

В. Ю. ШИШМАРЕВ

ТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ

*Учебник
для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению подготовки
«Автоматизация технологических процессов
и производств»*

2-е издание, исправленное



Москва
Издательский центр «Академия»
2012

УДК 001.8(075.8)
ББК 30.10я73
Ш657

Рецензенты:

проф. кафедры «Технология машиностроения» МГТУ «Станкин»,
д-р техн. наук *В. А. Тимирязев*;
зам. Генерального директора ОАО «Второй Московский
приборостроительный завод», канд. техн. наук *П. О. Орлеанский*

Шишмарев В.Ю.

Ш657 **Технические измерения и приборы : учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / В.Ю.Шишмарев. — 2-е изд., испр. — М. : Издательский центр «Академия», 2012. — 384 с. — (Сер. Бакалавриат).**

ISBN 978-5-7695-8764-1

Учебник создан в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом по направлению подготовки 220700 «Автоматизация технологических процессов и производств» (квалификация «бакалавр»).

Изложены основы теории измерений, методы измерений, метрологические показатели измерений и средств измерений. Приведена современная терминология и классификация методов и средств измерений. Рассмотрены типовые схемы измерительных приборов для измерения электрических величин, времени, геометрических и механических величин, температуры, сгруппированные по измеряемым величинам, средства отображения и регистрации результатов измерений. Описаны основы подготовки измерительного эксперимента и обработки результатов измерений. Уделено внимание измерению экологических параметров, пассивному и активному контролю изделий и качества продукции.

Для студентов учреждений высшего профессионального образования.

УДК 001.8(075.8)
ББК 30.10я73

*Оригинал-макет данного издания является собственностью
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом
без согласия правообладателя запрещается*

© Шишмарев В. Ю., 2010

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2010

ISBN 978-5-7695-8764-1

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2010

ПРЕДИСЛОВИЕ

Измерительная техника используется во многих областях деятельности человека, прежде всего в промышленности и на транспорте. Она широко используется при разработке, создании и эксплуатации многих технических объектов и систем. Кроме того, в последние десятилетия точные методы и технологии, требующие измерения, нашли широкое применение в химии, биологии, медицине, сельском хозяйстве. Будущие специалисты в этих областях знаний в той или иной степени также изучают основы измерительной техники.

Развитие экономики в последние годы тесно связано с повышением требований к качеству. Качество влияет на непрерывность и ритмичность производства, себестоимость продукции, объем ее выпуска, производительность труда и эффективность в целом ряде процессов производства. Высокое качество продукции способствует удовлетворению постоянно растущих потребностей населения, а также стабилизации и развитию международных связей.

Контроль многочисленных параметров качества является, в первую очередь, задачей измерительной техники. Высокое качество продукции может быть достигнуто только там, где измерительная техника составляет неотъемлемую часть процесса производства. Кроме того, необходимое повышение качества предъявляет все большие требования к эффективности самой измерительной техники. Поэтому обеспечение качества и измерительная техника в процессах производства неразрывно связаны между собой.

Измерительная техника исторически развивалась в тесной связи с объективными потребностями общества. Факты, свидетельствующие об этом взаимодействии, относятся еще к V тысячелетию до н.э. Начинающийся товарообмен обусловил необходимость создания простых мер длины, объема, массы. С развитием общества совершенствовалась также и техника измерения.

Научно-техническая революция (XX в.), характеризующаяся широким внедрением средств автоматизации управления и про-

изводственных процессов, вызвала значительное развитие всей измерительной техники.

Современные механизированные, частично или полностью автоматизированные и в высокой степени производительные промышленные производства функционируют только при сравнительно больших затратах на проведение контроля. Требования к качеству, надежности и быстродействию измерения постоянно возрастают. Диапазоны измерений ряда физических величин за последние 20 лет расширились на несколько порядков.

В промышленных странах трудоемкость контроля и измерений составляет в среднем от 10 до 15 % трудоемкости всего общественного производства. В некоторых отраслях промышленности, например в приборостроении и радиоаппаратостроении, этот процент значительно выше.

Выпускники учебных заведений должны обладать знаниями не только основ измерительной техники, но и новейших средств измерений, обеспечивающих прогресс в развитии науки и техники, а также промышленного производства высококачественной современной продукции.

Для формирования специалиста ограниченные, но систематизированные основы знаний (в данном случае — измерительной техники) являются более ценными, чем детализированные, но разрозненные фрагменты тех или иных разделов учебного курса.

