболее полная информация такого рода содержится в моделях, описывающих изменение во времени МХ систем. При известных параметрах моделей межповерочные интервалы определяются моментом выхода погрешности за допускаемые значения для данного ИК. Однако большой разброс параметров и характеристик процессов старения систем приводит к большой погрешности расчета МПИ с помощью таких моделей.

Применение методов расчета МПИ, основанных на статистике скрытых и явных отказов, требует наличия большого количества экспериментальных данных по процессам изменения во времени МХ систем различных типов. Такого рода исследования весьма трудоемки и занимают значительное время. Этим объясняется тот факт, что опубликованных статистических данных о процессах старения ИИС или их компонентов различных типов крайне мало. В технических описаниях ИК, как правило, приводится средняя наработка до отказа, средний, или гамма-процентный, ресурс и срок службы. Этого явно недостаточно для расчета МПИ.

Определение межповерочного интервала по экономическому критерию состоит в решении задачи по выбору такого интервала, при котором можно минимизировать расходы на эксплуатацию систем и устранять последствия от возможных ошибок, вызванных погрешностями измерения. Исходной информацией для определения МПИ служат данные о стоимости поверки и ремонта ИК системы управления, а также об ущербе от изъятия его из эксплуатации и от использования метрологически неисправного прибора в системе. Основная сложность применения этого метода состоит в следующем.

Затраты на ремонт и поверку ИК системы управления достаточно легко определяются по нормативным документам. В отличие от них, потери из-за использования приборов со скрытым метрологическим отказом, на практике, как правило, неизвестны. Приходится прибегать к приближенным моделям, описывающим затраты на эксплуатацию ИК системы управления со скрытыми метрологическими отказами в виде функции потерь того или иного вида.

Один из вариантов определения МПИ по экономическому критерию приведен в рекомендации РМГ 74-2004 «Государственная система обеспечения единства измерений. Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений».

Наиболее универсальным является метод, состоящий в произвольном назначении МПИ с последующей корректировкой его величины. В этом случае при минимальной исходной информации назначается первоначальный интервал, а результаты последующих поверок являются исходными данными для его корректировки.

Основной трудностью данного метода является определение первого МПИ. Преодолеть ее возможно тремя путями. Во-первых, для определения протяженности первого МПИ могут быть использованы показатели метрологической надежностиверяемого ИК. Во-вторых, длительность первого интервала может быть оценена исходя из анализа данных по эксплуатации аналогичныхверяемой по конструкции и структуре ИК. В-третьих, первый МПИ выбирается в соответствии с рекомендациями нормативных документов государственных и ведомственных метрологических служб.

Последующие значения МПИ определяются путем корректировки первого интервала с учетом всех результатов проведенных поверок или калибровок большого числа однотипных ИК, каналов или ИИС в целом.

Данный метод рассмотрен в рекомендации МИ 1872-88 «ГСИ. Межповерочные интервалы образцовых средств измерений. Методика

определения и корректировки» и международном стандарте ИСО 10012-1 «Требования, гарантирующие качество измерительного оборудования».

2.7. К вопросу об аттестации алгоритмов и программ обработки данных

В настоящее время использование вычислительных устройств в измерительных задачах продолжает развиваться ускоренными темпами. Во-первых, они используются для реализации обработки данных измерений по различным алгоритмам и программам. Во-вторых, они применяются для автоматизации процессов метрологического контроля с целью обеспечения метрологической надежности систем измерений. В-третьих, вычислительные устройства выполняют роль диагностирования и прогнозирования изменения погрешностей в измерительных устройствах и системах.

Поэтому, чтобы определить функции вычислительных устройств в измерительных цепях, необходимо уточнить различия между измерительными и вычислительными преобразователями, для чего следует определить различия между измерительным и вычислительным преобразованиями.

Измерение в целом направлено на нахождение значения измеряемой величины, т.е. измерительное преобразование заключается в установлении количественных оценок для параметров некоторого заданного, но с неизвестными (неточно определенными) параметрами сигнала. Такое преобразование обеспечивает получение первичных количественных данных, их формирование. Основное содержание алгоритма измерительного преобразования заключается в реализации оператора измерения, устанавливающего однозначное соответствие множества $\{a\}$ значений параметров сигнала множеству $\{a\}$ чисел: $\{a\}=Q\{a\}$. При этом структура алгоритма может быть достаточно разветвленной и включать вычисления разной степени сложности.

