

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

В. Т. Ревин

АВТОМАТИЗАЦИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ РАБОТ

*Рекомендовано УМО вузов Республики Беларусь по образованию
в области информатики и радиоэлектроники в качестве
учебно-методического пособия для студентов учреждений,
обеспечивающих получение высшего образования по специальности
«Метрологическое обеспечение информационных систем и сетей»*

Минск БГУИР 2011

УДК 621.317.7-027.43+006.91(076)

ББК 30.10я73

P32

Р е ц е н з е н т ы:

заведующий лабораторией информационно-измерительных систем
научно-исследовательского института прикладных физических проблем
им. А. Н. Севченко Белорусского государственного университета,
кандидат технических наук А. Ф. Романов;

кафедра радиотехники учреждения образования
«Военная академия Республики Беларусь»
(протокол №2–1/2011 от 22.02.2011)

Ревин, В. Т.

P32 Автоматизация метрологических работ : учеб.-метод. пособие /
В. Т. Ревин. – Минск : БГУИР, 2011. – 64 с.
ISBN 978-985-488-803-3.

Рассматриваются вопросы автоматизации метрологических работ, измерительных операций, основы построения автоматических рабочих мест метролога, электронизации поверочного и измерительного оборудования, создания прикладных программ для компьютерно-измерительных систем; приведены конкретные примеры использования компьютерно-измерительных систем в исследовательских и прикладных метрологических работах.

УДК 621.317.7-027.43+006.91(076)
ББК 30.10я73

ISBN 978-985-488-803-3

© Ревин В. Т., 2011
© УО «Белорусский государственный
университет информатики
и радиоэлектроники», 2011

СОДЕРЖАНИЕ

Список сокращений	4
Введение	5
1 Общие вопросы автоматизации метрологических работ.....	12
1.1 Виды метрологических работ. Основные термины и определения	12
1.2 Измерение физических величин	13
1.3 Метрологическое обеспечение измерений	14
1.4 Стандартизация	18
1.5 Сертификация	19
2 Характер метрологических исследований	20
2.1 Виды экспериментальных метрологических работ	20
2.2 Исследования стабильных явлений и процессов	21
2.3 Эталоны физических величин – как объект исследования	24
3 Основные направления и принципы автоматизации измерений.....	28
3.1 Цели автоматизации измерений	28
3.2 Этапы становления автоматических средств измерений	31
3.3 Компьютерно-измерительные системы	36
4 Основные направления и принципы автоматизации поверочных работ...	40
4.1 Основы автоматизации измерений при поверке	40
4.2 Проблемы автоматизации поверочных работ	41
4.3 Уровни автоматизации поверки средств измерений	42
4.4 Автоматизированное рабочее место метролога	49
5 Особенности исследований измерительных преобразователей	52
5.1 Основные термины и определения	52
5.2 Классификация измерительных преобразователей	53
5.3 Основы автоматизации исследования преобразователей	61
Литература	63

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- АРМ – автоматизированное рабочее место
АЧХ – амплитудно-частотная характеристика
АЦП – аналого-цифровой преобразователь
БД – база данных
ВАХ – вольт-амперная характеристика
ГИС – гибкая измерительная система
ГКЧ – генератор сигналов качающейся частоты
ГСИ – Государственная система измерений
ГСП – Государственная система приборов
ГЭС – гидроэлектростанция
ДНУ – детектор нулевого уровня
ДП – джозефсоновский переход
ИВК – измерительно-вычислительный комплекс
КИС – компьютерно-измерительная система
КОП – канал общего пользования (интерфейс)
КСВН – коэффициент стоячей волны по напряжению
МВИ – методика выполнения измерений
МНИПИ – Минский научно-исследовательский приборостроительный институт
МО – метрологическое обеспечение
МС – метрологическая служба
НДС – нормативный документ по стандартизации
НО – направленный ответвитель
НДС – нормативный документ по сертификации
НТД – нормативно-техническая документация
НЭ – нормальный элемент
ОЗУ – оперативное запоминающее устройство
ПСИ – поверяемое средство измерений
ПЭВМ – персональная ЭВМ
СВЧ – сверхвысокая частота
СИ – средство измерений
СК – система качества
СУБД – система управления базами данных
ФЧХ – фазочастотная характеристика
ЦАП – цифроаналоговый преобразователь
ЭДС – электродвижущая сила

ВВЕДЕНИЕ

Метрологические работы охватывают практически все сферы деятельности человека: научные исследования, промышленность, образование, медицину и т. д. Расширение диапазона разнообразных метрологических работ приводит, как правило, к разработке соответствующих технических средств. Причем уровень развития той или иной отрасли народного хозяйства и уровень развития соответствующих технических средств зачастую зависят друг от друга и оказывают взаимное влияние. Можно сказать, что современный уровень науки и техники в значительной степени определяется уровнем автоматизации, в том числе и метрологических работ.

Автоматизация – одно из магистральных направлений повышения эффективности метрологических работ, призванное обеспечить высокие темпы научно-технического прогресса за счет:

- повышения качества исследований на основе уточнения моделей изучаемых объектов, явлений, процессов;
- получения более полных данных об исследуемых средствах измерений;
- сокращения сроков метрологических исследований и снижения затрат на основе уменьшения трудоемкости измерений, ускорения экспериментов, уменьшения ошибок;
- оптимизации измерительного эксперимента, повышения точности измерений;
- оптимизации работ по ведению учета средств измерений и измерительного оборудования, составлению планов и графиков поверки, калибровки, проверки работоспособности, аттестации, ремонта;
- создания баз данных, содержащих сведения о стандартах, технических условиях и др.

Так что же такое метрологические работы? И почему их необходимо автоматизировать? В последние годы все чаще используют такие недавно еще мало знакомые термины, как метрология, стандартизация, сертификация. Насущным для всех без исключения граждан нашей страны становится понятие качества. Так что же такое качество, метрология и метрологическое обеспечение, стандартизация, сертификация и почему именно сейчас к ним так привлечено всеобщее внимание? Попробуем ответить на этот вопрос исходя из важнейших и первоочередных задач, стоящих перед обществом и страной.

Известно, что качество – это способность продукции, процесса или услуги удовлетворять потребности общества или отдельного лица. При этом только стандартизация обеспечивает единственную реальную возможность установить необходимые требования, при выполнении которых обеспечивается заданный уровень качества. Грамотный и вовремя внедренный стандарт – закон, основа требований к качеству и его показателям.

В свою очередь, метрология и связанная с ней измерительная техника – необходимые составляющие любого производства и научных исследований, которые позволяют получить объективную информацию о фактических значе-

ниях параметров, характеризующих качество. Любое, даже самое важное и крайне необходимое требование, не подкрепленное возможностью измерений, превращается в благое пожелание.

Стандартизация – научно-техническая деятельность, направленная на достижение оптимальной степени упорядочения в определенной области посредством установления требований для всеобщего и многократного применения в отношении реально существующих или потенциальных задач.

И, наконец, *сертификация* – это процедура, посредством которой третья сторона письменно удостоверяет, что продукция, процесс или услуга соответствуют заданным требованиям. Другими словами, сертификация – это средство защиты кошелька, а во многих случаях и здоровья, и даже жизни потребителя от недобросовестности производителя любых товаров и услуг. Она является практически стопроцентной гарантией их качества и безопасности. Неслучайно то, что несертифицированная продукция или услуга не могут быть реализованы на цивилизованном мировом рынке. В свою очередь, сертификация немыслима без опоры на стандартизацию, метрологию и вычислительную технику.

Из всего сказанного становится ясно, что метрология, стандартизация и сертификация являются теми областями, которые определяют техническую политику всех высокоразвитых и развивающихся стран, нашей республики в том числе. Они не только впитывают в себя все самое передовое из других наук и практического опыта, но и оказывают на них существенное стимулирующее воздействие.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что метрологические работы – это работы, выполняемые в областях обеспечения качества продукции и услуг, метрологии и метрологического обеспечения, стандартизации и сертификации. И в первую очередь для выполнения перечисленных работ нужны определенные знания, значительную часть которых мы получаем с помощью средств измерений. Измерения являются связующим звеном между свойствами реальных объектов, явлений и нашими представлениями, т. е. нашими знаниями о них. В конечном счете, измерения имеют целью снижение неопределенности в задачах принятия решений. Измерительная информация должна удовлетворять тем же требованиям единства понятий (единообразия мер физических величин), неискаженности (точности мер и измерительных приборов) и доступности.

Роль измерений при поступательном движении к желаемой цели иллюстрируется схемой, представленной на рисунке 1.1. Если на некотором начальном этапе не хватает сведений (априорных данных) для принятия надежного решения, а эти сведения могут быть получены путем проведения измерений, то необходимо сформулировать измерительную задачу, выполнить измерения, получить результат измерений, сформировать апостериорные сведения и снова попытаться принять решение. Если и в этом случае данных недостаточно для надежного решения, то необходимо проработать альтернативные варианты, т. е. найти другое приемлемое решение.

Столь общее описание роли измерений обусловлено тем, что они имеют

чрезвычайно разнообразный характер, массовость и присутствуют практически во всех сферах человеческой деятельности: наблюдение показаний домашних термометра и барометра, сложнейшие исследования в области создания современных эталонов физических величин, контроль качества исходных комплектующих элементов и готовых изделий, наделение промышленных роботов органами осязания... При этом номенклатура измерительных задач продолжает расширяться, а объем измерений постоянно растет.



Рисунок 1.1 – Алгоритм достижения поставленной цели

В современных условиях объем работы у инженеров-метрологов постоянно возрастает, иногда настолько, что справиться с ним становится довольно сложно. И это касается не только проведения самих измерительных операций. Немаловажным фактором является и ведение учета средств измерений и измерительного оборудования, составление планов и графиков поверки, калибров-

ки, проверки работоспособности, метрологической аттестации, ремонта СИ и ведение метрологической документации (технические условия, стандарты, руководства по эксплуатации и т. д.). Для того чтобы решить эту проблему и избавить метрологов от непроизводительного расхода рабочего времени, необходима специальная автоматическая или автоматизированная система метрологического обеспечения, целью которой являлась бы автоматизация всей рутинной работы по ведению учета средств измерений и измерительного оборудования, составлению планов и графиков поверки, калибровки, проверки работоспособности, метрологической аттестации, ремонта и др. Для решения данной задачи представляется целесообразным внедрение в процесс проведения метрологических работ современных баз данных и систем управления базами данных (СУБД).

Однако преобладают при автоматизации метрологических работ все же измерения. Это обстоятельство обусловлено тем, что доля средств измерений в оборудовании современного промышленного предприятия составляет в стоимостном выражении в среднем 8 – 10 %. Для производственных систем этот показатель возрастает еще в 2 раза. Роботизированное предприятие требует до сотен тысяч различных преобразователей и сопрягаемых с ними средств измерений.

Эффективное применение средств измерений в современном промышленном производстве, их метрологическое обслуживание возможны при условии автоматизации техники измерений. Только на этом пути можно добиться существенного снижения трудоемкости и, соответственно, повышения производительности труда при проведении измерений, в том числе метрологических исследований и при проведении поверочных и калибровочных работ.

Сегодня странно было бы представить себе современную научно-исследовательскую лабораторию или производство без автоматизированных или автоматических средств измерений. Не менее странной была бы ручная поверка или калибровка автоматизированного или автоматического измерительного прибора.

Работы по автоматизации измерений в современном понимании начались в 60-х годах прошлого столетия и характеризуются таким динамизмом в настоящее время, что трудно говорить, об устоявшихся представлениях и общепринятой терминологии при освещении данных вопросов. Однако из многообразия результатов можно выделить несколько направлений, вокруг которых могут быть сгруппированы основные достижения по созданию автоматизированных средств измерений.

Особенностью современного этапа развития техники измерений является автоматизация процессов сбора, обработки и регистрации измерительной информации. При этом под термином «автоматизация» понимается совокупность методических, технических и программных средств, обеспечивающих проведение процесса сбора измерительной информации без непосредственного участия человека. Автоматизация процесса сбора и анализа измерительной информации

позволяет повысить производительность и обеспечить высокую достоверность полученных результатов.

Большое влияние на общий уровень развития автоматических средств измерений оказывают достижения современной микроэлектроники и вычислительной техники. В настоящее время практически полностью изменилась схемотехника средств измерений и в определенной мере подверглись изменениям методологические аспекты их проектирования. В результате широкого применения микропроцессорных устройств удалось повысить степень автоматизации процесса измерений, расширились возможности цифровой обработки сигналов измерительной информации. Появление микропроцессоров позволило создать «интеллектуальные» средства измерений с адаптацией к конкретным условиям работы, разработать многоканальные автоматические средства измерений, автоматизировать процессы хранения, регистрации и передачи информации, упростить принципы сопряжения средств измерений с внешними устройствами.

Введение микропроцессоров в структуру средств измерений позволяет достигнуть большей точности и достоверности измерений, расширить функциональные возможности аппаратуры и повысить эффективность выполнения таких специфических для измерений операций, как усреднение, градуировка, коррекция, линеаризация характеристик, компенсация возмущающих воздействий, а также автоматическое сравнение отсчетов с допускаемыми нормами, выполнение математических операций над данными.

Большое значение для создания автоматических средств измерений приобретают и другие элементы, выполненные в микроэлектронном исполнении: интегральные цифроаналоговые (ЦАП) и аналого-цифровые преобразователи (АЦП), электронные коммутаторы, усилители, источники опорного напряжения и питания, элементы индикации, интерфейсные схемы и др. Их применение наряду с микропроцессорами позволяет значительно упростить решение общей задачи автоматизации измерений.

Успешное проектирование автоматических средств измерений во многом зависит от умения использовать современные достижения вычислительной техники, автоматики, микроэлектроники и методов измерения физических величин, от уровня схемотехнической подготовки специалиста в области проектирования и разработки современных средств измерений. Выбор того или иного варианта решения конкретной задачи автоматизации трудно поддается математическому анализу и часто решение выносится на основе априорных сведений и опыта разработчика. Применение современной элементной базы в измерительной технике требует определенного изменения воззрений на основные принципы технического проектирования средств измерений ввиду переноса главного упора на системо-технические и программные аспекты проектирования.

Цель данного пособия – обобщить результаты автоматизации метрологических работ, выделить среди направлений те пути, которые способствуют более эффективному использованию измерительного потенциала, и проиллюстрировать применение новых достижений в области автоматизации метроло-

гических работ в исследованиях метрологической направленности. Определяющей тенденцией в автоматизации измерений является рост применения компьютеров.

Автор данного учебного издания не ставит своей целью охватить все сферы метрологической деятельности, а ограничиться рассмотрением достаточно узкого круга вопросов, которые касаются в основном автоматизации средств измерений и работ по метрологическому обеспечению на основе современных баз данных. Последовательность в изложении материала дисциплины схематически изображена на рисунке 1.2.

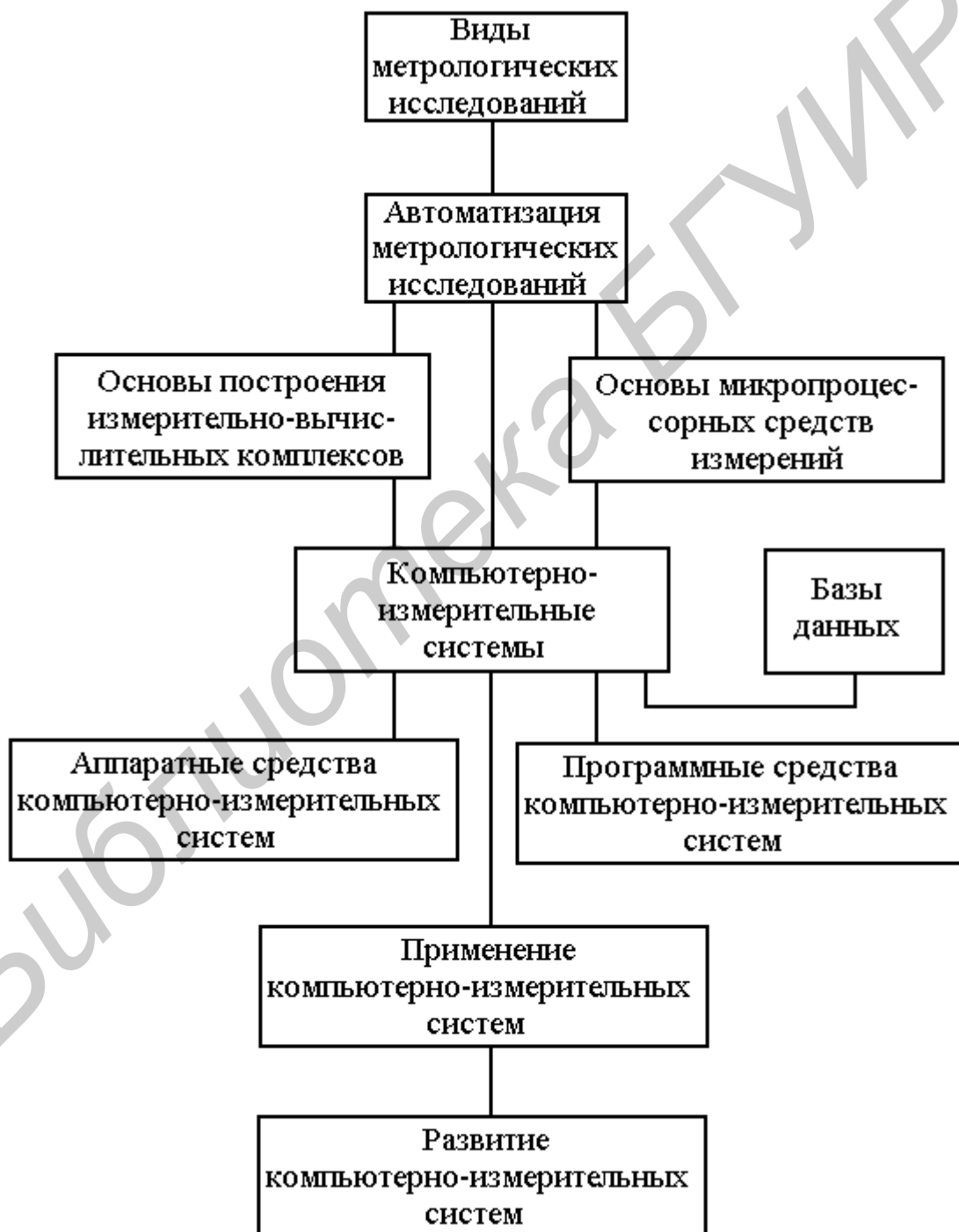


Рисунок 1.2 – Последовательность изложения материала дисциплины

Из рисунка следует, что работы по автоматизации метрологических исследований (как и вообще измерений) ведутся в трех направлениях. Два из этих направлений, представляемых микропроцессорными средствами измерений и измерительно-вычислительными комплексами, рассматриваются в учебном пособии в порядке обзора. Третье направление, представляемое компьютерно-измерительными системами, и составляет основное содержание данного учебного издания. Особо выделен материал, посвященный вопросам проектирования и создания баз данных, в начале пособия приведен список сокращений.