За последние годы в измерительной технике благодаря достижениям микроэлектроники произошли значительные качественные изменения. Средства измерений стали включать в себя микропроцессоры, которые обеспечивают автоматическое управление процессом измерений и обработку данных, т. е. придают этим средствам интеллектуальные свойства.

В связи с разработкой различных датчиков в интегральном микроэлектронном исполнении у измерительной техники появились новые приложения и перспективы развития. Нашла широкое применение и цифровая измерительная техника.

В данном учебнике не рассмотрены радиотехнические средства измерения, так как эти вопросы не предусмотрены типовой программой по этой дисциплине и более подробно изложены в других учебниках и учебных пособиях*.

* *Шишмарев В.Ю., Шанин В.И.* Электрорадиоизмерения. — 2-е изд. — М. : Изд. центр «Академия», 2009. *Шишмарев В.И.* Электрорадиоизмерения. Практикум. — 2-е изд. — М. : Изд. центр «Академия», 2009.

Стратегия развития приборостроения для гражданских отраслей промышленности. Министерством промышленности, науки и технологий Российской Федерации и Ассоциацией делового и научно-технического сотрудничества в области машиностроения, высоких технологий и конверсии разработан проект стратегии развития приборостроения для гражданских отраслей промышленности.

Стратегия развития приборостроительной промышленности России (далее — стратегия) определяет основные приоритеты этой отрасли как наукоемкой части машиностроительного комплекса, призванной осуществлять техническое перевооружение основных отраслей народного хозяйства и способствовать развитию новых высокотехнологичных производств и науки.

Цели, задачи и приоритеты стратегии. Стратегия предполагает формирование условий приоритетного развития приборостроительной отрасли в целях обеспечения наиболее эффективного развития сырьевых и машиностроительных отраслей промышленности на основе использования современных достижений науки (информатики, метрологии, электроники) и интеллектуального потенциала страны.

Цели стратегии:

- обеспечение технологической независимости и экономической безопасности страны в условиях рыночной экономики;
- обеспечение поддержания на мировом уровне и совершенствования материальной базы Российской системы единства измерений и опережающего развития направлений в прикладной метрологии, позволяющих активно развивать новые высокоэффективные технологии (атомная техника, нанотехнология, биосинтез, энерго- и ресурсосбережение);
- обеспечение модернизации технологической базы промышленности в целом и машиностроения в частности на основе системной, комплексной автоматизации оборудования и производств;

- повышение безопасности эксплуатации промышленных, транспортных и коммунальных объектов, в том числе в чрезвычайных ситуациях;

- повышение эффективности и качества медицинской помощи за счет улучшения оснащенности органов здравоохранения современными средствами медицинской техники.

Указанные цели предполагают решение следующих задач:

- ускорение научных и конструкторско-технологических разработок современных средств измерения параметров в широком диапазоне значений, в том числе для измерений в экстремальных условиях, средств автоматизации и систем управления высокой надежности и быстродействия, программных продуктов широкого назначения, телеизмерительных и телеуправляющих систем;

- технологическое переоснащение приборостроительных предприятий (в первую очередь, ведущих), сохранивших в основном производственный потенциал (создание систем автоматизированного проектирования, участков микроэлектронной технологии, автоматизированных цехов с гибкими производственными системами механообработки, испытательных центров);

- создание интегрированных компаний с высоким уровнем кооперации и специализации, а также развитие и поддержка малых и средних предприятий, специализирующихся на создании и производстве высококачественной приборной продукции и комплектующих изделий;

- расширение внешнеэкономических связей и сотрудничества с ведущими иностранными фирмами, в том числе из ближнего зарубежья, гармонизация стандартов и технических норм с международными;

- организация целевой подготовки инженерных и рабочих кадров с решением социальных вопросов молодых специалистов, в том числе последипломной переподготовки специалистов.

Приоритетным направлением развития приборостроения, средств автоматизации и систем управления на ближайший период является использование новых физико-технологических принципов построения средств измерения физических величин и технологических параметров на основе достижений фундаментальных наук, гетерогенных структур, нанодисперсных материалов, ядерного магнитного резонанса, лазерной оптики, биотехнических сенсоров других высоких технологий, позволяющих обеспечивать высокую точность, надежность и широкий диапазон измерений, в том числе в экстремальных условиях.

Современное состояние приборостроительной промышленности в России. Приборостроение — базовая отрасль, обеспечивающая промышленность средствами измерения для поддержания единства измерений в стране и в мире.