Вычислительное преобразование («вычислительный алгоритм») определяет «действия над данными, позволяющие с помощью вычислительных машин... преобразовать некоторый массив данных (исходные данные) в другой массив данных (выходные данные)» [19]. Такое преобразование обеспечивает получение вторичных количественных данных (или сигнала с определенными параметрами) из известных исходных данных, т.е. сигнала с точно известными параметрами. Основное содержание операции заключается в реализации алгоритма преобразования $\{y\} = \Phi\{x\}$. Структура этого алгоритма Φ и определяет содержание вычислительного преобразования.

Различие функций преобразования обуславливает и различия между техническими средствами, с помощью которых реализуются эти преобразования, – между СИ и ВУ. Соответственно, различают и их основные характеристики: для СИ – это метрологические характеристики, главными из которых являются номинальная функция преобразования (или градуировочная характеристика) и погрешность; для ВУ – это алгоритм и точность преобразования.

Различают также методы оценивания основных характеристик и аттестации. Качество (точность) измерительных преобразователей выявляют при контроле (поверках или калибровках) метрологическими методами, в рамках системы обеспечения единства измерений. Указанная система состоит из технических компонентов (образцовые СИ эталоны) и законодательных и методических компонентов (система стандартов методических документов), регламентирующих правила использования технических компонентов и методы оценивания погрешности измерений.

Качество (точность) работы ВУ проверяется (контролируется) тестовыми методами, при которых ВУ используется для решения контрольных задач с заранее известными результатами и необходимой точностью вычислений. Показатели точности аналогичны характеристикам

полной погрешности СИ либо ее случайной составляющей. В то же время существуют структурные и программные методы, позволяющие варьировать точность решения данной задачи данным ВУ. Допустимая неточность обычно задается априори и обеспечивается либо выбором ВУ, либо методом решения. Основное ограничение точности связано с ограниченной точностью исходных данных (входных сигналов).

Для измерительно-вычислительных устройств, в которых ВУ включены в измерительную цепь и служат для получения результатов измерения, различают два способа их использования:

- 1) устройство «жестко» встроено в измерительную цепь, реализует один заданный алгоритм вычислений и работает по неизменной программе (например, вычисления электрической мощности при отдельных измерениях силы тока и напряжения в ваттметре, вычисления результатов при статистических измерениях);
- 2) устройство встроено в измерительную цепь, предназначенную для решения различных измерительных задач, может реализовывать разные алгоритмы и работать по разным программам. Иногда одно ВУ предназначено для работы в нескольких измерительных цепях и выполняет преобразования измерительных сигналов по разным программам, как это предусмотрено в измерительно-вычислительных комплексах [19].

В первом случае целесообразно аттестовать измерительную цепь в целом, определяя ее метрологические характеристики с учетом характеристик ВУ. При проектировании параметры ВУ согласуют с параметрами измерительных преобразователей в соответствии с требованиями к СИ, и в эксплуатации измерительная цепь проверяется как единое средство.

Во втором случае проектирование измерительных и вычислительных преобразователей проводят отдельно, однако при этом также необходимо согласовать характеристики ВУ с характеристиками измерительных преобразователей. В первую очередь анализируют погрешности вычислений,

которые содержат аппаратные и методические составляющие [19]. Аппаратурная составляющая зависит от технических параметров ВУ: разрядности чисел (погрешностей округлений), сбоев в процессе работы, нестабильности элементов. В современных ВУ эта составляющая для многих измерений может быть сделана пренебрежимо малой. Основной погрешностью является методическая, обусловленная несовершенством методов вычислений, приближенностью алгоритмов расчетов. Эта составляющая должна определяться для каждого алгоритма. Общий подход к определению точностных характеристик алгоритмов обработки экспериментальных данных при измерениях рассматривается ниже. Здесь следует отметить, что характеристики алгоритмов уподобляются МХ СИ, но, в отличие от последних, не требуют периодической проверки.