Учебно-методическое пособие, в первую очередь, предназначено для студентов специальности 1-54 01 04 «Метрологическое обеспечение информационных систем и сетей» при изучении дисциплины «Автоматизация метрологических работ», но может быть полезно и для студентов других специальностей, а также магистрантов, аспирантов и инженеров, работающих в области метрологии и метрологического обеспечения.

Библиотека БГУИР

1 ОБЩИЕ ВОПРОСЫ АВТОМАТИЗАЦИИ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ РАБОТ

1.1 Виды метрологических работ. Основные термины и определения

Как уже отмечалось во введении, метрологические работы – это совокупность работ в области метрологии и метрологического обеспечения, стандартизации и сертификации, охватывающие различные сферы деятельности инженера-метролога. Поэтому целесообразно прежде всего разобраться в основных терминах и определениях в этой области, чтобы научиться правильно оперировать понятиями.

Метрология – наука об измерениях, методах и средствах их единства и способах достижения требуемой точности. К задачам метрологии относятся не только теоретические вопросы обеспечения единства измерений и достижения требуемой точности, но и установление обязательных правил, требований и организационных мероприятий, направленных на достижение этих целей. В связи с этим различают теоретическую и законодательную метрологию.

Содержанием теоретической метрологии является разработка и совершенствование теоретических основ измерений и измерительной техники, научных основ обеспечения единства измерений в стране. К ее основным проблемам относятся: развитие общей теории измерений и теории погрешностей, в том числе создание новых методов измерений и разработка способов исключения или уменьшения погрешностей; создание и совершенствование систем единиц физических величин; создание и совершенствование системы эталонов; создание и совершенствование научных основ передачи размеров единиц физических величин от эталонов к рабочим средствам измерений.

Законодательная метрология – раздел метрологии, включающий комплексы взаимосвязанных и взаимообусловленных общих правил, требований и норм, а также другие вопросы, требующие регламентации и контроля со стороны государства, направленные на обеспечение единства измерений и единообразия средств измерений. Основная задача законодательной метрологии – создание и совершенствование системы государственных стандартов, которые устанавливают правила, требования и нормы, определяющие организацию и методику проведения работ по обеспечению единства и точности измерений, а также организация и функционирование соответствующей государственной службы.

Единство измерений – состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах и погрешности измерений известны с заданной вероятностью.

Единообразие средств измерений – состояние средств измерений, характеризующееся тем, что они проградуированы в узаконенных единицах и их метрологические свойства соответствуют нормам.

Для организации обеспечения единства измерений и единообразия средств измерений в стране создана метрологическая служба.

Метрологическая служба – сеть государственных и ведомственных органов и их деятельность, направленная на обеспечение единства измерений и единообразия средств измерений в стране. Эти органы осуществляют надзор за состоянием средств измерений и обеспечивают передачу размера единиц физических величин от эталонов к рабочим средствам измерений.

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

Индивидуальность в количественном отношении следует понимать в том смысле, что свойство может быть для каждого объекта в определенное число раз больше или меньше, чем для другого. Для выражения количественного различия между одноименными величинами используют понятие «размер физической величины».

Размер физической величины – количественная определенность физической величины, присущая конкретному материальному объекту, системе, явлению или процессу.

Размер величины существует объективно, независимо от того, знаем мы его или нет, можем мы его измерить или не можем. Целью измерения и является определение размера величины, причем результат измерения должен выражаться числом.

Оценка физической величины в виде некоторого числа принятых для него единиц называется *значением физической величины*, а отвлеченное число, входящее в значение физической величины, называется *числовым значением* (например, 5 А – значение тока, причем число 5 – это числовое значение).

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

Каждая единица физической величины имеет свое наименование (ампер, ом, вольт и т. д.). Единицы физических величин подразделяются на основные и производные и объединяются в соответствии с принятыми принципами в системы единиц физических величин. У нас в стране установлено обязательное применение Международной системы единиц (*SI*) в соответствии с техническим регламентом 2007/003/ВУ «Единицы измерений, допущенные к применению на территории Республики Беларусь».

1.2 Измерение физических величин

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

Измерения классифицируются в зависимости от способа получения измерительной информации, характера поведения измеряемой величины, от способа

выражения результатов и от условий, определяющих точность измерений.

В зависимости от способа получения измерительной информации, измерения подразделяются на *прямые, косвенные, совокупные и совместные*.

1.3 Метрологическое обеспечение измерений

Метрологическое обеспечение (МО) – это установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений. Таким образом, МО имеет научную, техническую и организационную основы.

Научной основой МО является метрология как наука.

Технической основой МО являются следующие системы:

– государственных эталонов единиц физических величин, обеспечивающая воспроизведение единиц с наивысшей точностью;

– передачи размеров единиц физических величин от эталонов всем СИ;

– разработки, постановки на производство и выпуска в обращение рабочих СИ, обеспечивающих определение с требуемой точностью характеристик продукции, технологических процессов и других объектов;

– обязательных государственных испытаний СИ, предназначенных для серийного или массового производства;

– обязательной государственной и ведомственной поверки или метрологической аттестации СИ, обеспечивающая единообразие СИ при их изготовлении, эксплуатации и ремонте;

– стандартных справочных данных о физических константах и свойствах веществ и материалов, обеспечивающая достоверными данными научные исследования, разработку конструкции изделий и технологических процессов их изготовления и т. д.;

– разработки, стандартизации и аттестации методик выполнения измерений.

Существующая система МО измерений опирается на комплекс стандартов государственной системы измерений (ГСИ). Основными объектами стандартизации ГСИ являются:

– термины и определения в области метрологии;

– единицы физических величин, нормы точности измерений и формы представления результатов измерений;

– номенклатура нормируемых метрологических характеристик СИ;

– методики выполнения измерений;

– государственные эталоны и поверочные схемы;

– методы и средства поверки СИ;

– организация и порядок проведения государственных испытаний, поверки и метрологической аттестации СИ и т. д.

Организационной основой МО является метрологическая служба Республики Беларусь.

Метрологическая служба (МС) Республики Беларусь включает в себя органы государственной и ведомственных метрологических служб. Государ-

ственную метрологическую службу возглавляет Государственный комитет по стандартизации, метрологии и сертификации (Госстандарт), в которую также входят центры стандартизации и метрологии (их в республике 16) и лаборатории государственного надзора за стандартами и СИ.

Ведомственную МС образуют отделы министерств (ведомств), на которые возлагается руководство МС, головная и базовые организации МС, а также отделы главных метрологов (или другие подразделения), которые организуют работы по МО непосредственно на предприятиях и в организациях.

К основным задачам государственных и ведомственных МС в части МО измерений относятся: осуществление метрологического надзора за СИ, создание комплекса стандартов ГСИ и контроль за выполнением их требований.

Метрологический надзор за СИ – это деятельность органов МС, направленная на обеспечение единообразия СИ. Метрологический надзор, осуществляемый органами Государственной МС, называют государственным, а органами ведомственных МС – ведомственным контролем. Основными формами метрологического надзора за СИ, находящимися в обращении, являются поверка, метрологическая ревизия и метрологическая экспертиза СИ.

Поверкой СИ называется определение метрологическим органом погрешностей средства измерений и установление его пригодности к применению. Поверка СИ, производимая органами Государственной МС, называется государственной, а органами ведомственных МС – ведомственной. Обязательной государственной поверке подлежат образцовые СИ и рабочие СИ, связанные с учетом материальных ценностей, взаимными расчетами и торговлей, охраной труда и здоровья населения, а также охраной окружающей среды. Остальные рабочие СИ поверяются в органах ведомственных МС. В зависимости от целевого назначения поверка может быть *первичной, периодической, внеочередной и инспекционной*.

Первичная поверка – это первая поверка СИ при выпуске его из производства или ремонта. *Периодическая поверка* проводится при эксплуатации и хранении СИ через определенные промежутки времени – *межповерочные интервалы*, устанавливаемые с расчетом обеспечения исправности СИ в период между поверками. *Внеочередная поверка* также проводится при эксплуатации и хранении СИ, но независимо от сроков периодической поверки. Чаще всего к ней прибегают, когда необходимо удостовериться в исправности СИ, при корректировке межповерочных интервалов, при контроле результатов периодической поверки и в других случаях. Наконец, *инспекционная поверка* – это поверка СИ, производимая при ревизии СИ.

Помимо целевого назначения, поверка подразделяется в зависимости от метода проведения на комплектную и поэлементную, характерные для электро- и радиоизмерительных приборов. При *комплектной* поверке определяют погрешности СИ, свойственные ему как единому целому, а при *поэлементной* поверке – по погрешностям его отдельных частей (функциональных узлов).

Метрологическая ревизия проводится органами Государственной МС для определения соответствия СИ и применяемых методов выполнения измерений

современному уровню МО. Кроме того, при метрологической ревизии проверяется готовность СИ к выполнению измерений с заданной точностью, для чего определенная часть СИ подвергается выборочной поверке.

Последняя форма метрологического надзора – *метрологическая экспертиза* проводится для экспертной оценки состояния СИ и правильности их применения и поверки.

Рассмотренные формы метрологического надзора характерны, как было подчеркнуто, для СИ, находящихся в обращении. Если же речь идет о вновь разрабатываемых СИ, то каждая разработка должна сопровождаться исследованием СИ в соответствующих метрологических органах для объективной оценки его метрологических свойств. Такое исследование вместе с документальным оформлением результатов называется *метрологической аттестацией* СИ. В отличие от поверки, которой подлежит каждый экземпляр СИ, метрологической аттестации подлежит либо тип СИ, либо отдельные экземпляры СИ. Первый случай относится к СИ, предназначенным для серийного или массового производства. Результаты метрологической аттестации в этом случае подлежат рассмотрению и оцениванию при государственных приемочных испытаниях средств измерений, организация и порядок проведения которых регламентируются СТБ 8.001-93. Второй случай касается так называемых *нестандартизированных* СИ, изготавливаемых в единичных экземплярах и являющихся уникальными. Порядок метрологической аттестации в этом случае устанавливается СТБ 8.004-93.

Метрологический надзор и аттестация СИ, обеспечивая единообразие СИ при их разработке, изготовлении и эксплуатации, не решают, естественно, задачу обеспечения единства измерений в целом и являются лишь одной из составляющих технической основы МО. Действительно, если контролировать только погрешности СИ, а выбор самого метода измерения, последовательности приемов выполнения измерений и обработки их результатов, обеспечение необходимых внешних условий и т. п. оставить на усмотрение оператора, то тогда результаты измерений будут в значительной степени зависеть от квалификации оператора. Следствием этого может оказаться несоответствие результатов измерений поставленным требованиям, либо, наоборот, результатам измерений будет приписываться завышенная точность.

Ликвидировать такой принципиальный недостаток можно только путем стандартизации и аттестации *методик выполнения измерений* (МВИ), понимая под МВИ совокупность методов, средств, процедуры и условий подготовки проведения измерений, а также правил обработки результатов наблюдений, необходимых для выполнения данного измерения. Стандартизация и аттестация МВИ является в настоящее время одной из основных задач государственной и ведомственных МС в рамках МО измерений. Параллельно с этим организуется метрологический надзор за МВИ.

После того как все предполагаемые составляющие погрешности результата измерения оценены и внесены соответствующие поправки, все еще остается сомнение в том, что результат измерения близок к истинному значению изме-

ряемой величины. До недавнего времени количественной мерой этого сомнения было принято использовать понятие «погрешности измерения». Однако классификация погрешности измерения на случайную и систематическую и построенные на таком разделении методы ее описания в последнее время перестали по разным причинам удовлетворять ряду метрологических требований. Поэтому стали поступать предложения по совершенствованию этих представлений, обоснованные «*несоответствием принципов оценивания погрешностей современным практическим задачам*».

По инициативе ряда международных метрологических организаций была предложена концепция нового представления результатов измерений. Ее суть проста. Обработка результатов измерений практически везде проводится с использованием аппарата теории вероятностей и математической статистики и везде погрешности разделяются на случайные и систематические. Однако модели погрешностей, значения доверительных вероятностей и формирование доверительных интервалов в разных странах заметно отличаются друг от друга, что затрудняет сличение результатов измерений.

Для устранения этих сложностей было разработано «Руководство по выражению неопределенности в измерении» (Guide to the expression of uncertainty in measurement ISO/TAG – /WG3, Geneva» June 1992). Его основными положениями являются:

- запрет на использование таких понятий, как истинное и действительное значения измеряемой величины, погрешность, относительная погрешность, точность измерения, случайная и систематическая погрешности;

- вместо термина «погрешность измерения» введено понятие «*неопределенность измерения*», трактуемое как «параметр, связанный с результатом измерения, характеризующий дисперсию значений, которые можно обоснованно приписать измеряемой величине»;

- разделение составляющих неопределенности на два типа: А и Б.

Неопределенности типа А можно количественно оценить статистическими методами на основе многократных измерений и описать традиционными характеристиками – дисперсией или СКО. Взаимодействие неопределенностей типа А описывается коэффициентом взаимной корреляции.

Неопределенности типа В могут быть оценены любыми другими методами, кроме статистических. Они должны описываться величинами, аналогичными дисперсии или СКО, поскольку именно эти характеристики можно использовать для объединения неопределенностей типа В как между собой, так и с неопределенностями типа А.

Очевидно, что неопределенность типа А есть не что иное как *характеристика случайной составляющей погрешности результата измерения*, а неопределенность типа В – *характеристика неисключенной систематической погрешности*. Причем, объединение неопределенностей типа А и В проводится по тем же правилам, что и при объединении составляющих погрешности, т. е. суммированием дисперсий.

Введение понятия «неопределенность» привело к появлению нового вида метрологических работ – калибровке средств измерений.

1.4 Стандартизация

Стандартизация – научно-техническая деятельность, направленная на достижение оптимальной степени упорядочения в определенной области посредством установления требований для всеобщего и многократного применения в отношении реально существующих или потенциальных задач.

Важнейшими результатами деятельности по стандартизации являются: удовлетворение требований потребителя, повышение качества продукции, процессов и услуг в рамках их функционального назначения, устранение барьеров в торговле, соответствие и содействие научно-техническому и экономическому сотрудничеству. Основные положения по стандартизации в Республике Беларусь устанавливаются СТБ 1.0-92 «Государственная система стандартизации. Основные положения». Стандартизация осуществляется на пользу и при участии всех заинтересованных сторон. Она базируется на новейших достижениях научно-технического прогресса.

Стандартизация решает поставленные перед ней задачи путем разработки, внедрения стандартов и других нормативных документов по стандартизации (НДС) и проведения государственного надзора за ними.

НДС по стандартизации – документ, содержащий правила, требования, нормы, общие принципы или характеристики, касающиеся различных видов деятельности или их результатов, обязательный в пределах области распространения. Различают два вида НДС:

Стандарт – НДС, разработанный на основе соглашения большинства заинтересованных сторон, в котором устанавливаются для всеобщего и многократного использования правила, общие принципы, характеристики, требования и методы, касающиеся различных видов деятельности или их результатов, и направленный на достижение оптимальной степени упорядоченности в определенной области.

Технические условия – НДС на конкретную продукцию (услугу), утвержденный разработчиком (изготовителем) по согласованию с заказчиком (потребителем).

Государственный надзор – деятельность специально уполномоченных государственных органов по контролю за соблюдением предприятиями (организациями) всех форм собственности, должностными лицами и гражданами обязательных требований НДС к качеству продукции, процессов и услуг.

Стандартизация может осуществляться на нескольких уровнях: международном, межгосударственном (региональном), национальном (государственном) и на уровне предприятия (объединения, ассоциации, фирмы и т. п.).

1.5 Сертификация

Оценка продукции, процессов, услуг может проводиться: первой стороной – проводит сам производитель; второй – проводит потребитель на оборудовании поставщика и третьей – независимой от производителя и поставщика – это и есть сертификация. Следовательно, *сертификация* – это процедура, посредством которой третья сторона письменно удостоверяет, что продукция, процесс или услуга соответствуют заданным требованиям.

Сертификация осуществляется в целях:

- обеспечения безопасности продукции для жизни, здоровья и имущества населения, а также охраны окружающей среды;
- подтверждения соответствия показателей качества продукции, заявленных изготовителем (продавцом), конкретным нормативным актам и НДС;
- создание условий для участия изготовителей (продавцов) продукции в международной торговле и повышения конкурентоспособности продукции;
- защиты республиканского рынка от некачественной и небезопасной продукции, поступающей по импорту.

Для выполнения этих целей и предназначена система сертификации.

Система сертификации – система, располагающая собственными правилами процедуры и управления для проведения сертификации. В зависимости от области распространения существуют национальные, региональные и международные системы сертификации. Общее руководство Системой осуществляет Республиканский орган по сертификации – Госстандарт.

Национальной системой сертификации предусмотрены следующие виды деятельности:

- сертификация продукции;
- сертификация услуг;
- сертификация систем качества (СК);
- сертификация персонала;
- аккредитация органов по сертификации однородной продукции и услуг;
- аккредитация органов по сертификации СК;
- аккредитация органов по сертификации персонала;
- аккредитация центра подготовки экспертов-аудиторов по качеству;
- инспекционный контроль за сертифицированной продукцией, услугами, СК, персоналом, аккредитованными органами и центром подготовки экспертов-аудиторов по качеству;
- подготовка и аттестация экспертов-аудиторов по качеству;
- ведение Реестра Системы.

В рамках Системы могут создаваться подсистемы сертификации по видам продукции, услуг и отдельным требованиям.

Рассмотрев в общем виде основные термины и определения в области метрологии, метрологического обеспечения, стандартизации и сертификации, мы можем перейти к основному вопросу данного учебного пособия, а именно к вопросу автоматизации метрологических работ.

2 ХАРАКТЕР МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

За многовековую историю человечество выработало много способов познания окружающей действительности и самого себя. Например, одной из форм духовно-практического освоения мира является искусство. Однако точное описание свойств явлений, предметов материального мира предполагает их количественную оценку и применение математических приемов – наиболее мощного формализованного аппарата логического вывода. Именно измерения обеспечивают человека численными данными, характеризующими количественно свойства реального мира.

Для эффективного применения средств измерений и получения сопоставимых результатов должны быть решены основные задачи метрологии:

- установление законодательным путем разрешенных к применению единых мер физических величин (эталонов);
- упорядочение деятельности по поддержанию единообразия мер.

2.1 Виды экспериментальных метрологических работ

Любую систему мер физических величин метрологи, как правило, разделяют на две части – интеллектуальную и действующую.