В России находится в эксплуатации около 1,5 млрд средств измерения (СИ), ежегодно потребители приобретают 15... 17 млн единиц новых СИ, причем около 10 млн единиц поставляются отечественными предприятиями. Государственный реестр средств измерений Госстандарта России включает в себя более 29 000 типов СИ.

В экономике единство измерений обеспечивает производство и потребление продукции, эквивалентность обмена при торговых, таможенных, налоговых операциях, защиту прав потребителей, условия добросовестной конкуренции.

В социальной сфере единство измерений обеспечивает технические регламенты безопасности машин и оборудования, продуктов питания, медицинской техники и лекарственных препаратов, транспортных и других услуг.

Потребность промышленности в измерительных, аналитических, испытательных приборах, средствах автоматизации и вычислительной техники обеспечивается в настоящее время менее чем на 60 %.

По данным Государственного реестра средств измерений Госстандарта России зарегистрировано более 3 000 видов средств измерений, ввозимых в Российскую Федерацию по импорту, часть которых (около 30 %) не изготавливается отечественной промышленностью.

К этим средствам измерений относятся:

- приборы и комплексы для измерения геометрических величин;
- приборы и комплексы для измерения физико-химического состава и свойств веществ;
- приборы для теплофизических и температурных измерений;
- приборы для измерения электрических величин;
- приборы для биологических и биомедицинских измерений.

Конкурентоспособность отечественной приборной продукции по различным номенклатурным группам на внутреннем рынке оценивается по соответствию мировым достижениям следующим образом:

- средства измерения теплоэнергетических величин — 70... 80 %;
- средства измерения электрических и магнитных величин, измерительные системы — 80... 90 %;
- средства измерения механических величин и испытательные машины — 80... 85 %;
- геофизические и гидрометеорологические приборы — 60... 70 %;
- средства медицинской техники (широкого применения в лечебных учреждениях) — 70... 80 %;

- средства вычислительной техники (программно-технические управляющие комплексы, телемеханика, контроллеры, устройства числового программного управления (УЧПУ) для станков) — 50... 70 %.

Научный и конструкторско-технологический потенциал приборостроительной промышленности. Высокая наукоемкость продукции приборостроения определяет необходимость повышенных затрат на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР) в этой отрасли.

По опыту ведущих мировых фирм инновационные затраты на создание и освоение производства новых изделий составляют 12... 15 % от стоимости выпускаемой продукции.

До 1990 г. в отечественном приборостроении этот показатель составлял 7... 8 %, к 1996 г. он снизился до 2 %, а количество вновь освоенных конкурентоспособных изделий уменьшилось в 4—5 раз.

Научно-технический потенциал отрасли в настоящее время представлен 26 научно-исследовательскими институтами и конструкторско-технологическими бюро, ориентированными на разработки по направлениям.

Создание и ускоренное освоение производства новых конкурентоспособных средств измерений, средств и систем автоматизации приборостроительной промышленности возможно только на современной микроэлектронной элементной базе, в том числе с использованием СБИС, при использовании автоматизированного проектирования микроэлектронных технологий изготовления сенсоров-датчиков, с оснащением механических участков автоматизированным механообрабатывающим оборудованием, в том числе лазерным, и гибкими производственными системами (ГПС).

Прогноз развития приборостроительной промышленности до 2010 г. Основные прогнозируемые показатели развития экономики России на 2010 г., млрд долл.:

- валовой внутренний продукт — 700;
- промышленное производство — 350... 420;
- продукция машиностроения — 105... 126 (25... 30 % от объема промышленного производства).

При этом темпы роста объема производства продукции приборостроения должны составить 7... 8 % в год при ежегодном обновлении и расширении номенклатуры продукции на 10... 15 % за счет новых и модернизированных изделий. Годовой объем выпускаемой приборной продукции отрасль может увеличить в 2,0—2,1 раза. По имеющимся оценкам потребность внутреннего рынка в средствах измерения, средствах и системах автоматизации к 2010 г. будет удовлетворяться на 90... 95 %.