Многообразие современных измерительных и управленческих задач предопределяет разнообразие реализуемых алгоритмов обработки данных, в том числе нетрадиционных и достаточно сложных. При этом становятся затруднительными обоснование выбора алгоритмов в конкретных задачах и оценивание погрешностей конечных результатов, обусловленных выбором алгоритма, а также выбор параметров алгоритмов. Отмеченное обстоятельство тем более существенно, что обычно на практике сведения о свойствах экспериментальных данных, поступающих на обработку, весьма ограничены. Поэтому зачастую для пользователя оказывается важной не оптимальность алгоритма (в рамках определенной узкой модели), а его гарантированная высокая эффективность для реальных данных [19].

Соответственно, заметно усложняются и задачи обеспечения единства измерений. Становится невозможно обеспечить единообразие обработки при измерениях стандартизацией одного типового алгоритма для каждого вида задач (например, как это сделано в ГОСТ Р 8.736-2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения для прямых измерений). Поэтому, очевидно, следует определить количественные

показатели (характеристики) алгоритмов, дающие наглядное представление об их области применения и свойствах (точности, надежности, сложности) и предоставляющие возможность для объективного их сопоставления. Исследование алгоритмов обработки на унифицированных моделях исходных данных с целью определения указанных характеристик называется аттестацией алгоритмов [20, 22] (по аналогии с аттестацией средств измерений и методик выполнения измерений).

Важнейшей отличительной особенностью аттестации алгоритмов является многовариантность критериев и исходных данных: для группы алгоритмов определяются несколько показателей на наборе моделей исходных данных. Разумеется, идеология аттестации существенно иная, чем идеология оптимизации, когда выявляется наилучший алгоритм для точно определенных критерия и модели. Аттестация же не выделяет наилучший алгоритм, оптимальный по всем критериям; обычно для различных критериев или моделей преимущества имеют разные алгоритмы.

Аттестация алгоритмов основана, с одной стороны, на современной математической методологии (прежде всего, на принципах прикладной статистики, «анализа данных» и теории алгоритмов), а с другой – на общей метрологической идеологии аттестации различных объектов [20, 22].

Аттестация выполняется чаще всего применительно к однородной группе алгоритмов обработки данных, которым свойственны уравнения измерений одинакового вида. Для выделения группы алгоритмов $A=\{a\}$ целесообразно в общем случае придерживаться приводимой ниже последовательности действий:

- 1) установить характеристики (показатели) алгоритма $\Pi_1, \dots, \Pi_n$, которые надлежит использовать для сопоставления и обоснованного выбора алгоритмов в группе А;

- 2) выбрать типовые модели исходных данных, поступающих на вход алгоритма: $\mu_1, \dots, \mu_m$, которые соответствуют рассматриваемой измерительной задаче;
- 3) вычислить (оценить) значения характеристик алгоритма на типовых моделях исходных данных:

$$P_{ij}(a) = P_i(a, \mu_j), i=1 \dots n, j=1 \dots m. \quad (2.50)$$

Показатели $P_{ij}(a)$ представляют собой либо числа, либо зависимости характеристик алгоритмов от параметров моделей исходных данных (в том числе, аналитические выражения, интерполяционные формулы, таблицы или графики).

Результаты аттестации алгоритма оформляются в виде таблицы $P(a) = ||P_{ij}(a)||$, содержащей значения (или выражения) основных показателей алгоритма для типовых моделей данных и являющейся (с соответствующими пояснениями) свидетельством об аттестации алгоритма.

Характеристики алгоритмов P_i и типовых моделей μ_j следует выбирать таким образом, чтобы таблица $P(a)$ давала исследователям достаточно полное и наглядное представление о свойствах алгоритма.

Выделяются три группы характеристик алгоритмов: точности, устойчивости и сложности.

Характеристики точности алгоритма содержат информацию о точности получаемых при его реализации результатов, если исходные данные соответствуют принятым типовым моделям. Они отражают как методические погрешности алгоритмов, так и трансформированные погрешности измерений (обусловленные неточностью исходных данных). Подобные характеристики считаются традиционными для метрологии. К ним, в первую очередь, относятся:

- статистические показатели для случайных погрешностей (например, СКО);

- границы погрешностей (детерминированные или доверительные). Для некоторых групп алгоритмов могут дополнительно вводиться и другие показатели погрешности (в частности, смещение оценки, первый абсолютный момент погрешности).