Интеллектуальная система мер является моделью действующей системы и представляет собой определения единиц физических величин, связь между ними, принципы их реализации. Ядром интеллектуальной системы является законодательный акт, например, государственный стандарт, устанавливающий разрешенные к применению единицы физических величин.

Действующая система – это совокупность реально существующих элементов, обеспечивающих единообразие мер. Ядром действующей системы являются эталоны физических величин.

Разработке стандарта на единицы физических величин и созданию эталонов предшествуют теоретические и экспериментальные исследования, логику которых можно проследить в следующей последовательности:

- поиск и исследования стабильных физических явлений и процессов, способных составить основу новых эталонов, в большей степени отвечающих перспективным требованиям практики. По своему содержанию и целям эти работы практически смыкаются с общеприродными исследованиями. К ним, в частности, относятся исследования коллективных квантовых явлений микромира, уточнение фундаментальных физических констант;
- исследования свойств эталонов физических величин с целью установления их метрологических характеристик и потенциальных возможностей. Изученные эталоны применяют для поверочных целей и (значительно реже) в экспериментальных исследованиях в качестве прецизионных инструментов наряду с другими изделиями научного и аналитического приборостроения;
- изучение свойств измерительных приборов, преобразователей, стандартных образцов. Из-за влияния различных факторов, в средствах измерений про-

текают деградационные процессы, в результате чего метрологические характеристики средств измерений не остаются постоянными и требуют периодической проверки. Эти работы являются самыми массовыми во всей метрологической деятельности и цель их – обеспечение единства измерений. Основная часть поверочных процедур регламентируется нормативно-техническими документами с целью избежания ошибочных решений.

На определенных этапах развития возможности какого-либо эталона практически исчерпаны и метрологи-исследователи стоят перед необходимостью создания нового эталона на других физических принципах или даже пересмотра определения соответствующей физической величины. Например, в 1967 г. был утвержден цезиевый стандарт частоты, а в 1983 г. принято новое определение единицы длины – метра. В последние годы обнаружен и изучен ряд коллективных квантовых явлений (например, эффект Джозефсона, квантовый эффект Холла), которые, вероятно, приведут к пересмотру системы эталонов электрических и магнитных величин.

Однако столь революционные события происходят в метрологии не часто и перед метрологами стоит постоянная задача интенсификации использования уже накопленного потенциала.

Для полноты следовало бы также упомянуть и о теоретических исследованиях метрологической направленности. Однако эти работы не несут в себе каких-либо «метрологических» черт. В области общезначимых исследований эти работы примыкают к теоретическим исследованиям в физике и вычислительная техника применяется в этом случае для решения модельных задач. В области прикладной метрологии теоретические исследования носят системный характер, основаны на использовании баз данных, характеризующих достигнутый уровень метрологического потенциала, и имеют целью поиск научно обоснованных рекомендаций для плановых и административных органов по вопросам разработки, выпуска и распределения средств измерений с учетом потребностей отраслей народного хозяйства регионов страны. Это типовая задача автоматизированных систем управления.

Итак, основными объектами экспериментальных метрологических исследований являются физические явления, процессы, эталоны физических величин и другие средства измерений.

2.2 Исследования стабильных явлений и процессов

Экспериментальные исследования бывают *качественные и количественные*. Качественный эксперимент проводится тогда, когда имеется некая гипотеза, которую необходимо проверить, поскольку рассмотрение теоретической модели не позволяет вполне определенно принять ее или отвергнуть. Качественный эксперимент призван подтвердить наличие некоторого эффекта или убедить в его отсутствии с целью уточнения теоретической модели.

Кажущаяся простота ответа (да или нет) не должна вводить исследователя в заблуждение. Часто от теоретического предсказания эффекта (точнее, пред-

положения о его наличии) до экспериментального подтверждения его проходят годы. Бывает, что предсказания и не сбываются. Автоматизация качественного эксперимента имеет целью стабилизацию его условий, уменьшение влияния флуктуаций, учет влияния мешающих полей и, в конечном счете, повышение достоверности вывода о принятии или непринятии гипотезы. Выражаясь языком статистической радиотехники, задача качественного эксперимента не измерить сигнал, а обнаружить его или подтвердить отсутствие сигнала. Проведение большого числа наблюдений за короткое время, чтобы внешние условия заметно не изменились, обработка массива данных методом накопления или другими приемами оптимальной фильтрации – вот основные функции вычислительной техники в качественном эксперименте.

Классическим примером качественного эксперимента является опыт Майкельсона – Морли, доказавший независимость скорости света от движения Земли и заставивший физиков отказаться от гипотезы светоносного эфира. Опыты по уточнению скорости света, потребовавшие для проведения эталонных средств и повлиявшие на пересмотр определения единицы длины, являются примерами количественных экспериментов.

Количественному эксперименту предшествует не гипотеза, а конкретная модель известного явления или процесса, свойства которого нуждаются в уточнении. Если качественный эксперимент часто требует привлечения инструмента с высокой чувствительностью и высокой разрешающей способностью, то для количественного эксперимента необходимы высокоточные приборы, а иногда и эталоны, как, например, при уточнении значений фундаментальных физических констант.

Качественные эксперименты вместе с теоретическими исследованиями являются весьма мощным средством фундаментальной науки. Что касается количественных экспериментов, то метрологи не только внимательно следят за результатами физиков-экспериментаторов, но и активно участвуют в соответствующих исследованиях с целью поиска путей создания естественных эталонов. Что это такое и зачем это нужно для метрологии? Для ответа на этот вопрос давайте обратимся к эволюции меры длины – важнейшей физической величины.

С древних времен люди осознавали важность такого качества меры физической величины как доступность. Поэтому они искали эту меру буквально под руками (дюйм, пядь, локоть), или под ногами (фут), или даже под носом (ярд – расстояние от середины носа до среднего пальца вытянутой руки). Однако эти меры были не точны.

Дальнейшая история – это постоянные поиски компромисса между требованиями точности мер длины и их доступностью. Просуществовавший почти 100 лет прототип эталона метра на платино-иридиевом стержне был практически недоступен среднему пользователю, и единообразие мер обеспечивалось с помощью копий эталона на основе поверочной иерархии. Всякая копия уступает оригиналу и за доступность приходилось платить потерей точности.

С развитием квантовой механики и квантовой электродинамики было об-

наружено одно из удивительнейших свойств микромира – его единство. Элементарные частицы с завидным постоянством проявляют свои свойства независимо от места и условий эксперимента. Заряды всех электронов – одинаковы, квантовые переходы при изменении атомарного состояния данного вещества – одинаковы и т. п. Природа этого явления не выяснена, однако и физики, и метрологи стремятся поставить единство микромира на службу единству измерений.

В этой фундаментальной метрологической проблеме, называемой проблемой естественных эталонов, основная особенность, затрудняющая практическое использование результатов, это огромная разница в масштабах микромира и привычного нам макромира. Поэтому особую ценность для метрологии имеют коллективные квантовые явления, представляющие собой проявления квантовых свойств веществ в макромасштабе. К этим явлениям относятся сверхпроводимость и другие изменения фазового состояния вещества, излучения при квантовых переходах в атомах, эффект Джозефсона, квантовый эффект Холла и др. Целью соответствующих метрологических исследований является уточнение коэффициентов, входящих в уравнения, описывающие эти явления, или уточнение критических значений параметров, характеризующих состояние вещества.

Вернемся к единице длины. Платино-иридиевый прототип метра не обеспечивал точность лучше 0,1–0,2 мкм, что соответствует относительной погрешности порядка 10^{-7} . Уже в 50-х годах потребовалась на порядок более высокая точность. К этому времени был накоплен обширный экспериментальный материал, свидетельствующий о высокой стабильности длины волны излучения при переходе атома из одного стационарного состояния в другое. Исследования спектральных линий многих элементов показали, что оранжевая линия изотопа криптона-86 имеет наибольшую точность воспроизведения единицы длины волны и с 1960 года метр определяется как длина, равная 1650763,73 длины волны в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями $2p_{10}$ и $5d_5$ атома криптона-86.

Чем объясняется такое «не круглое» значение длин волн в метре? Дело в том, что новые определения единиц физических величин должны не отменять прежние значения, а уточнять их. Смена оснований не должна разрушать существующую надстройку. Это одно из следствий принципа дополнительности в физике. Итак, размер метра не изменился, а уточнился.

Реализация нового определения метра позволила повысить примерно в 10 раз точность воспроизведения размера единицы длины. Но и этот ресурс точности был исчерпан за 20 лет, и в 1983 г. было принято новое определение метра, как длины пути, проходимого в вакууме светом за $1/299792458$ долю секунды. Это определение основано на фундаментальном явлении – постоянстве скорости распространения электромагнитных волн и открывает возможность повышения точности измерения линейных размеров еще на 2 порядка.

Подобная логика перехода с механических эталонов на естественные характерна и для других физических величин. Исключением остается эталон мас-

сы. Попытки перейти к естественному эталону массы, основанному на счете числа атомов в образце одноизотопного состава, пока к успеху не привели. Здесь уместно заметить, что измерения исторически восходят к простому целочисленному счету и снова возвращаются к технике счета на новой научно-технической основе – подсчету элементарных событий микромира.

Итак, естественные эталоны позволяют использовать единство микромира для целей единообразия мер физических величин. Нет необходимости хранить естественный эталон за тремя замками, как это делается с механическими эталонами. Более того, естественные эталоны могут быть децентрализованы, что ослабляет сковывающее влияние «демона поверочной иерархии» и приближает эталоны к практическим задачам измерений.

Автоматизация количественного эксперимента по уточнению свойств стабильных явлений и процессов преследует те же цели, что и автоматизация физических исследований – максимально полное использование всех исследовательских средств для уточнения модели изучаемого объекта с дальнейшим применением новых знаний в практической деятельности.

2.3 Эталоны физических величин как объект исследования

Эталоны физических величин и другие средства измерений должны сохранять свои метрологические характеристики в течение длительного периода. Поэтому они являются объектами не только применения, но и изучения. Для эталона не применим обычный способ метрологической аттестации средства измерений – путем сравнения с мерой. *Эталон* – исходная мера единицы физической величины.

Высокая точность эталона поддерживается двумя способами: активным и пассивным. Активный способ – это стабилизация внешних условий, ослабление влияния мешающих факторов, исключение форсированных режимов использования эталона. Пассивный способ – это косвенные исследования метрологических характеристик эталона.

Для повышения надежности эталона, а также нашей уверенности в неизменности его метрологических характеристик основные узлы эталона изготавливаются в нескольких экземплярах. Основным приемом при исследованиях групповой меры – это взаимные сличения мер в группе. Процедура сличений формализуется и поэтому легко поддается автоматизации. Это исключает субъективные ошибки, повышает точность и снижает трудоемкость сличений.

Однако в результатах этих сличений не содержится никакой информации о возможном систематическом дрейфе всей групповой меры. Поэтому большую ценность представляют результаты сличений национальных эталонов разных стран, которым, как правило, присущи систематические погрешности разной природы. Международные сличения являются распространенной практикой метрологических организаций.

Современные эталоны – это сложные измерительные комплексы и исследование их свойств представляет собой разноплановый физический экспери-

мент. Нужно иметь в виду, что чем длительнее этот эксперимент, тем меньше остается времени на выполнение эталоном своих прямых функций как исходной национальной меры физической величины. Автоматизация исследований эталонов ставит целью интенсификацию этих работ, сокращение времени на их проведение, а также повышение точности. Применение для этих целей многофункциональных программно-перестраиваемых средств измерений обосновывается не только технически, но и экономически.

В 2000 году в ОАО МНИПИ закончены работы по созданию метрологического комплекса для воспроизведения единицы постоянного электрического напряжения и электродвижущей силы (вольта) и проведены работы по ее сличению с эталоном вольта Российской Федерации во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева.

Комплекс эталона размещен в помещении, общая площадь которого составляет 90 м^2 , в том числе площадь экранированной комнаты, в которой поддерживается температура $21 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ составляет 15 м^2 .

Структурная схема построения комплекса показана на рисунке 2.1, общий вид измерительного оборудования – на рисунке 2.2.

Комплекс включает в себя криогенное оборудование для охлаждения зонда с джозефсоновскими переходами (ДП) до температуры 4 К, СВЧ-аппаратуру, комплект радиоизмерительной аппаратуры, автоматизированное рабочее место (АРМ) и два термостатированных комплекта (по 12 штук) нормальных элементов с блоком коммутации для сличения, хранения и передачи единицы напряжения вторичным эталонам.

Рабочая частота генератора СВЧ-излучения, воздействующего на ДП, составляет 8,795 ГГц. Она стабилизирована петлей ФАПЧ с опорной частотой 5 МГц с выхода рубидиевого стандарта частоты и времени Ч1-78. Частота СВЧ излучения контролируется частотомером ЧЗ-66. Связь частотомера с ЭВМ осуществляется по интерфейсу – каналу общего пользования (КОП).

Режим работы по току ДП и визуальный контроль за их работой осуществляется с помощью специального характериографа. Напряжение, получаемое с ДП, набирается ступенями по 18,186 мкВ и контролируется нановольтметром В2-38.

Максимальное значение получаемого напряжения составляет 8 мВ, наиболее устойчивое значение – 3,982 мВ. С помощью специальных устройств (регулятора тока, высокостабильного делителя напряжения и детектора нулевого уровня – ДНУ) воспроизводимое напряжение повышается до 1,018603 В, которое затем через компаратор Р3003 передается для сравнения с ЭДС нормальных элементов.

В качестве регистрирующего прибора используется вольтметр 3458А фирмы «Hewlett-Packard». Связь с ЭВМ осуществляется по каналу общего пользования. В качестве ДНУ используется нановольтметр НФК-3-2. К нему предъявляются жесткие требования по уровню шумов и быстродействию, а к вольтметру НР3458А – по входному сопротивлению, быстродействию, стабильности и разрешающей способности.

АРМ организован на базе вольтметра НР3458А и персональной ЭВМ со специальными программами обработки результатов измерений как при воспроизведении, так и при передаче и сличении нормальных элементов. Сличение НЭ осуществляется по круговому принципу (каждый НЭ сравнивается с каждым из десяти НЭ, входящих в группу).

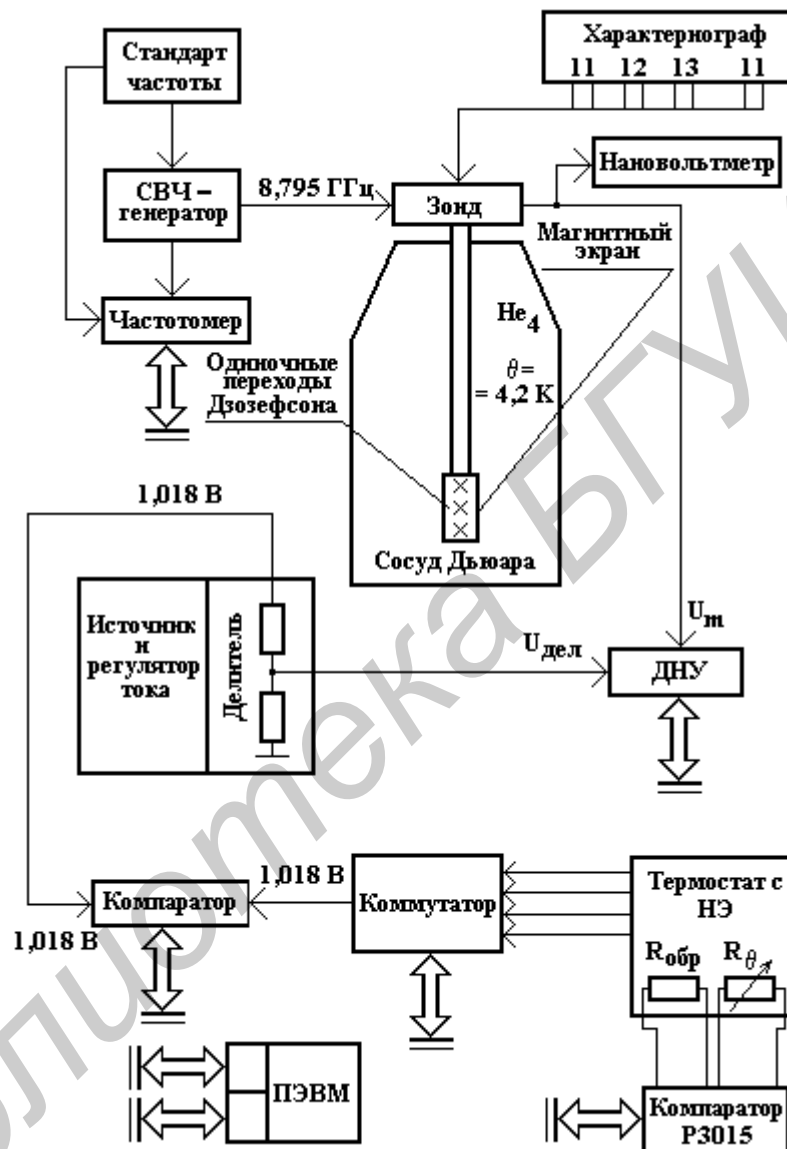


Рисунок 2.1 – Структурная схема построения комплекса для воспроизведения единицы постоянного электрического напряжения и электродвижущей силы

Результаты сличения НЭ, выполненные во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, достаточно высоки. СКО результатов сличения с российским эталоном вольта составляют $2 \cdot 10^{-8}$ для группы НЭ № 2 и $4 \cdot 10^{-8}$ для группы НЭ № 1.

Результаты, полученные при метрологической аттестации комплекса, позволили рекомендовать ввести его в опытную эксплуатацию.

В настоящее время с помощью созданного эталона можно выполнять работы по аттестации нормальных элементов по 1 разряду, по калибровке компара-

торов и калибраторов постоянного напряжения (на пределе 1 В), по метрологическому исследованию высокоточных отечественных и зарубежных вольтметров, по исследованию высокоточных делителей напряжения и другие работы.



Рисунок 2.2 – Общий вид комплекса

Основные технические данные комплекса:

- воспроизводимое значение постоянного напряжения: 1 В;
- среднее квадратическое отклонение: $5 \cdot 10^{-8}$.

Внедрение созданного эталона обеспечит возможность повышения точности электрических измерений в Республике Беларусь и качества метрологического обслуживания народного хозяйства, а также обеспечит внедрение в республике новой поверочной схемы согласно ГОСТ 8.027-01.

Ведутся работы по дальнейшему совершенствованию этого метрологического комплекса. В частности, на основе функционального преобразователя, выполненного в виде матрицы ДП и изготовленного в *PTB* (Германия), включающей несколько тысяч ДП, планируется получить выходное напряжение 1 В, определяемое только физическими константами в соответствии с выражением

$$U = n \frac{h}{2e} F,$$

где n – число ступенек ВАХ переходов;

h – постоянная Планка;

e – заряд электрона;

F – частота электромагнитного облучения ДП.