Создание новых средств измерения для различных отраслей промышленности, средств и систем автоматизации с учетом ука-

занных ранее приоритетных направлений развития предусматривает:

1) расширение диапазонов и повышение точности измерения физических величин и технологических параметров в различных условиях эксплуатации, в первую очередь, при массовых измерениях (температура, масса и сила, давление, расход жидкостей и газа, размеры). В большинстве случаев практическая точность измерения должна повышаться, как минимум, на один класс от достигнутой каждые 7... 10 лет;

2) доминирующее развитие цифровых методов измерения физических величин и измерительных преобразователей, сенсоров и датчиков с кодифицированными сигналами связи;

3) развитие цифровых методов построения информационных моделей измерительных и управляющих систем, в том числе многофункциональных, с работой в диалоговом режиме;

4) создание и использование многофункциональных адаптивных датчиков и сенсоров с управляемым диапазоном измерений, коррекцией настроек;

5) создание и развитие производства функционально полной системы модулей нового поколения Российской государственной системы приборов на современной элементной базе (ГСП-Р) для построения автоматизированной системы управления (АСУ) технологическими процессами (ТП) различного уровня и назначения с обеспечением их информационной, метрологической, конструктивной и эксплуатационной совместимости, в том числе с гармонизацией по международным стандартам;

6) развитие лазерных сверхточных интерференционных методов измерения размеров и контроля качества поверхности в машиностроении, на транспорте, в строительстве, создание и освоение производства приборов и измерительных систем с использованием указанных методов;

7) развитие методов, создание приборов и систем неразрушающего контроля материалов, деталей и узлов с использованием индукционных, акустических, СВЧ- и КВЧ-излучений, лазерных излучений с визуализацией, классификацией и архивированием;

8) разработку методов и средств анализа состава жидкостей и газов, в том числе многокомпонентных, в непрерывном потоке, а также тестеров на различные примеси с передачей информации в систему контроля;

9) разработку методов и создание аппаратуры метрологической аттестации средств измерения, в том числе в эксплуатационных условиях, одновременно с разработкой мер по увеличению межповерочного интервала средств измерений (до 5... 20 лет), особенно для датчиков, встроенных в промышленное оборудование.

ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРИБОРОВ И СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ

1.1. Назначение и принципы построения

Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП) создана в целях обеспечения техническими средствами системы контроля, регулирования и управления технологическими процессами различных отраслей промышленности.

В 1950-е гг. в различных организациях и на предприятиях разрабатывалось множество различных приборов для измерения и контроля со сходными техническими характеристиками, однако при этом не учитывалась возможность совместной работы приборов различных производителей, что приводило к увеличению стоимости разработок сложных систем на базе выпускаемых технических средств, тормозило широкое внедрение средств автоматизации. Поэтому в 1960 г. было принято решение о создании ГСП, а с 1961 г. начались работы по его реализации.

В настоящее время ГСП представляет собой эксплуатационно, информационно, энергетически, метрологически и конструктивно организованную совокупность изделий, предназначенных для использования в качестве средств автоматических и автоматизированных систем контроля, измерения, регулирования технологических процессов, а также информационно-измерительных систем. ГПС стала технической базой создания АСУ ТП и АСУ в промышленности. Ее развитие и применение способствовало формализации процесса проектирования АСУ ТП, переходу к машинному проектированию.

В основу создания и совершенствования ГСП положены следующие системотехнические принципы: типизация и минимизация многообразия функций автоматического контроля, регулирования и управления; минимизация номенклатуры технических средств; блочно-модульное построение приборов и устройств; агрегатное построение систем управления на базе унифицированных приборов и устройств; совместимость приборов и устройств.

По функциональному признаку все изделия ГСП подразделены на устройства:

- 1) получения информации о состоянии процесса или объекта;

2) приема, преобразования и передачи информации по каналам связи;

3) преобразования, хранения и обработки информации, формирования команд управления;

4) использования командной информации.

В первую группу устройств в зависимости от способа представления информации входят датчики, нормирующие преобразователи, формирующие унифицированный сигнал связи, приборы, обеспечивающие представление измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем, и устройства алфавитно-цифровой информации, вводимой оператором вручную. Средства получения информации являются самой многочисленной группой изделий государственной системы промышленных приборов и средств автоматизации — более половины номенклатуры всех технических средств.

Вторая группа устройств содержит коммутаторы измерительных цепей, преобразователи сигналов и кодов, шифраторы и дешифраторы, согласующие устройства, средства телесигнализации, телеизмерения и телеуправления. Эти устройства используют для преобразования как измерительных, так и управляющих сигналов.

Третью группу составляют анализаторы сигналов, функциональные и операционные преобразователи, логические устройства и устройства памяти, задатчики, регуляторы, управляющие вычислительные устройства и комплексы.

В четвертую группу входят исполнительные устройства: электрические, пневматические, гидравлические или комбинированные исполнительные механизмы, усилители мощности, вспомогательные устройства представления информации.

Минимизация номенклатуры средств контроля и управления реализуется на основе двух идей: унификации устройств одного функционального назначения на основе параметрического ряда этих изделий и агрегатирования комплекса технических средств для решения крупных функциональных задач.