Характеристики устойчивости алгоритмов отображают влияние возможных отклонений реальных исходных данных от принятых математических моделей на получаемые результаты измерений. Эти отклонения, прежде всего, задают допустимые области или границы исходных параметров, при которых алгоритм приводит к искомому результату, т. е. работает без сбоев. Основной показатель устойчивости алгоритма – точка срыва, равная максимальной доле искажений исходных данных, при которой смещение результата остается малым. Следует заметить, что этот показатель впервые был введен при исследовании робастности алгоритмов. Например, для алгоритма среднего арифметического точка срыва $\delta^*(\bar{x})=0$; для усеченного среднего $(\bar{x})=(a)$ точка срыва совпадает с параметром усечения: $\delta^*[\bar{x}(a)]=a$. Наибольшее значение точки срыва имеет медиана: $\delta^*(med)=0,5$.

Существуют также другие показатели устойчивости алгоритмов, отражающие дополнительные погрешности результатов из-за отклонений реальных данных от принятых моделей и аналогичные функциям влияния.

Показатели сложности алгоритмов характеризуют трудоемкость применения алгоритма в зависимости от объема исходных данных или размерности задачи. Простейший показатель сложности алгоритма определяется через число элементарных операций, необходимых для однократного преобразования исходных данных в конечный результат.

Характеристики алгоритмов вычисляют для специально выбранных типовых моделей исходных данных, дающих достаточно полное представление о свойствах реальных исходных данных, для обработки которых предназначены алгоритмы.

Модели исходных данных представляют собой сочетания моделей полезных сигналов и моделей помех и погрешностей. Выбор моделей полезных сигналов вытекает из постановки измерительной задачи; они, за редким исключением, основаны на уравнениях измерений. Модели погрешностей формируют отдельно для случайных и для систематических составляющих. Для описания случайных погрешностей задают случайные последовательности (прежде всего, некоррелированные, со средним 0 и постоянной дисперсией σ^2), имеющие конкретные типовые распределения (в частности, гауссовское, равномерное, двойное экспоненциальное или засоренное гауссовское). Для описания систематических погрешностей принимают детерминированные последовательности определенного вида, чаще всего постоянные, линейно меняющиеся и гармонические. Следует подчеркнуть, что аттестация алгоритмов на простейших моделях не заменяет проверку их на реальных (натуральных) данных, а лишь дополняет ее и, как правило, должна предшествовать собственно проверке.

Для определения значений показателей $\Pi_{ij}(a)$ реализуют два основных подхода: аналитический подход или статистическое моделирование.

При аналитическом подходе значения или выражения для показателей находят с помощью точных или приближенных аналитических методов в рамках принятых моделей. При этом показатели алгоритма выражают в компактной форме, удобной для дальнейшего применения (в виде зависимостей от параметров моделей исходных данных).

При использовании статистического моделирования исследуемый алгоритм применяют непосредственно к исходным данным, полученным моделированием в соответствии с принятой моделью (для определенного набора параметров модели). В итоге статистической обработки набора результатов измерений, найденных согласно принятому алгоритму, получают оценки показателей для фиксированного набора параметров. Очевидно, процедура моделирования довольно трудоемка и требует использования

быстродействующих ЭВМ; кроме того, оценки показателей можно найти лишь для отдельных наборов параметров моделей.

На практике указанные подходы реализуют совместно: часто асимптотические показатели приближенно представляют в аналитическом виде, при малых же размерах задач показатели оценивают статистическим моделированием.

При практической аттестации алгоритмов выявляются несколько ее разновидностей, зависящих от целей и метрологической направленности [20, 22]. Прежде всего, выделяется общая, или исследовательская, аттестация алгоритмов, являющаяся наиболее полным исследованием свойств точности, устойчивости и сложности алгоритмов. Ее результаты носят преимущественно справочный характер и ориентированы на использование при выборе алгоритма для решения конкретной задачи. Метрологическая аттестация алгоритма носит более конкретный характер и проводится, как правило, применительно к определенной методике выполнения измерений или измерительной системе. Она регламентируется нормативно-техническими документами, а ее результаты имеют более выраженный законодательный характер.

Для указанных разновидностей аттестации общие принципы и схема выполнения оказываются едиными, однако при этом возможны существенные отличия в выборе конкретных характеристик алгоритмов и типов моделей исходных данных. В частности, при метрологической аттестации используется минимум характеристик алгоритмов: часто ограничиваются лишь основными характеристиками точности, такими как граница методической погрешности алгоритма, СКО случайной составляющей трансформированной погрешности [18].