Это позволяет повысить точность воспроизведения напряжения на несколько порядков.

3 ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ И ПРИНЦИПЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ

В общем смысле под *автоматизацией* понимают применение методов, технических средств и систем управления, освобождающих человека частично или полностью от непосредственного участия в процессах получения, преобразования, передачи и использования энергии, материалов или информации. Автоматизация является одним из основных направлений научно-технического прогресса.

3.1 Цели автоматизации измерений

Цели автоматизации измерений представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Цели автоматизации метрологических работ

Научные	Технические	Экономические	Социальные
<p>Повышение эффективности и качества результатов научных исследований за счет более полного исследования моделей.</p> <p>Повышение точности и достоверности результатов исследований за счет оптимизации измерительного эксперимента.</p> <p>Получение качественно новых научных результатов, невозможных без использования компьютера.</p>	<p>Повышение качества продукции за счет повторяемости операций, увеличения количества измерений и получения более полной измерительной информации о параметрах выпускаемых изделий и технологических процессов.</p> <p>Повышение надежности изделий за счет получения более полной измерительной информации о процессах старения и их предвестниках.</p>	<p>Экономия трудовых ресурсов за счет замены труда человека трудом компьютера.</p> <p>Сокращение затрат в промышленности за счет уменьшения трудоемкости работ.</p> <p>Повышение производительности труда на основе оптимального распределения работ между человеком и машиной и ликвидации неполной загрузки при эпизодическом обслуживании объекта.</p>	<p>Повышение интеллектуального потенциала общества за счет поручения рутинных операций компьютеру.</p> <p>Ликвидация случаев занятости персонала операциями, осуществляемыми в нежелательных условиях.</p> <p>Освобождение человека от тяжелого физического труда и использование сэкономленного времени для удовлетворения духовных потребностей.</p>

Результат измерения, полученный опытным путем, всегда несколько отличается от действительного значения измеряемой величины. Это отклонение

называется *погрешностью измерения*. Значение погрешности зависит от принятого метода измерения и используемых средств измерений.

Метод измерения представляет собой совокупность приемов (правил) использования средств измерений. Чем точнее метод измерения учитывает особенности физического объекта или явления, тем меньше погрешность измерения. Так, например, описание зависимости сопротивления терморезистора R_θ от измеряемой температуры θ в виде линейной функции $R_\theta = R_0(1 + \alpha\theta)$ дает значительную погрешность измерения, а применение зависимости $R_\theta = R_0(1 + \alpha\theta + \beta\theta^2)$ более точно отражает указанную зависимость и, следовательно, вносит меньшую погрешность измерения.

Измерения охватывают практически любую отрасль производственной деятельности человека: промышленность, медицину, сельское хозяйство, транспорт, научные исследования и т.д. Необходимость измерения огромного количества разнообразных физических величин потребовало разработки соответствующих средств измерений – технических средств, используемых для измерений и имеющих нормированные метрологические характеристики. К этим средствам предъявляются определенные требования в отношении точности, быстродействия, диапазонов измерения, надежности, габаритных размеров, массы, потребляемой мощности, способов индикации и регистрации результатов измерения и др. Некоторые из этих требований противоречат друг другу и могут быть выполнены только путем компромисса. За последнее десятилетие благодаря большим успехам, достигнутым в микроэлектронике, вычислительной технике и приборостроении, появилась возможность создать измерительные устройства, отвечающие самым высоким требованиям. Применение микропроцессоров позволяет резко повысить степень автоматизации измерений, наделять средства измерений способностью самонастраиваться на оптимальное выполнение возложенных на них функций.

В любой области человеческой деятельности измерения не только играют познавательную роль, но и предоставляют исходные данные для выработки преобразующих, корректирующих воздействий. Вследствие этого они играют важную роль в прогрессе науки и техники. В свою очередь, научно-технические достижения, используемые в технике измерений, поднимают ее на более высокую ступень, в результате чего появляется все больше возможностей для развития и роста производительности труда.

Проведение измерений без непосредственного участия человека, т. е. автоматически, позволяет резко повысить производительность труда, обеспечить высокую объективность полученных результатов измерений вследствие исключения погрешности измерений, вносимой оператором.

При этом автоматизация позволяет обеспечить:

- сбор измерительной информации в местах, недоступных для непосредственного участия человека в процессе измерения;
- длительные, многократно повторяющиеся измерения;
- одновременное измерение большого числа величин;

– измерение параметров быстропротекающих процессов, время измерения параметров которых соизмеримо со временем измерения, обработки полученных результатов и принятия решения;

– измерения, характеризующиеся большими массивами полученной информации и сложными алгоритмами ее обработки.

Стремление получить все более обширные и точные сведения о физических объектах, интенсификация потоков получаемой и перерабатываемой измерительной информации стимулируют непрерывный процесс развития средств измерений, выражающийся в повышении точности измерений и увеличении быстродействия средств измерений, что обеспечивает повышение достоверности полученной при измерениях информации.

Измерительная информация, получаемая в процессе выполнения измерений и современных научных исследований, в основном не может быть воспринята и интерпретирована человеком без дополнительной ее обработки и представления в форме, удобной для анализа (цифровое значение, функциональная зависимость выходной величины от входной в виде графика, таблицы, гистограммы и т. п.). Сложность алгоритмов обработки измерительной информации различна, и часто время, затрачиваемое на обработку информации без использования вычислительной техники, оказывается существенно большим, чем требуется для обеспечения нормального функционирования управляемого объекта исследований или производственного процесса. Это вызывает необходимость создания автоматических устройств, которые позволяют максимально освободить человека от сбора и переработки измерительной информации.

Следует различать полную и частичную автоматизацию измерений. В первом случае весь процесс измерения от получения первичной информации об объекте измерения до вывода конечных результатов измерения на регистрирующее устройство или в цепь обратной связи управления объектом совершается без участия человека (*автоматические измерения*). При частичной автоматизации (*автоматизированные измерения*) оператор является одним из звеньев в цепи получения измерительной информации. В его функции входит в основном поддержание нормального функционирования средств измерений, ввод начальных условий и программы измерений, анализ результатов измерения и задание управляющих воздействий на исполнительные механизмы для управления объектом. После выполнения оператором этих операций технические средства выполняют измерения автоматически.

Автоматизация измерений не принижает роль исследователя, инженера или техника, планирующих и использующих результаты измерений. Наоборот, требует от них более высокого уровня знаний не только средств измерений, но и тех задач, которые решаются при приеме и обработке измерительной информации, умения правильно применить эти средства, заложить оптимальную программу измерений и дать правильное толкование результатов измерения. Применение автоматических средств измерений освобождает человека от нетворческой, механической работы, исключает возможность возникновения субъективных погрешностей.

Автоматические средства измерений в процессе своего развития прошли ряд этапов становления. Причем эти этапы не являются полностью независимыми друг от друга по времени существования, имеет место наложение этапов, самостоятельное их развитие, взаимные влияния. В связи с этим выделение этапов развития средств измерений является довольно приближенным и зависит во многом от тех направлений науки и техники, в которых исследуются вопросы применения измерительной техники. Рассмотрим этапы развития автоматических средств измерений и контроля, применяемых в системах управления технологическими процессами и сложными объектами.

3.2 Этапы становления автоматических средств измерений

На *первом этапе* развития автоматических средств измерений автоматизации подвергались лишь средства сбора измерительной информации и ее регистрации на аналоговых индицирующих и регистрирующих устройствах. Обработку результатов измерений и выработку соответствующих решений и исполнительных команд осуществлял оператор. В подобных системах управления объекты исследования представляли собой набор отдельных измерительных приборов. В результате при измерении большого количества параметров объекта оператор был не в состоянии охватить всю полученную информацию и принять оптимальное решение по управлению объектом исследования. Это, в свою очередь, приводило к расширению штата обслуживающего персонала, снижению надежности и качества управления, возрастанию эксплуатационных расходов.

На *втором этапе* все возрастающие требования к средствам измерений, обусловленные интенсификацией потоков измерительной информации, привели к созданию информационно-измерительных систем. В отличие от измерительного прибора информационно-измерительная система обеспечивает измерение большого количества параметров объекта и осуществляет автоматическую обработку получаемой информации с помощью встроенных в систему вычислительных средств. В задачу оператора системы управления теперь стали входить только принятие решений по результатам измерений и выработка команд управления. Централизованный сбор информации и ее обработка с помощью средств вычислительной техники резко повысило производительность труда оператора, но не освободило его от ответственности за управление объектом, обслуживаемого системой.

На *третьем этапе* развития появились информационно-управляющие системы и информационно-вычислительные комплексы, в которых осуществляется полный замкнутый цикл обращения измерительной информации от ее получения до обработки, принятия соответствующих решений и выдачи команд управления на объект без участия оператора. В состав таких систем входят компьютеры различных классов, универсальные или специализированные, с различной производительностью. Их применение позволяет обрабатывать огромные массивы измерительной информации. Главное достоинство таких си-

стем заключается в том, что алгоритм работы систем стал программно-управляемым, легко перестраиваемым при изменениях режимов работы или условий эксплуатации объекта. Кроме того, труд оператора сводится теперь к диагностике состояния системы управления, обеспечению ее работоспособности, разработке методик выполнения измерений и программ функционирования.

Характерной особенностью второго и третьего этапов явился бурный рост цифровых измерительных приборов. Наибольшее развитие получили цифровые измерительные приборы электрических величин, поскольку в практике измерений неэлектрических физических величин они, как правило, преобразуются в электрические как наиболее удобные для передачи, регистрации, точного воспроизведения мер и др. В целом большинство этих приборов, обладая высокой точностью и быстродействием, автоматизируют лишь процесс сбора, обработки и регистрации измерительной информации, т. к. вычислительные и управляющие функции в них развиты слабо из-за ограничений, накладываемых элементной базой, допускаемыми габаритными размерами, массой и др.

В настоящее время благодаря достижениям микроэлектроники значительно уменьшаются габаритные размеры, масса и стоимость средств измерений и контроля. Применение микропроцессорных вычислительных устройств в средствах измерений поднимает последние на качественно новую ступень развития. В автоматических средствах измерений и контроля благодаря микропроцессорным устройствам управления и обработки информации в значительной мере стираются грани различий между измерительным прибором и системой. Оба средства измерений характеризуются в этом случае одними и теми же программно-управляемыми принципами функционирования. Отличие их заключается лишь в количестве измеряемых величин, объеме памяти и оснащенности периферийными устройствами.

Анализ наиболее общих принципов получения измерительной информации позволяет определить обобщенную структурную схему средств измерений (рисунок 3.1), присущую практически любому известному либо еще проектируемому измерительному прибору, устройству, системе и т. д. На практике в структуру реального измерительного средства могут не входить некоторые элементы обобщенной структуры, например, средства управления объектом или регистрации результатов.

С точки зрения автоматизации процессов измерения, анализ обобщенной структурной схемы средств измерений (см. рисунок 3.1) позволяет сформулировать основные пути решения поставленной задачи.

1 *Автоматизация сбора измерительной информации.* Для автоматизации сбора информации необходимо обеспечить унификацию выходных сигналов измерительных преобразователей, физических величин, программно-управляемую коммутацию этих сигналов на общий канал связи, автоматический выбор диапазонов измерения.

2 *Автоматизация операций измерительной цепи.* Измерительная цепь средств измерений представляет собой совокупность преобразовательных эле-

ментов, обеспечивающая осуществление всех преобразований сигнала измерительной информации. Прием информации от объекта измерения, фильтрация, предварительная аналоговая обработка сигналов, усиление, аналого-цифровое преобразование и т. д. образуют типовой набор операций, выполняемых в измерительной цепи (канале) прибора или системы. Автоматизация указанных операций должна производиться таким образом, чтобы в процессе функционирования измерительного прибора (системы) отсутствовали ручные операции настройки, регулировки и переключений.

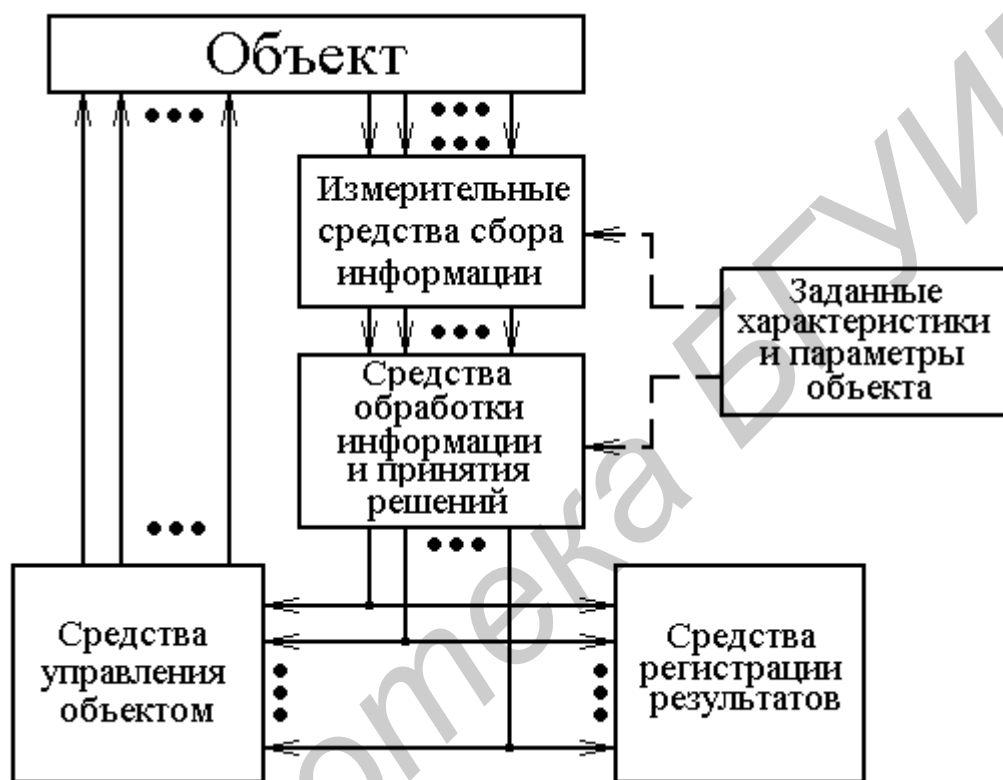


Рисунок 3.1 – Обобщенная структурная схема средств измерений

3 Автоматизация передачи измерительной информации из измерительной цепи в цифровое вычислительное устройство (ЭВМ, микроЭВМ). Под этим понимается соответствующее согласование измерительной цепи с информационной магистралью вычислительного устройства (технические средства согласования получили название «интерфейс» или для измерительных средств – «приборный интерфейс»). Интерфейс определяет формат передаваемой и принимаемой информации, уровни сигналов, комплексные сопротивления линий связи, а также организацию управляющих сигналов и соответствующие временные соотношения для них.

4 Автоматизация обработки измерительной информации. Включение в измерительную цепь вычислительных средств позволяет значительно повысить точность измерительных устройств. Вычислительные средства могут быть выполнены на основе как универсальных, серийно выпускаемых ЭВМ, так и путем разработки специализированных машин. Для целей измерения могут при-

меняться цифровые вычислительные средства, которые приобрели в настоящее время достаточно широкое распространение в связи с развитием современной микропроцессорной базы. Использование современных баз данных позволяет сохранять результаты измерений в виде отношений (таблиц), имеющих различную структуру.

5 Автоматизация индикации и документальной регистрации результатов измерения. Автоматизация этих процессов обеспечивается путем оснащения измерительных приборов (систем) различными периферийными выходными устройствами: принтерами, плоттерами, графопостроителями, дисплеями и т. д. При этом обеспечивается автоматический выбор необходимого периферийного устройства и автоматический вывод информации из ЭВМ.

В последнее время в измерительной технике произошли существенные качественные сдвиги. Эти сдвиги связаны с автоматизацией процессов измерения, позволяющей за ограниченное время перерабатывать большие потоки измерительной информации. Необходимость в этом постоянно возникает при проведении научных исследований, разработке, производстве и эксплуатации современного радиоэлектронного оборудования, средств связи и телевидения, космической техники и т. д. Человек, выполняющий измерения и обрабатывающий полученную информацию, уже не в состоянии в силу своих физиологических возможностей оценить все возникающие ситуации и принять соответствующие решения. Поэтому необходимы такие СИ, которые позволяли бы автоматизировать процессы измерений, обработки и регистрации их результатов при одновременном исключении из результатов измерений субъективных погрешностей оператора.

Сложившиеся к настоящему времени основные направления автоматизации измерений заключаются в следующем:

- 1) разработке СИ, в которых все необходимые регулировки выполняются автоматически (либо они вообще не требуются);
- 2) замене косвенных измерений прямыми и разработке на этой основе прямопоказывающих измерительных приборов;
- 3) создании многофункциональных (комбинированных) измерительных приборов;
- 4) разработке панорамных измерительных приборов;
- 5) применении микропроцессоров и разработке на их основе измерительных приборов четвертого поколения – приборов с искусственным «интеллектом»;
- 6) разработке ИВК, имеющих в своем составе процессор (процессоры) с необходимыми периферийными устройствами, измерительные и вспомогательные устройства, управляемые от процессора, и программное обеспечение комплекса;
- 7) созданию на основе ИВК как универсального ядра различных ИИС;
- 8) разработке и создании компьютерно-измерительных систем.

Первые четыре направления стали классическими и эффективно используются при разработке электронных измерительных приборов всех подгрупп и видов. Последние три направления автоматизации измерений являются сравни-

тельно новыми, и могут квалифицироваться как основная тенденция в дальнейшем развитии СИ электрических величин.

Проведению измерений с помощью большинства видов СИ, как правило, предшествуют регулировки, связанные с различными настройками, установкой требуемых пределов измерений и калибровкой. Автоматическое выполнение таких регулировок является частным случаем общей задачи автоматического регулирования и достигается применением обратных связей, преобразованием измеряемой величины к виду, позволяющему сравнивать её с величиной, воспроизводимой мерой внутри прибора, автоматическим изменением в требуемых пределах величины, воспроизводимой мерой и другими схемотехническими решениями. Характерным примером такого прибора является осциллограф с автоматизированным управлением.

Косвенные измерения связаны с вычислением искомого значения величины по результатам прямых измерений аргументов. Именно здесь эффективны микропроцессоры, позволяющие автоматизировать все необходимые вычислительные процедуры. Однако в целом ряде случаев оказывается возможным проектировать измерительные приборы, которые за счет схемотехнических решений могут прямо измерять искомые величины и, таким образом, трансформировать косвенные измерения в прямые. Характерным примером подобных приборов является измеритель отношения напряжений, широко применяемый при относительных измерениях.