Процесс минимизации начинается с отбора некоторых основных параметров приборов и устройств, выделения из их числа главного параметра и установления минимального необходимого числа устройств для перекрытия всего диапазона изменения главного параметра. При этом переход от диапазона использования одного устройства к диапазону использования другого подчиняется определенным закономерностям. Преимущественно используется геометрическая прогрессия, основанная на ряде предпочтительных чисел. Вся совокупность изделий одинакового функционального назначения называется *параметрическим рядом*.

В настоящее время разработаны параметрические ряды датчиков давления, расхода, уровня и электроизмерительных приборов. Тем не менее продолжается их оптимизация по технико-экономическим показателям, например по критерию минимума суммарных затрат на удовлетворение заданных потребностей. Этот критерий основан на противоречии между интересами потребителя и изготовителя: чем меньше в ряду приборов, тем меньше затраты на разработку, освоение, тем большими партиями они выпускаются, что также снижает затраты изготовителя. Увеличение числа приборов в ряду дает экономию потребителю за счет более эффективного использования возможностей приборов или за счет более точного соблюдения режима технологического процесса.

Агрегатные комплексы (АК) представляют собой совокупность технических средств, организованных в виде функционально-параметрических рядов, охватывающих требуемые диапазоны измерения в различных условиях эксплуатации и обеспечивающих выполнение всех функций в пределах заданного класса задач.

Реализация принципа агрегатирования на этапах построения сложных управляющих систем на базе унифицированных блоков и устройств позволяет существенно упростить и ускорить процесс создания АСУ, создает предпосылки для автоматизации их проектирования. К очень важным достоинствам агрегатного построения технических средств можно отнести возможность совершенствования изделий без полного их обновления.

Принцип агрегатирования в ГСП применяется очень широко. Унифицированная базовая конструкция датчиков теплоэнергетических величин с унифицированным пневматическим и электрическим сигналами была создана всего из 600 наименований деталей, при этом получили 136 типов и 863 модификации датчиков.

На более высоких уровнях проектирования изделий ГСП в качестве конструктивной основы используют комплекс унифицированных типов (модульных) конструкций (УТК). Все детали и узлы комплекса подразделены на четыре категории изделий таким образом, что элементы изделий низшего порядка предназначены для преобразования в элементы изделий высшего порядка.

Заложенные в ГСП общие для всех изделий понятия совместности можно сформулировать следующим образом.

Информационная совместность — совокупность стандартизированных характеристик, обеспечивающих согласованность сигналов связи по видам и номенклатуре, их информативным параметрам, уровням, пространственно-временным соотношениям, логическим соотношениям и типу логики. Для всех изделий

ГСП приняты унифицированные сигналы связи и единые интерфейсы — совокупность программных и аппаратных средств, обеспечивающих взаимодействие устройств в системе.

Конструктивная совместимость — совокупность свойств, обеспечивающих согласованность конструктивных параметров и механическое сопряжение технических средств, а также выполнение эргономических норм и эстетических требований при совместном использовании.

Эксплуатационная совместимость — совокупность свойств, обеспечивающих работоспособность и надежность функционирования технических средств при совместном использовании в производственных условиях, а также удобство обслуживания, наработки и ремонта.

Метрологическая совместимость — совокупность выбранных метрологических характеристик и свойств средств измерений, обеспечивающих сопоставимость результатов измерений и возможность расчета погрешности результатов измерений при работе технических средств в составе систем.

1.2. Структура

Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации представляет собой большой, сложный и непрерывно развивающийся комплекс приборов и устройств, серийно выпускаемых промышленностью и предназначенных для автоматизации контроля и управления различными технологическими процессами и оборудованием.

По роду используемой энергии носителя информационных сигналов устройства ГСП подразделяются на электрические, пневматические, гидравлические, а также устройства, работающие без использования вспомогательной энергии, — приборы и регуляторы прямого действия. Для того чтобы обеспечить совместную работу устройств различных групп, применяют соответствующие преобразователи сигналов. В АСУ наиболее эффективным является комбинированное применение устройств различных групп.

Достоинствами электрических приборов являются высокая чувствительность, точность, быстродействие, удобство передачи, хранения и обработки информации. Пневматические приборы обеспечивают повышенную безопасность при применении в легковоспламеняемых и взрывоопасных средах, высокую надежность в тяжелых условиях работы, в агрессивной атмосфере. Однако они уступают электронным приборам по быстродействию, возможности передачи сигнала на большие расстояния.