При общей (исследовательской) аттестации набор исследуемых характеристик должен быть шире, чтобы достаточно полно описать свойства алгоритмов. В зависимости от содержания решаемой задачи обработки, здесь допустимо вводить дополнительные показатели, полезные для сопоставления алгоритмов. Например, можно использовать средний модуль погрешности или

вариацию Алана [19, 22]; последняя характеризует флуктуационные свойства последовательностей погрешностей. С учетом классификации составляющих погрешностей на группы **A** и **B** [23] иногда целесообразно использовать показатели u_j , которые представляют собой аналоги СКО для нестатистических составляющих (группы **B**) [18].

Аналогично, набор типовых моделей исходных данных при общей аттестации также должен быть весьма широким, представляющим возможность полнее выявить свойства алгоритмов, но, вместе с тем, сами модели при этом зачастую оказываются довольно простыми. При переходе к метрологической аттестации количество моделей может быть уменьшено (ввиду конкретизации свойств исходных данных), однако их вид, как правило, усложняется.

На практике большинство алгоритмов, как было указано выше, применяется при автоматической обработке данных с помощью вычислительной техники посредством определенных программ для ЭВМ. Поэтому, кроме аттестации исходного алгоритма, возникает задача аттестации реализующей его программы. Переход от алгоритма к программе приводит к появлению дополнительных погрешностей, обусловленных, например, ограниченностью разрядной сетки, правилами останова при итерационных процедурах и т. п. Здесь, соответственно, погрешности, выявляемые при аттестации алгоритмов, играют роль методических, а дополнительные погрешности, возникающие при переходе к программам, – роль аппаратных. В некоторых случаях дополнительные погрешности от проведения вычислений могут быть оценены аналитическими методами [19]. Однако оценивание погрешностей чаще всего выполняется специальной подпрограммой (работающей параллельно с основной программой вычисления результата измерения), на тех же исходных данных.

В настоящее время наряду с научно-методическими проблемами разрабатываются также организационные вопросы аттестации алгоритмов: принципы взаимодействия метрологов и пользователей алгоритмов, пути получения, накопления и использования данных о свойствах алгоритмов.

Подходы к решению названных вопросов требуют согласования с современными схемами накопления, представления и коллективного использования данных об объектах в различных предметных областях, в частности, организации диалога в системе автоматизированного решения задач в предметных областях на основе баз данных [19, 22]. Указанные вопросы охватывают такую широкую область, как обработка данных при измерениях, особенностью которой является наличие метрологических требований, связанных с обеспечением единообразия обработки данных и оценивания погрешностей измерений. Отсюда исходит появление дополнительных условий при получении, накоплении и использовании данных об алгоритмах, а также необходимость участия метрологов в этой деятельности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ермаков С.М., Жиглявский А.А. Математическая теория оптимального эксперимента. – М.: Наука, 1987. – 320 с.
2. РМГ 62-2003 ГСОЕИ. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Оценивание погрешности измерений при ограниченной исходной информации. – М.: Стандартинформ, 2008.
3. Ицкович Э.Л. Методы рациональной автоматизации производства. – М.: Инфра-Инженерия, 2009. – 256 с.
4. Недосекин Д.Д., Прокопчина С.В., Чернявский Е.А. Информационные технологии интеллектуализации измерительных процессов. – СПб.: Энергоатомиздат, 1995. – 185 с.
5. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат (Ленингр. отдел.), 1991. – 301 с.
6. Кондрашкова Г.А. Технологические измерения и приборы в целлюлозно-бумажной промышленности: учебник. – М.: Лесная промышленность, 1984. – 375 с.
7. Кондрашкова Г.А. Развитие теории и методологии технологических измерений в автоматизированных технологических комплексах ЦБП: дис. ... докт. техн. ...наук. – Л., 1985. – 425 с.
8. Раннев Г.Г. Измерительные информационные системы: учебник. – М.: Академия, 2010. – 330 с.
9. МУ 134-82. Методические указания. Измерительно-информационные системы АСУ. Измерительные каналы. Методы и средства поверки. Основные положения. – М.: Министерство лесной, целлюлозно-бумажной и деревообрабатывающей промышленности СССР, 1983.
10. Анашкин А.С., Кадыров Э.Д., Харазов В.Г. Техническое и программное обеспечение распределенных систем управления / под общ.ред. В.Г.Харазова. – СПб.: «П-2», 2004. – 368 с.
11. МИ 2301-2000 ГСИ. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Методы и способы повышения точности измерений. Основные положения. – М.: Изд-во стандартов, 2000.
12. Харазов В.Г. Интегрированные системы управления технологическими процессами. – СПб.: Профессия, 2009. – 592 с.