Многофункциональные (комбинированные) приборы – это приборы, выполняющие целый ряд функций и позволяющие измерять несколько параметров сигналов или цепей. Особенно удобно и целесообразно проектировать многофункциональные приборы как цифровые. В качестве характерного примера можно привести универсальные цифровые вольтметры и мультиметры.

Панорамные приборы позволяют эффективно автоматизировать процесс измерения в случае исследования зависимости параметров сигналов или цепей от какого-то аргумента (чаще всего частоты). Это относится к анализу спектра сигналов, исследованию АЧХ и ФЧХ радиотехнических цепей и устройств и к целому ряду других измерительных задач. С помощью панорамных приборов обеспечивается визуальное наблюдение на экране осциллографического индикатора картины (панорамы) определяемой характеристики (характеристик) в широком диапазоне частот. Основным функциональным узлом таких приборов является генератор качающейся частоты, создавший частотную ось панорамы.

Самым мощным средством в интенсификации труда практически во всех сферах человеческой деятельности является широкое применение средств вычислительной техники. Историю применения компьютеров в индустрии информации можно условно разделить на два этапа.

Первый этап характеризуется монополией больших ЭВМ. В 60-е годы прошлого столетия получили развитие методы работы на ЭВМ, обеспечивавшие одновременный доступ к ней большого числа пользователей. Появились вычислительные центры коллективного пользования, и даже сети таких центров.

Второй этап был вызван революционными преобразованиями в электронной промышленности в конце 60-х – начале 70-х годов. Интегральная технология в микроэлектронике позволила создать малые ЭВМ, которые по своей вычислительной мощности почти не уступали большим ЭВМ, утратившим монопольное положение.

Нарастающие темпы электронизации СИ привели к положению, когда исчезает разница в аппаратурной реализации микропроцессорных СИ и ЭВМ в части вычислительных компонент. Что касается подходов к проектированию СИ и ЭВМ, то они заметно различаются, потому что перед ними стоят разные задачи и они выполняют разные функции.

Но если СИ преодолели такой длинный путь навстречу ЭВМ, то не могут ли и ЭВМ сделать шаг навстречу СИ и научиться воспринимать измерительную информацию не от внешнего измерительного прибора, а непосредственно из окружающего нас аналогового мира, например, через электромагнитную среду? Для восприятия аналоговых электрических сигналов от преобразователей, ЭВМ должна быть наделена аналого-цифровым преобразователем и интерфейсом. Уже предусмотрено создание ЭВМ со способностью воспринимать и количественно оценивать предметы в пространстве, т. е. определять их положение, устанавливать размеры, различать спектральные характеристики, идентифицировать с «эталонными» предметами, объектами, выполняющими фактически роль встроенных мер.

Первый шаг к комплексированию СИ с ЭВМ был сделан в 80-х годах. Разработка ряда сменных плат, встраиваемых в ЭВМ, наделила последние функциями вольтметра, частотомера, генератора тестовых сигналов, осциллографа и других измерительных приборов, а также поставила на службу измерений мощные ресурсы вычислительной техники при минимальных аппаратурных затратах.

3.3 Компьютерно-измерительные системы

Начиная с конца 90-х годов прошлого столетия, когда компьютеры стали доступными для широкого круга пользователей, активно стали развиваться компьютерно-измерительные системы, примером здесь может служить скалярный анализатор цепей, структурная схема которого представлена на рисунке 3.2. Пользователь компьютерно-измерительной системы (КИС) получает доступ к обширным фондам прикладных программ, может подключить к системе внешнюю память большой емкости, средства *документирования результатов измерений*.

В отличие от измерительно-вычислительного комплекса, в основу создания которых положен метод «восходящего» проектирования (новые функции обеспечиваются новыми аппаратными и программными модулями), архитектура компьютерно-измерительной системы является результатом «нисходящего» проектирования, избавляющего пользователя от дорогостоящей избыточности.

В ряде практических случаев достаточно знать частотные характеристики коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН), коэффициента отражения или передачи исследуемого СВЧ-элемента. Тогда целесообразно применять приборы, называемые *рефлектометрами*, основной принцип действия которых основан на принципе отдельного выделения сигналов, пропорциональных мощностям волн, падающей от генератора и отраженной от исследуемого объекта (при измерении КСВН) или прошедшей через измеряемый объект (при измерении ослабления).

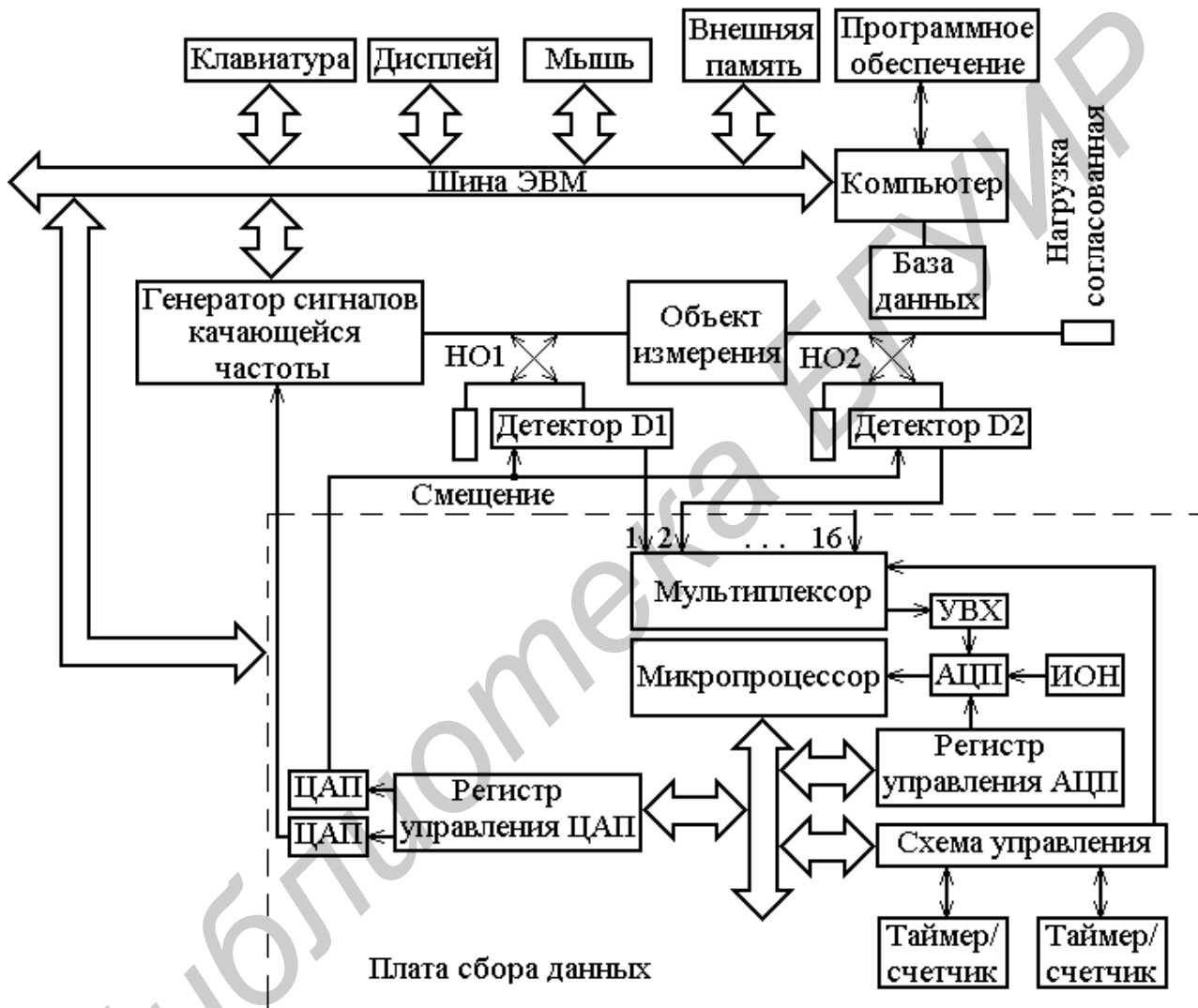


Рисунок 3.2 – Структурная схема скалярного анализатора цепей на основе компьютерно-измерительной системы

Скалярный анализатор цепей состоит из СВЧ-части и компьютерно-измерительной системы. В состав СВЧ-части входят генератор сигналов качающейся частоты, направленные ответвители сигналов HO1 и HO2, ориентированные на падающую и прошедшую через объект измерения волны, и две детекторные головки, обозначенные как диоды D1 и D2.

Основой скалярного анализатора цепей является компьютерно-измерительная система. Она осуществляет сбор и обработку (в том числе и математическую) сигналов измерительной информации, вывод обработанной информации в графической форме на экран дисплея компьютера (рисунок 3.3), а также сохранение ее в форме базы данных на жестком диске (или любом другом носителе информации по желанию пользователя).

Через направленные ответвители сигнал СВЧ проходит к согласованной нагрузке. Эти ответвители осуществляют отбор части мощности сигналов, пропорциональных значениям падающей и отраженной волн. Выделенные направленными ответвителями падающая и отраженная волны, продетектированные соответствующими детекторными головками (с квадратичными детекторами), подают на мультиплексор и подвергаются аналого-цифровому преобразованию в АЦП.



Рисунок 3.3 – Вид графической панели скалярного анализатора цепей (графический монитор компьютерно-измерительной системы)

При этом выходные сигналы детекторов с помощью мультиплексора поочередно подключают к сигнальному входу АЦП (номер подключаемого детектора определяется цифровым кодом, подаваемым на мультиплексор из микропроцессорной системы). Поступающее на АЦП напряжение преобразуют в числовой эквивалент, который фиксируют в ОЗУ по определенному адресу.

ЭВМ выполняет управляющие и вычислительные функции. К управляющим функциям ЭВМ относят: установку начального и конечного значений ча-

стот полосы качания и линейное качание частоты генератора сигналов, автоматическую калибровку системы в режимах короткого замыкания и холостого хода, выдачу графической и цифро-знаковой информации на дисплей, управление положением частотной характеристики на экране дисплея и т. д. ЭВМ также вычисляет КСВН и модуль коэффициента отражения по выходным значениям напряжений D1 и D2.

Для установки начального и конечного значения частот полосы качания СВЧ-генератора качающейся частоты на клавиатуре набирают требуемые коды. При этом на входы ЦАП из ЭВМ подается определенное число (цифровой код), которому соответствует фиксированное значение постоянного напряжения на выходе ЦАП. Оно поступает на вход генератора сигналов качающейся частоты, в результате чего устанавливается требуемое значение частоты в полосе качания. Изменение цифрового кода на входе ЦАП приводит к изменению напряжения на выходе ЦАП, а, следовательно, к изменению частоты выходного сигнала генератора. Последовательное изменение цифровых кодов, поступающих с ЭВМ на ЦАП, приводит к линейному качанию частоты выходного сигнала генератора.

Автоматическая калибровка измерителя КСВН производится в режиме короткого замыкания основного СВЧ-тракта. Для этого при отключенном объекте измерения выход тракта замыкают накоротко. Если каналы падающей и отраженной волн идентичны, то значения напряжений на входах НО1 и НО2 будут равны между собой. Если же при калибровке это условие не выполняется, то снимается амплитудно-частотная характеристика самого измерительного тракта, параметры которой (частота и амплитуда) записываются в базу данных ЭВМ с последующей цифровой корректировкой измеренных значений.

Стабилизация мощности лежит в основе прямопоказывающих панорамных измерителей. Постоянство мощности надо поддерживать с точностью 1 %, и система стабилизации не должна быть инерционной. Устройства стабилизации мощности, представляющие собой схемы автоматического регулирования, бывают с внутренним и внешним управлением. Схема с внутренним управлением предполагает воздействие сигнала ошибок, снимаемых с детектора направленного ответвителя падающей мощности, непосредственно на ГКЧ. Действие схем с внешним управлением, для которых характерно отсутствие паразитной частотной модуляции, основано на применении регулируемых элементов. Под воздействием сигналов ошибки они изменяют мощность в СВЧ-тракте.

Обмен рефлектограммами с компьютером предоставляет хорошие возможности для диагностики СВЧ-трактов. Для архивации и дальнейшей обработки рефлектограмм задействованы средства компьютера. Рефлектограммы загружаются в его память и хранятся в виде файлов. Благодаря специализированным и стандартным программам их можно легко просматривать, распечатывать, масштабировать, сравнивать, накладывать друг на друга или на схему линии и т. п. В случае необходимости файл может быть передан по электронной почте или загружен в рефлектометр (например, для сравнения с новой рефлектограммой).

4 ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ И ПРИНЦИПЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПОВЕРОЧНЫХ РАБОТ

4.1 Основы автоматизации измерений при поверке

Ускорение научно-технического прогресса требует серьезной перестройки в области метрологического обеспечения разработки, производства, испытаний и эксплуатации средств измерений (СИ).

Применяемые для получения информации средства измерений постоянно обновляются, совершенствуются, их парк в настоящее время превзошел миллиардный рубеж. Естественно, что такой парк измерительной техники требует надежного метрологического обслуживания, что неизбежно ведет к увеличению объемов поверочных работ с одновременным повышением требований к качеству и достоверности результатов поверки.

Существенно повысить производительность труда и качество поверочных работ, сделать процесс поверки более объективным возможно лишь путем автоматизации процедур поверки с применением всего арсенала новейших средств автоматики, электроники и вычислительной техники.

Основные понятия об автоматизации поверки. В целом процесс поверки является эргодическим, т. е. предполагающим взаимодействие человека (оператора) с автоматом – поверочной установкой. Это обусловлено в первую очередь тем, что рекомендуемые до настоящего времени в действующей нормативно-технической документации (НТД) методы, образцовые и вспомогательные средства поверки ориентированы преимущественно на применение ручного труда оператора и не могут в большинстве случаев непосредственно использоваться для автоматизации без потери точности и надежности. Во-вторых, некоторые операции поверки не поддаются однозначному описанию языком математической логики. В-третьих, ряд операций связан с распознаванием образов и учетом не только формальных, но и субъективных факторов, и автоматизация их возможна только с применением специальных автоматических средств, объем и стоимость которых на сегодняшний день достаточно большая.

Поэтому под автоматизацией поверки в настоящее время понимают не автоматизацию процесса поверки в целом, а автоматизацию определенных операций или отдельных процедур.

Перечень операций поверки, направленных на выявление пригодности конкретных СИ, весьма разнообразен и регламентируется НТД на методы и средства их поверки. Анализ НТД позволяет выявить ряд операций, которые являются общими для всех СИ. К ним относятся внешний осмотр, опробование и определение основной погрешности. Первые две операции связаны с распознаванием образов и трудно формализуются, поэтому вряд ли стоит говорить о целесообразности их автоматизации. Определение же основной погрешности преследует своей целью получение объективной измерительной информации о реальных метрологических характеристиках поверяемого СИ и является одной из главных операций. В процессе проведения этой

операции поверитель должен совершить некоторую последовательность действий, которые формально можно разделить на следующие процедуры:

- подключение поверяемого СИ к средствам поверки;
- выработка и подача на вход поверяемого СИ контрольного (или тестового) сигнала;
- наблюдение за реакцией поверяемого СИ на входной тестовый сигнал;
- статистическая обработка результатов наблюдений;
- установление факта годности или негодности поверяемого СИ;
- выдача документа с результатами поверки и заключением.

Практически все из перечисленных процедур возможно автоматизировать при современном уровне развития средств автоматики и вычислительной техники.

4.2 Проблемы автоматизации поверочных работ

После определения формального перечня процедур, подлежащих автоматизации, необходимо решить ряд проблем. Первая из них связана с наличием или отсутствием электрического выхода у поверяемого СИ или наличием преобразователя неэлектрической величины в электрический сигнал. Этим в существенной мере определяется уровень автоматизации поверки данного СИ. Как известно, электрические сигналы являются наиболее удобными для передачи, хранения, преобразования и обработки; подавляющее большинство средств автоматизации и вся вычислительная техника ориентированы на восприятие информации в виде электрических сигналов.

Степень автоматизации поверки СИ с электрическим выходом будет выше, поскольку снижается доля участия оператора в процессе измерения (отпадает функция наблюдения за реакцией поверяемого СИ на входной тестовый сигнал), что ведет к повышению производительности труда, возможности применения программно-управляемых мер, облегчает статистическую обработку результатов измерений с помощью ЭВМ и, в свою очередь, повышает достоверность результатов поверки.

Средства измерений без электрического выхода для наблюдения реакции на входной тестовый сигнал требуют специальных отсчетных устройств для автоматизации этой процедуры и возможности введения результатов наблюдения в ЭВМ для дальнейшей обработки.

В настоящее время разработаны различные отсчетные устройства для считывания показаний поверяемых СИ без электрического выхода на основе оптико-электронных преобразователей и телеизмерительных систем. Однако область применения этих преобразователей ограничена из-за их высокой стоимости и сложности как изготовления, так и эксплуатации.

Вторая проблема связана с разработкой и унификацией алгоритмов процедуры поверки, т. к. наличие четко разработанного алгоритма определяет выбор необходимых средств вычислительной техники и соответствующего алгоритмического языка.

Разработка алгоритмов проведения такой операции поверки, как определение основной погрешности, в настоящее время не вызывает особых затруднений. Названные алгоритмы разработаны и изложены в НТД для таких современных СИ, как, например, цифровые измерительные приборы.

Для реализации автоматизированной поверки СИ также необходимо разработать номенклатуру образцовых и вспомогательных средств поверки, способных работать в составе автоматизированных систем. К ним относятся программно-управляемые меры электрических величин, активные масштабные преобразователи, устройства сравнения, коммутаторы и т. д.

Решению этой проблемы уделяется большое внимание, и уже в настоящее время в практике поверочных работ, например, в области электро- и радиоизмерений, широкое распространение получили программно-управляемые меры сопротивления, калибраторы тока, напряжения, угла сдвига фаз и т. д.

Следующая проблема, которую необходимо решить, связана с выбором оптимального уровня автоматизации поверочных работ применительно к конкретной группе СИ.

4.3 Уровни автоматизации поверки средств измерений

Анализ литературы, посвященной вопросам автоматизации поверки СИ, позволяет условно выделить следующие уровни автоматизации.

1 Совокупность аналоговых и дискретных образцовых и вспомогательных СИ, конструктивно объединенная в установку, снабженную аналоговым регистратором погрешности и ориентированную на поверку только определенной группы приборов. Часто такие установки называют аналоговыми поверочными установками. Структурная схема установки, а также функции оператора, взаимодействующего с такой установкой, приведены на рисунке 4.1. Выполнение практически всех процедур поверки, за исключением процесса выделения погрешности поверяемого средства измерения (ПСИ), возлагается на оператора. Наблюдая за реакцией ПСИ на входной тестовый сигнал, оператор осуществляет свои функции через устройства управления установкой. Установка может быть снабжена устройством визуального контроля.

2 Специализированные поверочные установки с применением цифровой и регистрирующей техники, функционирующие по жесткой программе, задаваемой специализированным вычислительным устройством – рисунок 4.2. Установки снабжаются устройством визуального контроля погрешности, которая после преобразования в измерительном преобразователе фиксируется регистрирующим устройством. В функции оператора входит процедура подключения поверяемого СИ, отсчет его показаний и выработка команд управления.

3 Установки с применением средств цифровой и регистрирующей техники, а также компьютеров, позволяющей оператору гибко перестраивать программу поверки (рисунок 4.3). Такие установки получили наименование поверочных установок с гибкой программой. Они строятся на базе информационно-измерительных систем (ИИС) или измерительно-вычислительных комплексов

(ИВК). В функции оператора входит подключение ПСИ и осуществление управления через управляющее устройство установки.

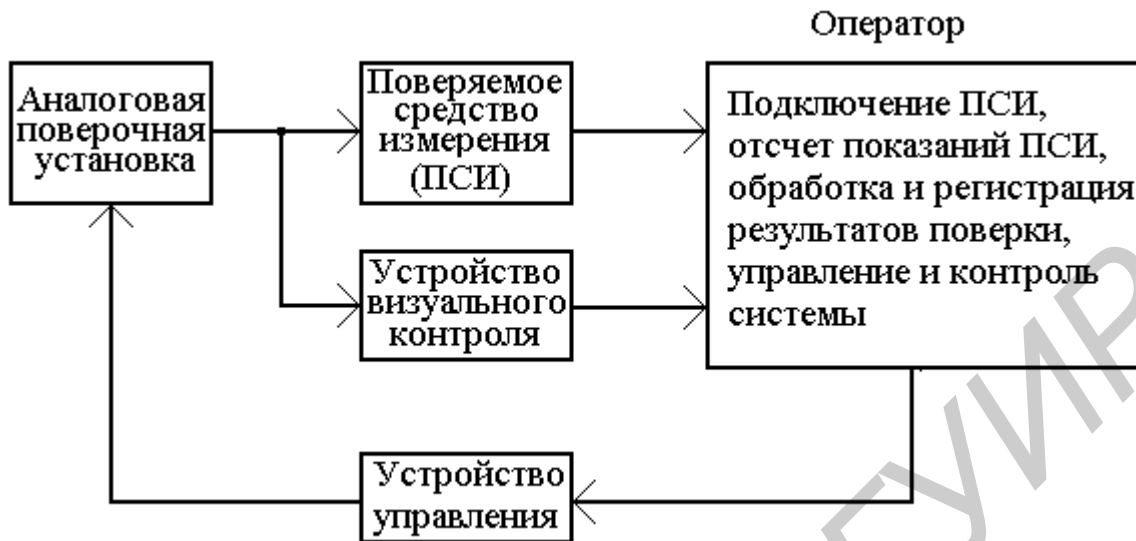


Рисунок 4.1 – Обобщенная структурная схема аналоговой поверочной установки

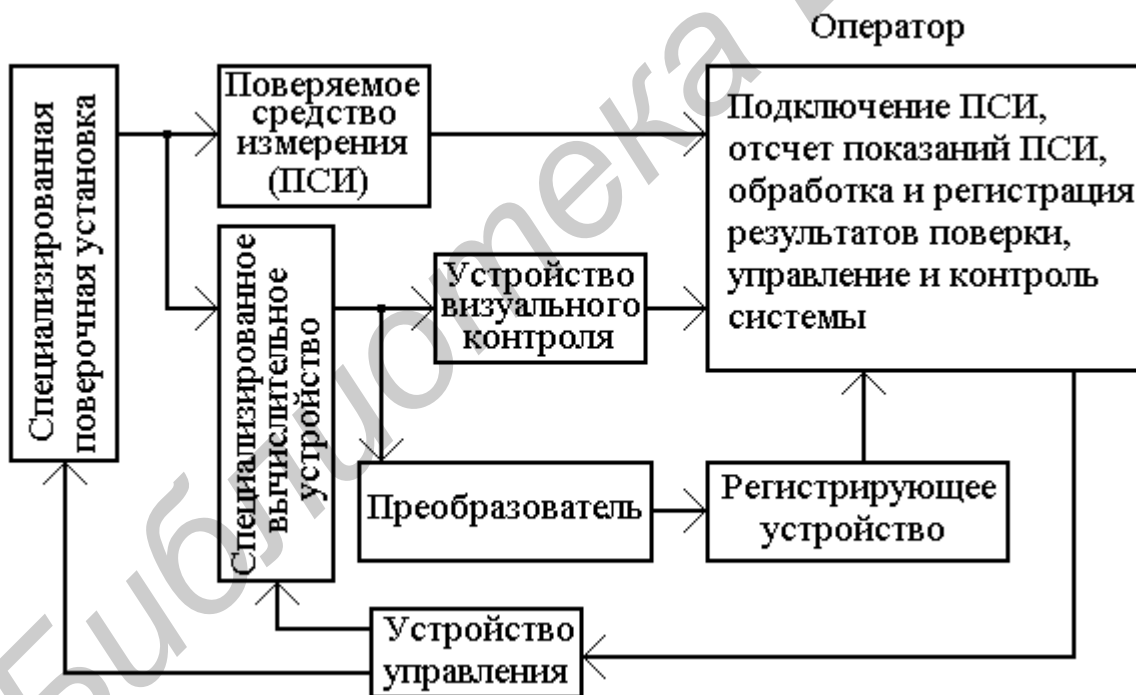


Рисунок 4.2 – Обобщенная структурная схема специализированной поверочной установки

Измерительная система – совокупность функционально объединенных мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей, ЭВМ и других технических средств, размещенных в разных точках контролируемого объекта и т. п. с целью измерений одной или нескольких физических величин,

ки и критериев ее достоверности, необходимость применения средств вычислительной техники и специфика функционирования предприятия-потребителя автоматических средств поверки и другие факторы.

Наиболее существенный фактор для анализа технико-экономической эффективности – специфика тех задач, которые стоят перед предприятиями, осуществляющими поверку СИ. Наибольший экономический эффект автоматизация поверки должна принести там, где поверка может быть отнесена к основным технологическим процессам, т. е. на предприятиях-изготовителях СИ, в органах государственных и ведомственных метрологических служб.

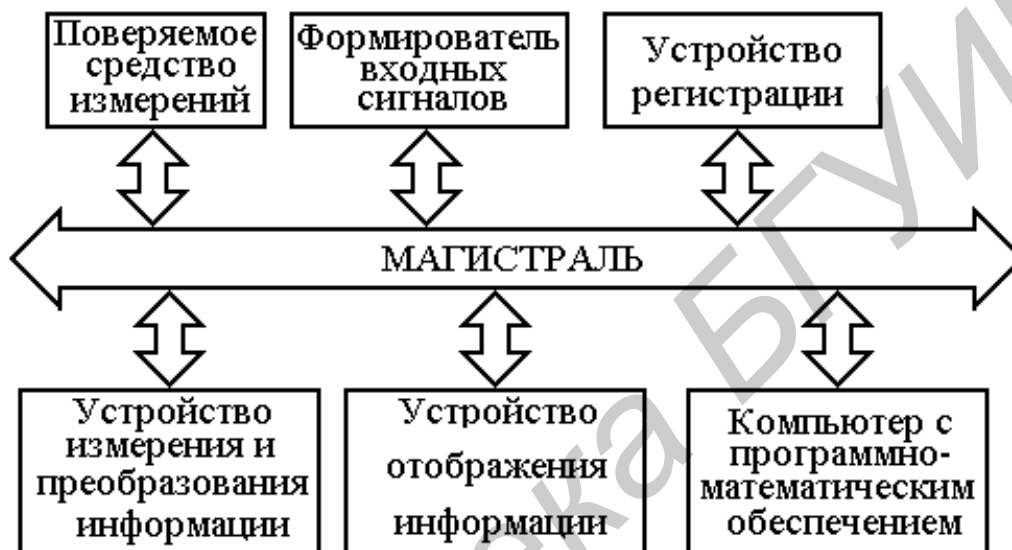


Рисунок 4.4 – Структурная схема агрегатированного комплекса автоматизированной поверки

С другой стороны, специфика поверки заключается в том, что:

- поступающие на поверку СИ разнообразны по номенклатуре, техническим и метрологическим характеристикам;
- СИ поступают на поверку неравномерно, что делает практически невозможной организацию поверки потоков однотипных СИ;
- среди поступающих на поверку СИ имеются образцовые и исходные различной принадлежности (государственной и ведомственной МС), для которых не только констатируется факт годности, но и определяются действительные погрешности с целью их дальнейшего использования для введения поправок.

В этих условиях возможно либо применение полного набора узкоспециализированных установок, либо некой единой установки, обладающей сверхуниверсальностью. Очевидно, что коэффициент использования каждой узкоспециализированной установки из набора будет относительно низким, что экономически нецелесообразно. Создание «сверхуниверсальной» установки также неоправданно, поскольку для удовлетворения потребностей государственной МС она должна обладать объемом и возможностями, подоб-

ными большим вычислительным машинам третьего поколения.

Перспективы развития автоматизированных средств поверки третьего уровня связаны с совершенствованием и развитием информационно-измерительных систем (ИИС) и измерительно-вычислительных комплексов (ИВК), на базе которых они строятся. Для этих систем характерны следующие особенности: наличие измерительных, вычислительных, согласующих (интерфейсы) и регистрирующих устройств; возможность гибкой перестройки программы поверки; использование унифицированных блоков; применение в качестве вычислителя серийной микроЭВМ с устройствами ввода и вывода данных; возможность одновременной поверки нескольких однотипных СИ.

Анализ состояния и перспектив развития автоматизации поверочных работ показывает, что наиболее перспективно создание средств автоматизации поверочных работ на основе агрегатирования. Это направление характеризуется переходом от разработки отдельных приборов к созданию комплексов СИ, совместимых в информационном, конструктивном, метрологическом и других отношениях.

Одним из основных принципов построения агрегатированных комплексов автоматизированной поверки считается создание модульных систем. Такие системы композиционно должны состоять из следующих основных частей: задатчика входных (тестовых) сигналов, информационно-измерительного устройства, вычислительного устройства, управляющего и регистрирующего устройств. Структурная схема агрегатного комплекса автоматизированной поверки для СИ с электрическим выходом представлена на рисунке 4.4.

Основой модульной системы является центральный процессор, роль которого выполняет ЭВМ с программно-математическим обеспечением. В этом случае на ЭВМ возлагаются не только функции вычислительного и программно-запоминающего устройства, но и функции устройства управления.

Наличие программно-математического обеспечения позволяет гибко изменять программу поверки в зависимости от вида поверяемого СИ (ПСИ). Программно-математическое обеспечение разрабатывается на основе алгоритма процедуры поверки и является основой для управления работой всей системы. По команде ЭВМ соответствующие тестовые сигналы поступают от формирователя входных сигналов на ПСИ. Сигнал реакции ПСИ поступает на устройства измерения и преобразования информации и устройства отображения информации, являющиеся информационно-измерительной частью комплекса. По программе, записанной в программно-математическом обеспечении, ЭВМ производит обработку полученной от ПСИ информации и подает сигнал на регистрацию полученных результатов в устройство регистрации.

Сменными элементами системы являются формирователь входных сигналов, программно-математическое обеспечение и информационно-измерительные устройства, которые устанавливаются в базовой части системы в зависимости от потребностей.

Конкретный состав модульной системы может устанавливаться на основе заказа потребителя и составляется методом проектной компоновки. Такие си-

стемы принято называть «открытыми» в том смысле, что они дают возможность дальнейшего развития и совершенствования системы за счет замены или добавления сменных элементов. При использовании таких структур можно собирать агрегатные комплексы с высоким уровнем автоматизации.

Основой для построения агрегатных комплексов автоматизированной поверки могут служить информационно-измерительные системы (ИИС) или измерительно-вычислительные комплексы (ИВК). Элементной базой для создания комплексов является государственная система приборов (ГСП), используемая в настоящее время для создания агрегатных комплексов измерительной техники в различных областях измерений.

На рисунке 4.5 в качестве примера показана компьютерно-измерительная система, предназначенная для калибровки цифрового вольтметра В7-54. При помощи программного обеспечения (ПО) LabVIEW 8.51 компьютер формирует цифровой код, который поступает на вход цифроаналогового преобразователя (ЦАП).

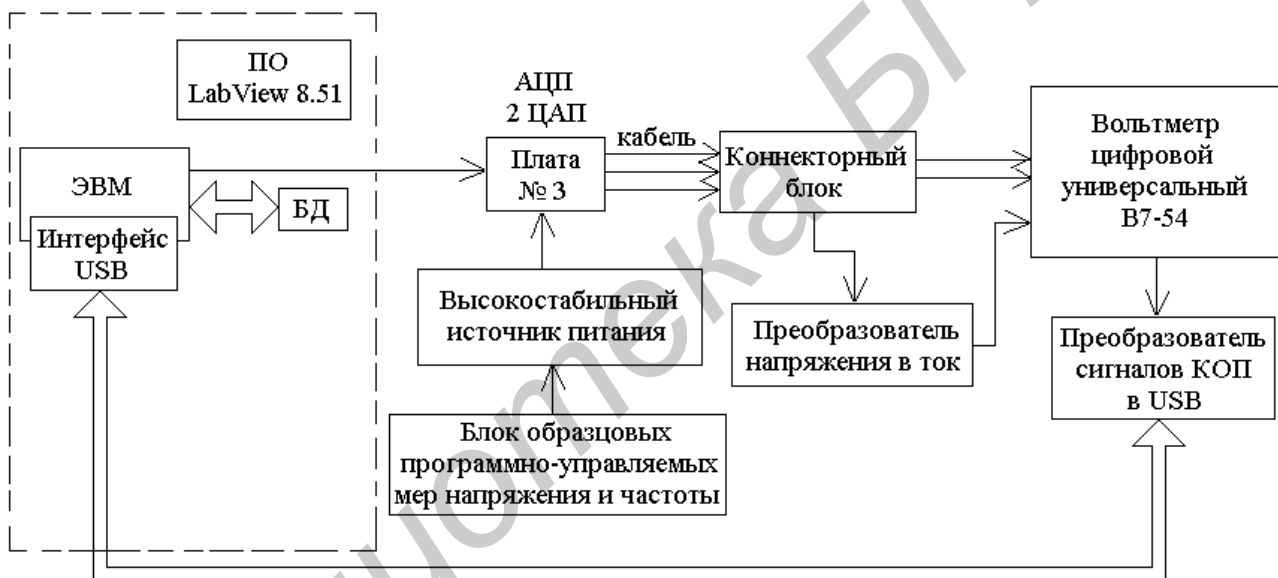


Рисунок 4.5 – Обобщенная структурная схема КИС для калибровки цифрового вольтметра В7-54

В режиме калибровки вольтметра по напряжению ЦАП преобразует этот код в соответствующее постоянное или переменное напряжение. С выхода ЦАП это напряжение через конекторный блок подается на вход калибруемого цифрового вольтметра В7-54. В цифровом вольтметре В7-54 автоматически вырабатываются дискретные сигналы измерительной информации, а показания представляются в цифровой форме на индикаторном табло. Для согласования вольтметра В7-54 с компьютером используется преобразователь, который преобразует сигналы КОП в USB. Далее по интерфейсу USB измеренное значение напряжения подается в компьютер в виде цифрового кода, где производится его сравнение с первоначальным цифровым кодом. После сравнения результат измерения обрабатывается ЭВМ по заданной программе и после обработки

полученная неопределенность измерения записывается в базу данных.

В режиме калибровки по постоянному и переменному току после ЦАП преобразованное напряжение через коннекторный блок поступает на вход преобразователя напряжения, где преобразуется в ток. С выхода преобразователя напряжения в ток преобразованный ток поступает на вход цифрового вольтметра В7-54. В цифровом вольтметре В7-54 автоматически вырабатываются дискретные сигналы измерительной информации, а показания представляются в цифровой форме на индикаторном табло. Далее по интерфейсу USB это значение тока подается в компьютер в виде цифрового кода, где производится его сравнение с первоначальным цифровым кодом. После сравнения результат измерения обрабатывается ЭВМ. После обработки полученная неопределенность измерения записывается в БД.

Точность измерений зависит от выбранного ЦАП и погрешности, обусловленной высокостабильным блоком питания. Поскольку в данной схеме ЦАП является пассивным элементом, погрешность измерений будет зависеть от погрешности, обусловленной высокостабильным блоком питания. Однако, в случае, если выбранный ЦАП будет обладать низкой разрешающей способностью, то к погрешности, обусловленной высокостабильным блоком питания, будет добавляться погрешность ЦАП.

Для принятия соответствующего решения необходимо выяснить, находится ли погрешность средства измерений в допуске во всем диапазоне измерений данной физической величины. Различают *комплектную* поверку, когда показания поверяемого средства измерения сравнивают со значением соответствующей меры или с показаниями более точного (образцового) средства измерения при измерении одной и той же физической величины, и *поэлементную* поверку, когда прибор исследуется не в целом, а по отдельным его узлам (элементам).

Несмотря на многочисленные нормативно-технические документы по методам поверки средств измерений, в которых подробно расписана процедура эксперимента по определению метрологических характеристик средств измерений, поверка сохраняет многие черты исследовательской работы. В первую очередь это относится к сложным многопредельным приборам, поверка которых занимает 6–8 часов и более.

Массовость поверочных работ, усложнение измерительной техники, повышение ответственности измерительных работ при принятии решений требуют интенсификации этого вида метрологической деятельности путем автоматизации.

Автоматизация поверки предполагает:

- сокращение времени поверки на основе программно-управляемых мер, физических величин, автоматической обработки и документирования результатов поверки;
- повышение точности измерений на основе многократных наблюдений;
- сокращение времени перестройки с одного вида поверки на другой на основе использования программно-перенастраиваемых поверочных средств;
- увеличение межповерочного интервала средств измерений на основе ав-

томатизированных процедур самоповерки и встроенных мер;

- повышение производительности поверочных работ на основе широкого использования типовых автоматизированных рабочих мест (АРМ) метролога и унификации их средств измерений;

- сокращение непроизводительных затрат на основе оперативного получения промежуточных данных в удобной форме и принятия промежуточных решений в ходе поверочной процедуры.

Конечная цель автоматизации поверочных работ – это повышение достоверности вывода по результатам поверки и сокращение времени и затрат на нее. Очевидно, что простое добавление ЭВМ к поверочному оборудованию нужного эффекта не дает. Необходимо пересмотреть организацию рабочего места поверителя в целом и обеспечить адаптируемость всех средств к автоматизированному режиму поверки. «Бумажные» методики поверки должны быть заменены соответствующим программным обеспечением.