13. МИ 2267-2000 ГСИ. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Метрологическая экспертиза технической документации. – М.: Изд-во стандартов, 2000.
14. МИ 2177-91 ГСИ. Рекомендация. Измерения и измерительный контроль. Сведения о погрешностях измерений в конструкторской и технологической документации. – М.: Изд-во стандартов, 2000.
15. ГОСТ 8.009-84 Государственная система обеспечения единства измерений. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. – М.: Стандартинформ, 2006.
16. ГОСТ 8.401-80. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Классы точности средств измерений. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2010.
17. Алексеев А.А., Имаев Д.Х., Кузьмин Н.Н., Яковлев В.Б. Теория управления: учебник. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 1999. – 256 с.
18. Раннев Г.Г. Измерительные информационные системы: учебник для студ. высш. учеб. заведений. – М.: Академия, 2010. – 336 с.
19. Лячиев В.В., Сирая Т.Н., Довбета Л.И. Основы теории измерений физических величин. – СПб: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2004.
20. МИ 2174-91. Рекомендация ГСИ. Аттестация алгоритмов и программ обработки данных при измерениях. Основные положения. – СПб: НПО ВНИИМ им. Д.И. Менделеева. 1992.
21. Шишмарев В.Ю. Технические измерения и приборы: учебник для студ. учреждений высш. проф. образования. 2-е изд., испр. – М.: Академия, 2012. – 384 с.
22. Тарбеев Ю.В., Челпанов И.Б., Сирая Т.Н. Аттестация алгоритмов обработки данных при измерениях // Измерения, контроль, автоматизация, 1991, № 2. С. 3–13.
23. ГОСТ Р 54500.3-2011. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. – М.: Стандартинформ, 2012.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОСНОВНЫЕ СОКРАЩЕНИЯ.	3
ВВЕДЕНИЕ.	4
Глава 1. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ.	8
1.1. Основы анализа состояния измерений, контроля и испытаний на технологических производствах.	8
1.2. Проблемы метрологического анализа систем измерения и контроля параметров технологических процессов.	13
1.3. Исследование метрологической надежности информационных измерительных систем технологических величин.	30
1.3.1. Особенности метрологической надежности систем измерения. .	30
1.3.2. Исследование метрологической надежности при линейных моделях изменения определяющей погрешности ИК.	35
1.3.3. Анализ метрологической надежности при нелинейных моделях изменения определяющей погрешности ИК.	49
1.3.4. Определение статистических исходных данных для расчета метрологической надежности ИК.	59
1.3.5. Основы методики расчета метрологической надежности ИИС технологических измерений.	64
Глава 2. ПОДХОДЫ К МЕТРОЛОГИЧЕСКОМУ ОБЕСПЕЧЕНИЮ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ.	67
2.1. Проблемы и задачи метрологического обеспечения систем управления.	67
2.2. Метрологическая экспертиза технической документации на системы управления.	76
2.3. Расчет метрологических характеристик измерительных каналов систем управления.	81
2.4. Метрологическая аттестация измерительных каналов систем управления.	102
2.5. Поверка, калибровка и метрологическое обслуживание измерительных каналов систем управления.	109
2.6. К определению межповерочных интервалов измерительных каналов систем управления.	116
2.7. К вопросу об аттестации алгоритмов и программ обработки данных.	119
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.	130

Учебное издание

Галина Анатольевна Кондрашкова

Ирина Владимировна Бондаренкова

Анна Владимировна Черникова

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ

Учебное пособие

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

Темплан 2017 г., поз. 46

Подп. к печати 22.05.2017.

Формат 60х84/16. Бумага тип. № 1.

Печать офсетная. 8,5 печ. л.; 8,5 уч.-изд. л. Тираж 50 экз. Изд.№. 46.

Цена «С». Заказ

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