4.4 Автоматизированное рабочее место метролога

В настоящее время все большее распространение получают микропроцессоры и ЭВМ. Этому способствуют:

- быстрое снижение цен на ЭВМ и ее элементы;
- приближение размеров машин и энергопотребления к соответствующим показателям радиотехнических приборов средней сложности;
- интерактивные методы общения человека с ЭВМ.

Если система управления (технологическим процессом, поверкой, проектированием и т. п.) строится по иерархическому признаку, то на самом нижнем уровне находятся персональные ЭВМ, образующие вместе с другим необходимым оборудованием и программным обеспечением *автоматизированные рабочие места* (АРМ). АРМ может входить в сеть, а также может функционировать индивидуально по аналогии с гибкими производственными модулями в гибких производственных системах.

Попробуем найти ответы на следующие вопросы.

Можно ли создать типовое АРМ метролога?

Если многообразие метрологической деятельности не позволяет положительно ответить на этот вопрос, то можно ли в АРМ метролога выделить типовую часть?

На начальном этапе автоматизации промышленного производства было широко распространено мнение, что автоматизация дает эффект только для крупносерийного производства, позволяющего формализовать многие технологические операции. Однако опыт применения программно переналаживаемых гибких измерительных систем показал, что они не менее эффективны и в случае индивидуального производства.

В общем виде АРМ метролога должно удовлетворять следующим требованиям:

- АРМ должно быть многофункциональным и обеспечивать перестройку с

одних измерительных задач на другие программным способом с целью достижения высокой гибкости;

- АРМ должно иметь возможность многоканального измерения и обработки аналоговых электрических сигналов в широких частотном и динамическом диапазонах с целью сопряжения АРМ с измерительными преобразователями различного назначения;

- архитектура АРМ должна исключать избыточность входящих в него СИ с целью повышения коэффициента их использования;

- АРМ должно включать в себя меры физических величин, обеспечивающие самопроверку и самодиагностику его функциональных узлов программным способом;

- в АРМ должна быть предусмотрена возможность сопряжения его с другими СИ, а также с системами более высокого уровня (например с большими ЭВМ);

- высокая надежность аппаратных и программных средств АРМ должна сочетаться с развитым программным обеспечением, перекрывающим основные исследовательские и поверочные задачи в метрологических работах;

- в АРМ должна быть предусмотрена возможность управления объектом измерения.

Эти требования в некоторой степени диктуют и состав АРМ.

В таблице 4.1 в первой графе в кратком виде перечислены требования к АРМ, а в третьей графе – средства, обеспечивающие выполнение этих требований. Линии связи во второй графе показывают, что, с одной стороны, данное требование выполняется при наличии соответствующих средств и, с другой стороны, данное средство обеспечивает выполнение одного или нескольких требований.

Таблица 4.1

Требования	Связи	Средства
Многоканальность	○ — ○	Коммутатор
Неизбыточность	○ — ○	Аналого-цифровой интерфейс
Сопряжение	○ — ○	Магистрально-модульная архитектура
Многофункциональность	○ — ○	Программное обеспечение
Гибкость	○ — ○	ЭВМ
Самопроверка	○ — ○	Меры физических величин
Управление	○ — ○	ЦАП

Перечень средств в таблице и способ их организации в виде магистрально-модульной архитектуры напоминают гибкие измерительные системы и позволяют построить обобщенную модель АРМ метролога (рисунок 4.6). Ядром АРМ является его электронная часть – от коммутатора до цифроаналогового преобразователя (ЦАП). Это ядро вместе с конкретным набором преобразователей или других СИ и конкретными органами исполнения и управления образуют различные проблемно-ориентированные АРМ.

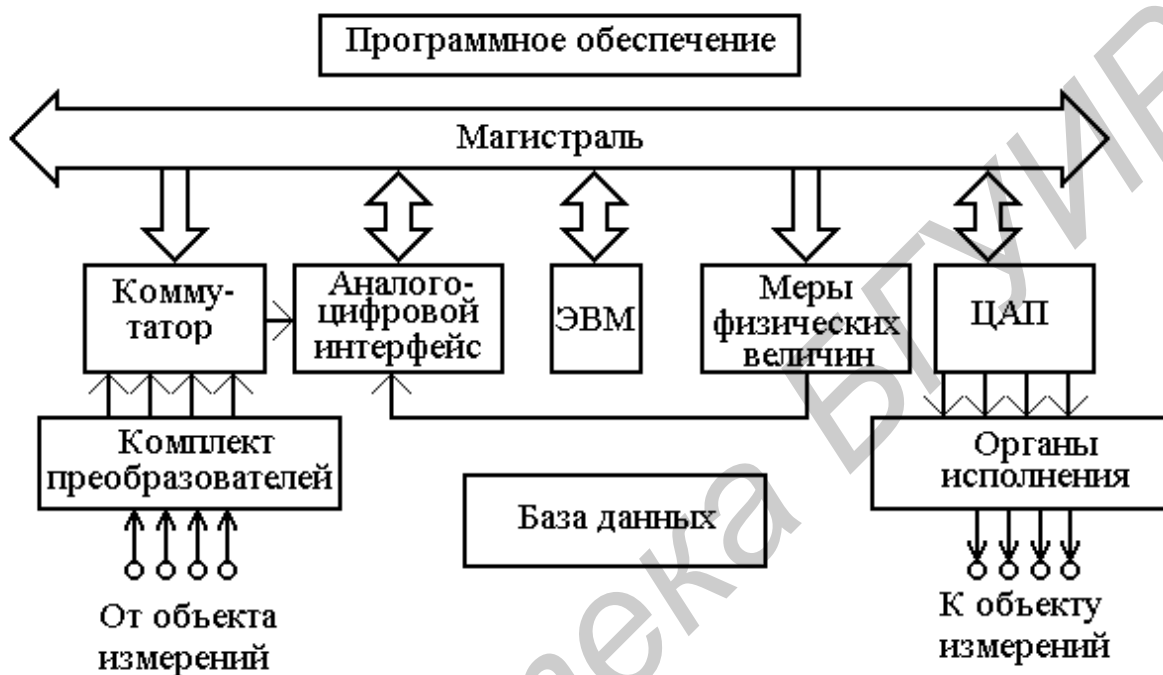


Рисунок 4.6 – Обобщенная модель АРМ метролога

Таким образом, в основу организации АРМ метролога (точнее, его ядра) может быть положен принцип построения измерительно-вычислительных комплексов (ИВК) и компьютерно-измерительных систем (КИС). Общим для них являются магистрально-модульная архитектура, а различие заключается в степени приборной интеграции.

5 ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

В широком смысле под измерительным преобразователем понимается устройство, преобразующее измерительную информацию. Различают первичные, передающие и промежуточные преобразователи. В нашем пособии этот термин применяется в узком смысле, а именно, как *первичный измерительный преобразователь*. Преобразователи образуют весьма специфичный класс средств измерений, и их роль быстро растет с ростом автономно функционирующих объектов – роботизированных предприятий, беспилотных средств, атомных электростанций и т. п.

5.1 Основные термины и определения

Измерительное преобразование представляет собой отображение размера одной физической величины размером другой физической величины, функционально с ней связанной.

Применение измерительных преобразований является единственным методом практического построения любых измерительных устройств.

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

ИП может входить в состав какого-либо измерительного прибора (измерительной установки, измерительной системы и др.) или применяться с каким-либо средством измерений.

Другими словами, ИП – это средство измерений, использующее определенный физический принцип или эффект и выполняющее одно частное измерительное преобразование (например, преобразование температуры в пропорциональный электрический сигнал с помощью термопары).

По месту расположения в измерительной цепи различают первичные, промежуточные и передающие преобразователи. Выделяют также масштабные измерительные преобразователи.

Первичный измерительный преобразователь – измерительный преобразователь, на который непосредственно воздействует измеряемая физическая величина, т. е. первый преобразователь в измерительной цепи измерительного прибора (установки, системы).

Датчик – конструктивно обособленный первичный измерительный преобразователь, от которого поступают сигналы измерительной информации.

Датчик может быть вынесен на значительное расстояние от средства измерения, принимающего его сигналы.

Промежуточный измерительный преобразователь – измерительный преобразователь, занимающий место в измерительной цепи после первичного преобразователя.

Передающий измерительный преобразователь – измерительный преобразователь, предназначенный для дистанционной передачи сигнала измерительной информации.

Масштабный измерительный преобразователь – измерительный преобразователь, предназначенный для изменения размера физической величины или измерительного сигнала в заданное число раз. Примеры – делитель напряжения, измерительный трансформатор тока, измерительный усилитель.

По характеру преобразования различают аналоговые, цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи. По месту в измерительной цепи различают первичные и промежуточные преобразователи. Выделяют также первичные и передающие преобразователи.

Аналоговый измерительный преобразователь – измерительный преобразователь, преобразующий одну аналоговую величину (аналоговый измерительный сигнал) в другую аналоговую величину (аналоговый измерительный сигнал).

Аналого-цифровой измерительный преобразователь – измерительный преобразователь, предназначенный для преобразования аналогового измерительного сигнала в цифровой код.

Цифроаналоговый измерительный преобразователь – измерительный преобразователь, предназначенный для преобразования числового кода в аналоговую величину.

Работа измерительных преобразователей протекает в сложных условиях, так как объект измерения – это, как правило, сложный, многогранный процесс, характеризующийся множеством параметров, каждый из которых действует на измерительный преобразователь совместно с остальными параметрами. Нас же интересует только один параметр, который называется *измеряемой величиной*, а все остальные параметры процесса считаются *помехами*. Поэтому у каждого измерительного преобразователя устанавливается его *естественная входная величина*, которая лучше всего воспринимается им на фоне помех. Подобным образом выделяется и *естественная выходная величина* измерительного преобразователя.

5.2 Классификация измерительных преобразователей

Классификация измерительных преобразователей по роду входных и выходных величин приведена на рисунке 5.1.

Преобразователи неэлектрических величин в электрические с точки зрения вида сигнала на выходе могут быть подразделены на генераторные, выдающие заряд, напряжение или ток (выходная величина $E = F(X)$ или $I = F(X)$ и внутреннее сопротивление $Z_{вн} = \text{const}$), и параметрические с выходным сопротивлением, индуктивностью или емкостью, изменяющимися в соответствии с изменением входной величины (ЭДС $E = 0$ и выходная величина в виде изменения R , L или C в функции X).

Различие между генераторными и параметрическими преобразователями обусловлено их эквивалентными электрическими схемами, отражающими фундаментальные отличия в природе используемых в преобразователях физических явлений. Генераторный преобразователь является источником непосредственно выдаваемого электрического сигнала, а измерение изменений параметров параметрического преобразователя производится косвенно, по изменению тока или напряжения в результате его обязательного включения в схему с внешним источником питания. Электрическая схема, непосредственно связанная с параметрическим преобразователем, формирует его сигнал. Таким образом, совокупность параметрического преобразователя и электрической схемы является источником электрического сигнала.



Рисунок 5.1 – Классификация измерительных величин по роду входных и выходных величин

По физическому явлению, положенному в основу работы, и типу входной физической величины генераторные и параметрические преобразователи делятся на ряд разновидностей (рисунок 5.2): генераторные – на пьезоэлектрические, термоэлектрические и т. п.; резистивные – на контактные, реостатные и т. д.; электромагнитные – на индуктивные, ферроиндукционные, трансформаторные и т. д.

По виду модуляции все ИП делятся на две большие группы:

- амплитудные;
- частотные, временные, фазовые.

Последние три разновидности имеют очень много общего и поэтому объединены в одну группу.

Генераторные измерительные преобразователи. Принцип действия генераторного преобразователя основан на том или ином физическом явлении, обеспечивающем преобразование соответствующей измеряемой величины в электрическую форму энергии. Наиболее важные из этих физических эффектов, используемых для построения генераторных преобразователей, приведены в таблице 5.1, а принципы их технической реализации иллюстрируют схемы, приведенные на рисунке 5.3.

Преобразователь, реализующий *термоэлектрический эффект* (термопара),

содержит два разнородных (выполненных из различных материалов) проводника M_1 и M_2 (рисунок 5.3, а). Если температуру θ_1 одного места соединения (спая) проводников сделать отличной от температуры θ_2 другого, то в цепи появится термоЭДС, являющаяся разностью функций температур спаев. ТермоЭДС E будет пропорциональна измеряемой температуре θ_1 при постоянной температуре θ_2 (соответствующий нерабочий спай термопары помещен в среду с постоянной температурой, равной, например, $0\text{ }^\circ\text{C}$).

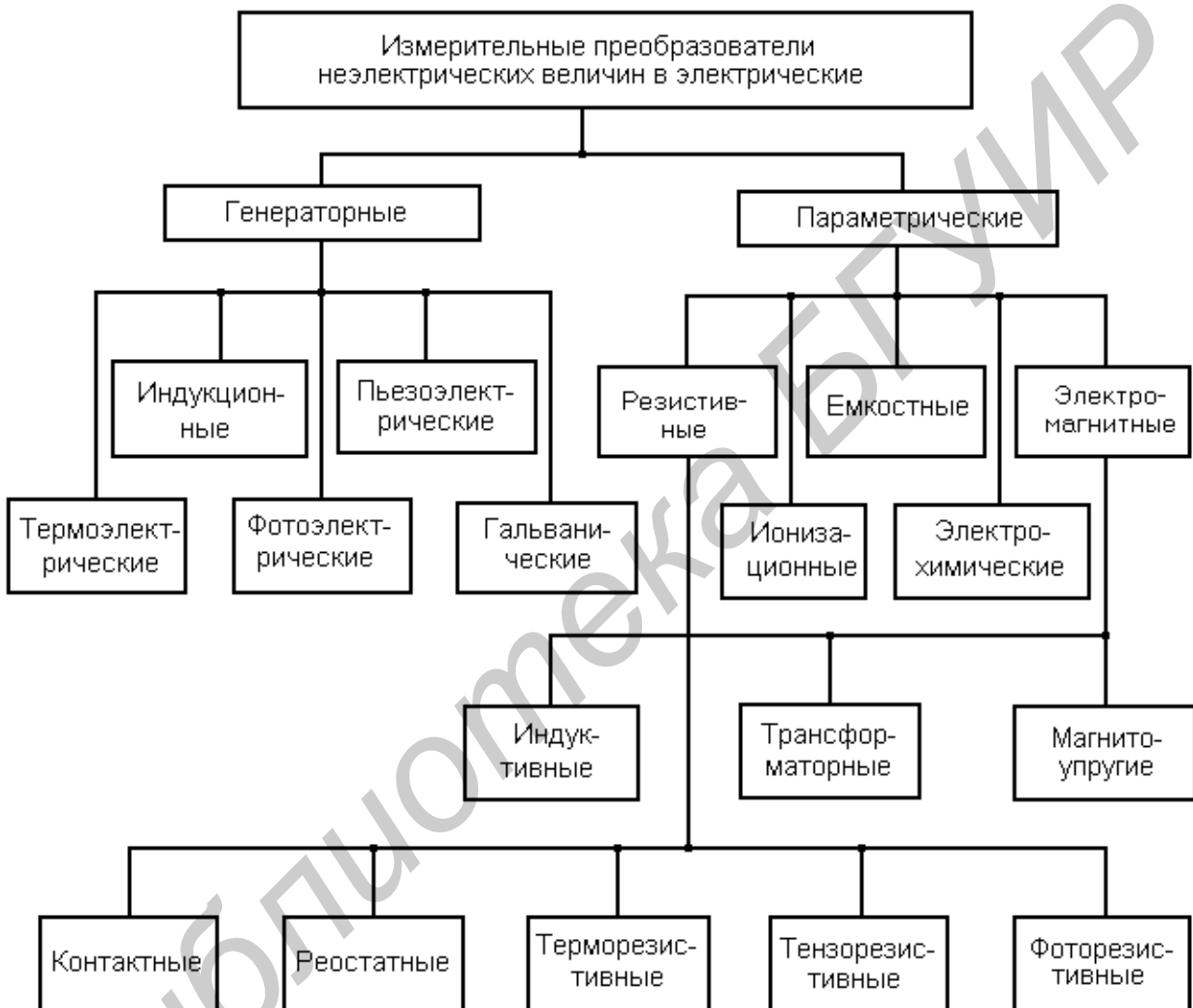


Рисунок 5.2 – Классификация измерительных преобразователей неэлектрических величин в электрические

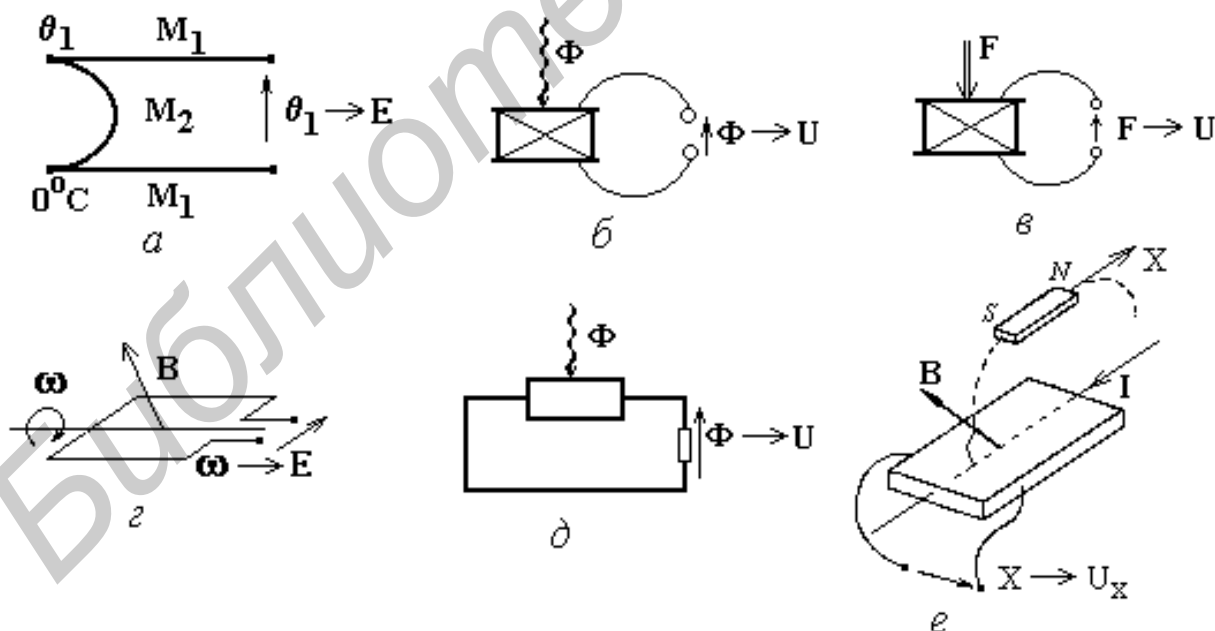
В преобразователе с *пироэлектрическим эффектом* определенные кристаллы, называемые пироэлектриками (например триглицин сульфата), испытывают спонтанную электрическую поляризацию, зависящую от их температуры. В этом случае на двух противоположных поверхностях преобразователя появляются электрические заряды противоположных знаков, пропорциональные этой поляризации (рисунок 5.3, б). Поглощенный кристаллом поток излучения приводит к росту температуры и

соответствующему изменению поляризации кристалла, которое определяется по изменению напряжения на зажимах конденсатора.

Таблица 5.1 – Физические эффекты, используемые для построения генераторных преобразователей

Измеряемая величина	Используемые эффекты	Выходная величина
Температура	Термоэлектрический эффект	Напряжение
Поток оптического излучения	Пироэлектрический эффект	Заряд
	Внешний фотоэффект	Ток
	Внутренний фотоэффект в полупроводнике с р-п-переходом	Напряжение
	Фотоэлектромагнитный эффект	Напряжение
Сила, давление, ускорение	Пьезоэлектрический эффект	Заряд
Скорость	Электромагнитная индукция	Напряжение
Перемещение	Эффект Холла	Напряжение

В преобразователе с пьезоэлектрическим эффектом изменение механического напряжения в кристалле пьезоэлектрика, например кварца, приводит к деформации, вызывающей появление на противоположных гранях кристалла одинаковых по величине электрических зарядов противоположного знака (рисунок 5.3, в).



a – термоэлектрический; *б* – пироэлектрический; *в* – пьезоэлектрический; *г* – электромагнитной индукции; *д* – фотоэлектрический; *е* – Холла

Рисунок 5.3 – Эффекты, используемые при создании генераторных измерительных преобразователей

Таким образом, измерение силы или приводимых к ней величин (давление, ускорение) осуществляется измерением напряжения между зажимами пьезоэлектрика.

В преобразователе, использующем явление электромагнитной индукции, при перемещении проводника в постоянном магнитном поле возникает ЭДС, пропорциональная скорости его перемещения и значению магнитного потока (рисунок 5.3, з). При воздействии переменного магнитного поля на неподвижный замкнутый контур в нем индуцируется ЭДС, равная по значению (и противоположная по знаку) скорости изменения магнитного потока. При перемещении источника магнитного поля (например магнита) относительно неподвижного контура в нем также будет возбуждаться ЭДС. Таким образом, измерение ЭДС электромагнитной индукции позволяет определить скорость перемещения объекта, механически связанного с подвижным элементом электромагнитного преобразователя.

В преобразователях используются и фотоэлектрические эффекты, различные по своим проявлениям, но объединенные общей причиной их возникновения – освобождением электрических зарядов в веществе под действием светового или электромагнитного излучения, длина волны которого меньше некоторого порогового значения, являющегося характеристикой чувствительного материала (рисунок 5.3, д).

Вакуумный фотоэлемент с внешним фотоэффектом. В данном преобразователе имеются два электрода – анод и фотокатод (электрический электрод, покрытый светочувствительным материалом). При освещении фотокатода освобожденные в нем фотоэлектроны покидают его и образуют пропорциональный освещенности ток, текущий от фотокатода к аноду под действием приложенного электрического поля.

Полупроводниковый фотодиод с внутренним фотоэффектом. Электроны и дырки, освобожденные в окрестностях освещенного р-п-перехода в полупроводнике, перемещаются под действием электрического поля, создаваемого внешним источником тока, и вызывают изменение разности потенциалов на границах полупроводника.

Преобразователь на основе фотоэлектромагнитного эффекта. Приложение магнитного поля, перпендикулярного падающему излучению, вызывает в освещенном полупроводнике появление электрического напряжения в направлении по нормали к магнитному полю и падающему излучению¹.

¹ Речь идет о фотоэлектромагнитном приемнике излучения, который содержит чувствительный полупроводниковый монокристалл, размещенный между концами магнита. Поток оптического излучения, поглощаемый поверхностью кристалла, создает вблизи нее повышенную концентрацию электронно-дырочных пар, диффундирующих внутрь кристалла. Движущиеся электроны и дырки отклоняются магнитным полем в противоположные стороны, и между электродами кристалла устанавливается разность потенциалов, пропорциональная освещенности. Такие фотоэлементы используют обычно для измерения инфракрасного излучения.

Фотоэлектрические эффекты являются основой фотометрии и обеспечивают передачу измерительной информации, носителем которой является свет.

Преобразователь на основе эффекта Холла. При пропускании электрического тока через образец (пластину) полупроводника, находящийся в однородном магнитном поле (вектор магнитной индукции B составляет угол α с направлением тока I) в направлении, перпендикулярном полю, возникает ЭДС U_x :

$$U_x = K_H I B \sin \alpha, \quad (5.1)$$

где K_H зависит от типа проводимости и размеров пластины (рисунок 5.3, e).

Преобразователь Холла используют для измерения перемещений объектов, а также величин, преобразуемых в перемещения, например давления. Постоянный магнит преобразователя механически связывают с объектом, и при смещении магнита пропорционально изменяется выходное напряжение преобразователя (ток при этом постоянен).

Параметрические преобразователи. В параметрических преобразователях некоторые параметры выходного комплексного сопротивления могут изменяться под воздействием измеряемой величины. Комплексное сопротивление преобразователя, с одной стороны, обусловлено геометрией и размерами его элементов, а с другой – свойствами материалов: удельным сопротивлением ρ , магнитной проницаемостью μ и диэлектрической постоянной ϵ .

Изменения комплексного сопротивления могут быть, таким образом, вызваны воздействием измеряемой величины либо на геометрию и размеры элементов преобразователя, либо на электрические и магнитные свойства его материала, либо, что реже, на то и другое одновременно. Геометрические размеры преобразователя и параметры его комплексного сопротивления могут изменяться, если преобразователь содержит подвижный или деформирующийся элемент.

Каждому положению подвижного элемента преобразователя соответствует определенное комплексное сопротивление, и измерение его параметров позволяет узнать положение элемента. На этом принципе работает большое число преобразователей положения и перемещения объектов: потенциометрических, индуктивных с подвижным сердечником, емкостных.

Деформация является результатом действия силы (или величины, с ней связанной: давления, ускорения) на чувствительный элемент преобразователя. Изменение комплексного сопротивления преобразователя, вызванное деформацией чувствительного элемента, вызывает изменение соответствующего электрического сигнала в специальной измерительной схеме, в которую этот преобразователь включают.

Электрические свойства материала и состояние чувствительного элемента преобразователя зависят от переменных физических величин: температуры,

давления, влажности, освещенности и т. д. Если изменяется только одна из величин, а остальные поддерживаются постоянными, то можно оценить существующее однозначное соответствие между значениями этой величины и комплексным сопротивлением преобразователя. Это соответствие описывается функцией преобразования или градуировочной характеристикой (кривой). Зная градуировочную характеристику преобразователя, по результатам измерения его комплексного сопротивления можно определить соответствующее значение измеряемой величины.

В таблице 5.2 приведен ряд физических эффектов, связанных с преобразованием неэлектрических величин с помощью параметрических преобразователей. Среди них следует специально отметить резистивные преобразователи.

Таблица 5.2 – Физические эффекты, используемые для построения параметрических преобразователей

Измеряемая величина	Электрическая характеристика, изменяющаяся под действием измеряемой величины	Тип используемых материалов
Температура	Сопротивление	Металлы (платина, никель, медь), полупроводники
Сверхнизкие температуры	Диэлектрическая проницаемость	Стекло, керамика
Поток оптического излучения	Сопротивление	Полупроводники
Деформация	Сопротивление	Сплавы никеля, легированный кремний
Перемещение	Магнитная проницаемость	Ферромагнитные сплавы
	Сопротивление	Магниторезистивные материалы: висмут, антимонид индия
Влажность	Сопротивление	Хлористый литий, окись алюминия, полимеры
	Диэлектрическая проницаемость	
Уровень жидкости	Диэлектрическая проницаемость	Жидкие изоляционные материалы

Полное сопротивление параметрического преобразователя и его изменения можно определить, включив преобразователь в специальную схему формирования электрического сигнала, содержащую, как правило, источник питания. Наиболее часто используются следующие виды схем:

– потенциометрическая схема, содержащая соединенные параллельно

источник напряжения и преобразователь-потенциометр;

– мостовая схема, разбаланс которой характеризует изменение комплексного сопротивления преобразователя;

– колебательный контур, включающий в себя полное сопротивление преобразователя (при этом контур является частью генератора колебаний и определяет его частоту);

– операционный усилитель, в котором сопротивление преобразователя является одним из элементов, определяющим коэффициент его усиления.

Выбор схемы формирования сигнала является важным этапом в реализации измерений, от которого зависят метрологические характеристики измерительных комплексов в целом – погрешность, чувствительность, линейность, невосприимчивость к влиянию определенных величин.

Комбинированные преобразователи. При измерениях некоторых неэлектрических величин не всегда удается преобразовать их непосредственно в электрическую величину. В этих случаях осуществляют двойное преобразование исходной (первичной) измеряемой величины в промежуточную неэлектрическую величину, которую преобразуют затем в выходную электрическую величину. Совокупность двух соответствующих измерительных преобразователей образует комбинированный преобразователь (рисунок 5.4).

Подобные преобразования удобны для измерения механических величин, вызывающих в первичном преобразователе деформацию или перемещение выходного элемента, к которому чувствителен вторичный преобразователь.



Рисунок 5.4 – Структурная схема комбинированного измерительного преобразователя

Так, например, растягивающее усилие F , действуя на стержень длиной l с поперечным сечением s и модулем Юнга Y , вызывает его деформацию $\Delta l/l$, которую можно определить по изменению сопротивления резистивного преобразователя R , сочлененного со стержнем через механизм передачи. Зная соотношение для первичного преобразователя, связывающее растягивающее усилие с деформацией

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{1}{Y} \frac{F}{s}, \quad (5.2)$$

и соотношение для вторичного преобразователя, связывающее его входную величину – деформацию – с выходной величиной, т. е.

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta l}{l}, \quad (5.3)$$

где K – коэффициент вторичного преобразования.

Можно вывести окончательную формулу, связывающую растягивающее усилие с изменением сопротивления, для преобразователя в целом:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{K F}{Y_s}. \quad (5.4)$$

Давление, например, можно измерить с помощью мембраны, деформация которой преобразуется в электрическую величину преобразователем, реагирующим на механическое перемещение. Так, деформация мембраны электродинамического микрофона, вызванная воздействием акустического давления, преобразуется в электрический сигнал с помощью индукционного преобразователя.

Если механические напряжения в первичном преобразователе не превышают предел упругости, то, как правило, его характеристика будет линейна. Функцию преобразования комбинированного преобразователя определяют путем его градуировки с помощью образцовых мер преобразуемой величины.

Строго говоря, измерительные преобразователи не имеют самостоятельного назначения как средства измерений. Они могут быть использованы только в сочетании с регистрирующей аппаратурой, даже если последняя находится на большом расстоянии от преобразователя. Наибольшее распространение получили преобразователи, преобразующие измеряемую физическую величину в электрический сигнал. Это обстоятельство объясняется тем, что измерительный сигнал электрической природы наиболее удобен для передачи, обработки и использования в целях управления, а соответствующие преобразователи наилучшим образом приспособлены для применения в автоматизированных системах измерений и управления.

5.3 Основы автоматизации исследования преобразователей

Другое дело, когда преобразователи выступают не как объект применения, а в качестве объекта исследования. Это происходит при выпуске их из производства и при периодической поверке. Задача метрологических исследований преобразователя – определить его градуировочную характеристику, чувствительность и основную погрешность преобразования. Здесь уже недостаточно регистрировать и измерять выходной сигнал; необходимо воздействовать на вход преобразователя таким образом, чтобы значение физической величины, характеризующей это воздействие, было хорошо известно. Другими словами, к входу преобразователя нужно подключить меру физической величины.

Для преобразователей массового применения их метрологическое обслуживание представляет собой технико-экономическую проблему. Традиционный подход индивидуального исследования каждого преобразователя на образцовой установке часто оказывается неприемлемым по экономическим соображениям: стоимость поверки может превысить стоимость изготовления самого преобразователя. Для уменьшения трудоемкости поверки преобразователей используют следующие приемы:

- помещают большое число преобразователей в одни и те же условия, при которых на их входы действует одна и та же физическая величина. Например, преобразователи температуры, помещенные в один термостат, преобразователи давления, расположенные в одном сосуде с известным давлением;

- конструктивно объединяют преобразователь с устройством, имитирующим воздействие на вход преобразователя измеряемой физической величины. Например, расположение резисторного нагревателя рядом с чувствительным элементом терморезисторного преобразователя СВЧ (или оптического излучения) позволяет контролировать преобразователь в автоматическом режиме;

- заменяют прямые исследования градуировочной характеристики преобразователя косвенными исследованиями других его свойств. В основе этого приема лежит гипотеза, что деградационные факторы действуют не только на градуировочную характеристику, но и на другие параметры преобразователя. Постоянство этих параметров повышает нашу уверенность в постоянстве и градуировочной характеристики. Примером таких косвенных параметров являются импедансные параметры преобразователя, его динамические и шумовые характеристики.

В ряде случаев изъятие преобразователей из рабочих мест либо нежелательно (органы очувствления роботов), либо вообще невозможно (встроенные преобразователи механических напряжений в ГЭС). В последнем случае применяют многократное резервирование с сопоставлением показаний разных преобразователей и статистической обработкой результатов измерений. Что касается других встроенных преобразователей, то для них разрабатываются методы и средства самодиагностики и самоконтроля. Очень важно предусматривать такую возможность при разработке новых типов преобразователей.

Часто преобразователь является самым инерционным звеном в измерительной системе. Инерционность преобразователя учитывается его динамической характеристикой, знание которой необходимо при измерении параметров быстропротекающих процессов. Важно отметить, что для исследования динамической характеристики нужно не только подключить к входу преобразователя измеряемую физическую величину, но и обеспечить ее изменения. Эта задача значительно облегчается, если удастся установить, что инерционность преобразователей данного типа проявляется примерно одинаково. В этом случае исследуются несколько преобразователей, строится типовая динамическая характеристика, которая затем приписывается каждому экземпляру преобразователя данного типа.

В заключение отметим, что совсем не обязательно каждый преобразователь подвергать индивидуальному метрологическому обследованию. Иногда возможна сквозная калибровка всей измерительной системы вместе с преобразователем. Такая прямая поверка, конечно, предпочтительней для данной системы. Но если преобразователь выполнен в качестве самостоятельного узла и может быть использован в другой измерительной системе, то желательно знать его индивидуальные метрологические характеристики.

Автоматизация метрологических исследований преобразователей имеет целью повышение их точности и сокращение времени и трудовых ресурсов на эти работы.

ЛИТЕРАТУРА

1 Автоматизация измерений и контроля электрических и неэлектрических величин : учеб. пособие для вузов / Н. Д. Дубовой [и др.] ; под ред. А. А. Сазонова. – М. : Изд-во стандартов, 1987. – 328 с.

2 Основы автоматизации измерений : учеб. пособие / В. Б. Коркин [и др.]. – М. : Изд-во стандартов, 1991. – 256 с.

3 Bentley, J. P. Principles of measurement systems. 4th ed. Edinburg Gate, Harlow Essex CV20 2JE, England, 2005. – 528 с.

4 Аш, Ж. Датчики измерительных систем : В 2-х книгах ; пер. с франц. – М. : Мир, 1992. – 480 с.

5 Измерение электрических и неэлектрических величин : учеб. пособие для вузов ; под общ. ред. Н. Н. Евтихиева. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.

6 Клаассен, К. Б. Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике / К. Б. Клаассен. – М. : Постмаркет, 2000. – 352 с., ил.

7 Левшина, Е. С. Электрические измерения физических величин (Измерительные преобразователи) : учеб. пособие для вузов / Е. С. Левшина, П. В. Новицкий. – Л. : Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.

8 Основы метрологии и электрические измерения : учебник для вузов ; под ред. Е. М. Душина. – 6-е изд., перераб. и доп. – Л. : Энергоатомиздат, 1987. – 480 с.

9 Сопряжение датчиков и устройств ввода данных с компьютерами IBM PC ; пер. с англ. ; под ред. У. Томпкинса, Дж. Уэбстера. – М. : Мир, 1992. – 592 с.

10 Туричин, А. М. Электрические измерения неэлектрических величин / А. М. Туричин. – М.–Л.: Энергия, 1966. – 690 с.

11 Ревин, В. Т. Преобразование и преобразователи измерительной информации : учеб. пособие : В 5 ч. Ч. 1. – Минск : БГУИР, 2002. – 70 с.

12 Ревин, В. Т. Преобразование и преобразователи измерительной информации : учеб. пособие : В 5 ч. Ч. 2. – Минск : БГУИР, 2003. – 103 с.

13 Ревин, В. Т. Преобразование и преобразователи измерительной информации : учеб. пособие : В 5 ч. Ч. 3. – Минск : БГУИР, 2004. – 86 с.

14 Ревин, В. Т. Преобразование и преобразователи измерительной информации : учеб. пособие : В 5 ч. Ч. 4. – Минск : БГУИР, 2004. – 91 с.

15 Ревин, В. Т. Преобразование и преобразователи измерительной информации : учеб. пособие : В 5 ч. Ч. 5. – Минск : БГУИР, 2005. – 96 с.

16 Нефедов, В. И. Основы радиоэлектроники : учебник для вузов / В. И. Нефедов. – М. : Высш. шк., 2000. – 320 с.

17 Евдокимов, Ю. К. LabVIEW для радиоинженера: от виртуальной модели до реального прибора / Ю. К. Евдокимов, В. Р. Линдваль, Г. И. Щербаков. – М. : ДМК Пресс, 2007. – 400 с.

18 Пейч, Л. И. LabVIEW для новичков и специалистов / Л. И. Пейч, Д. А. Точилин, Б. П. Поллак. – М. : Горячая линия – Телеком, 2004. – 384 с.

19 Суранов, А. Я. LabVIEW 8.20 : справочник по функциям / А. Я. Суранов. – М. : ДМК Пресс, 2007. – 536 с.

20 Метрология, стандартизация, сертификация и электроизмерительная техника : учеб. пособие / К. К. Ким, [и др.]. – СПб. : Питер, 2008. – 368 с.

Учебное издание

Ревин Валерий Тихонович

АВТОМАТИЗАЦИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ РАБОТ

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Редактор *Т. Н. Крюкова*

Корректор *А. В. Бас*

Подписано в печать Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. Уч.-изд. л. 4,0. Тираж 100 экз. Заказ 122.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.
220013, Минск, П. Бровки, 6